



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO
POSTGRADO FORESTAL

**ESTIMACIÓN DE VARIABLES DASOMÉTRICAS DEL BOSQUE TEMPLADO
DE HIDALGO, MÉXICO MEDIANTE DATOS ESPECTRALES Y DEL
INVENTARIO NACIONAL FORESTAL**

MIGUEL ÁNGEL MUÑOZ RUIZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2012

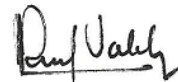
La presente tesis titulada: **“Estimación de variables dasométricas del bosque templado de Hidalgo, México mediante datos espectrales y del Inventario Nacional Forestal”** realizada por: **Miguel Ángel Muñoz Ruiz**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

FORESTAL

CONSEJO PARTICULAR

Consejero:



Dr. José René Valdez Lazalde

Asesor:




Dr. Héctor Manuel de los Santos Posadas

Asesor:



Dr. Gregorio Angeles Pérez

Asesor:



M.C. Alejandro Ismael Monterroso Rivas

Montecillo, Texcoco, Estado de México, agosto de 2012.

AGRADECIMIENTOS

A los millones de mexicanos que pagan impuestos, quienes, a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y el Colegio de Postgraduados, han financiado parte de mi formación;

Al Dr. J. Rene Valdez Lazalde, por su invaluable aportación desde el inicio hasta el final de este trabajo, su consejería durante mi estancia en Colegio de Postgraduados. Por su apoyo y confianza muchas gracias.

Al Dr. Héctor Manuel De los Santos Posadas, por su apreciable apoyo brindado en el análisis estadístico de los datos de campo.

A la Dr. Gregorio Ángeles Pérez, por su asesoría, su disponibilidad y participación en la revisión de este trabajo.

Al Dr. Alejandro I. Monterroso Rivas por su disponibilidad y participación en mi formación profesional así como en la revisión del presente trabajo.

Mi más Sincero Agradecimiento al Colegio de Postgraduados (CP), Campus Montecillo por ser una Institución de Enseñanza e Investigación de excelencia en México.

Dedico esta tesis a:

Mis hijas Renata y Valentina, mis constantes motivos de superación;

Mi esposa Brenda C. por su amor, apoyo incondicional y paciencia en todo este tiempo;

A mi padres Gerardo y Magdalena por su ejemplo de vida y motivación para superarme día a día;

A mis hermanas Mary y Karen por su apoyo, comprensión y motivación durante mi formación académica;

A todos mis amigos de Chapingo y CP, compañeros y familiares que de alguna forma han influido para continuar con mi formación profesional.

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
RESUMEN.	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	2
a. Objetivo general.....	2
b. Objetivos particulares	2
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Variables dasométricas de los bosques.....	3
2.1.1 Cobertura arbórea.....	3
2.1.2 Área basal.....	4
2.1.3 Volumen.....	5
2.2 Los sistemas de información geográfica (SIG)	6
2.3 El espectro electromagnético	7
2.4 La percepción remota y los sensores remotos.....	8
2.5 Sensor remoto SPOT	10
3. METODOLOGÍA	11
3.1 Área de estudio	11
3.2 Datos de campo del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS).....	12
3.2.1 Calculo de área basal, volumen y cobertura arbórea.....	14
3.3 Datos espectrales (SPOT HRG2): Preprocesamiento	15
3.3.1 Corrección geométrica.....	16
3.3.2 Corrección radiométrica y atmosférica de las imágenes SPOT HRG2	17
3.3.3 Mosaico de las imágenes SPOT	20
3.4 Extracción de datos espectrales de las imágenes SPOT.....	20
3.5 Procesamiento conjunto de los datos de campo y espectrales.....	22

3.5.1	Análisis de correlación	22
3.5.2	Regresión Stepwise	22
3.5.3	Determinación de un estimador de razón y regresión para el cálculo del área basal, volumen y cobertura a partir de los datos espectrales	24
3.5.4	Interpolación mediante el método de K-vecino más cercano (K-nn).....	25
3.5.5	Estimación del error	27
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
4.1	Relación entre las variables forestales y los datos espectrales	28
4.2	Modelos de regresión lineal	33
4.3	Estimación de las variables forestales AB, VOL y COB mediante regresión lineal múltiple para los datos espectrales del 2007 y 2009	36
4.4	Estimación de las variables forestales AB, VOL y COB mediante estimadores de razón y regresión para el año 2007 y 2009	42
4.5	Calculo de las variables forestales mediante estimador no paramétrico K vecino más cercano (K-nn)	46
4.6	Comparación de las estimaciones generadas por regresión lineal, estimadores de razón y regresión y k-nn vs estimaciones mediante un inventario tradicional.....	52
4.7	Estimación de error	57
5.	CONCLUSIONES	59
6.	LITERATURA CITADA.....	61
7.	ANEXOS	70

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características de las imágenes SPOT para los periodos 2007 y 2009.....	16
Cuadro 2. Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables forestales: área basal, volumen y cobertura arbórea, con la reflectancia, índices de vegetación y cocientes simples para bosque templado y bosque mesófilo del 2007.	28
Cuadro 3. Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables forestales: área basal, volumen y cobertura arbórea, con la reflectancia, índices de vegetación y cocientes simples para bosque templado y bosque mesófilo del 2009.	32
Cuadro 4. Modelos de regresión y variables seleccionadas por el procedimiento STEPWISE para la estimación de las variables forestales del bosque templado y bosque mesófilo.	33
Cuadro 5. Coeficientes de los parámetros de ajuste de los modelos de regresión y variables seleccionadas para la estimación de las variables forestales del bosque templado y bosque mesófilo.	34
Cuadro 6. Coeficientes de los parámetros de ajuste de los modelos de la regresión forzada para la estimación de las variables forestales del bosque templado y bosque mesófilo del 2009.	36
Cuadro 7. Estimación promedio por hectárea y total de los parámetros forestales AB, VOL y COB, por grupo de vegetación y mediante la regresión lineal múltiple para el año 2007.	37
Cuadro 8. Estimación promedio por hectárea y total de los variables forestales AB, VOL y COB, por tipo de vegetación y mediante la regresión lineal múltiple para el año 2007.	37
Cuadro 9. Estimación promedio por ha y total de las variables forestales AB, VOL y COB, por grupo de vegetación y mediante la regresión lineal múltiple para el año 2009.....	41

Cuadro 10. Estimación promedio por ha y total de las variables forestales AB, VOL y COB, por tipo de vegetación y mediante la regresión lineal múltiple para el año 2009.....	41
Cuadro 11. Estimación promedio por ha y total de las variables forestales AB, VOL y COB, considerando los estimadores de razón y regresión para el bosque templado y bosque mesófilo del año 2007.....	43
Cuadro 12. Estimación promedio por ha y total de las variables forestales AB, VOL y COB, considerando los estimadores de razón y regresión para los diferentes tipos de vegetación del año 2007.....	43
Cuadro 13. Estimación promedio por ha y total de las variables forestales AB, VOL y COB, considerando los estimadores de razón y regresión basados en el GNDVI para el bosque templado y la banda del IRM para el bosque mesófilo del año 2009.....	44
Cuadro 14. Estimación promedio por ha y total de las variables forestales AB, VOL y COB, considerando los estimadores de razón y regresión para los diferentes tipos de vegetación del año 2009.....	44
Cuadro 15. Estimación promedio por ha y total de las variables forestales AB, VOL y COB, por grupo de vegetación mediante el estimador no paramétrico K vecino más cercano (K-nn) para el 2007.....	46
Cuadro 16. Estimación promedio por ha y total de las variables forestales AB, VOL y COB, por tipo de vegetación y mediante estimador no paramétrico vecino mas cercano K-nn para el 2007.....	50
Cuadro 17. Estimación promedio por ha y total de las variables forestales AB, VOL y COB, por grupo de vegetación mediante el estimador no paramétrico K vecino más cercano (K-nn) para el 2009.....	50
Cuadro 18. Estimación promedio por ha y total de las variables forestales AB, VOL y COB, por tipo de vegetación y mediante estimador no paramétrico vecino mas cercano K-nn para el 2009.....	51
Cuadro 19. Estimación de las variables forestales AB, VOL y COB del 2007 mediante inventario tradicional estratificado para bosque templado e inventario simple al azar para el bosque mesófilo.....	53

Cuadro 20. Comparación del inventario convencional vs los distintos métodos de percepción remota para la estimación total de las variables forestales AB, VOL y COB del 2007..... 54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Espectro electromagnético (NASA, 2012a).....	7
Figura 2. a) Tipos de vegetación presentes en la zona (INEGI, 2002), b) Conglomerados del INFyS (CONAFOR, 2010), y c) Ubicación del área de estudio (bosque templado y bosque mesófilo).	12
Figura 3. Forma de unidad de muestreo (conglomerado) utilizado en los bosques templados (CONAFOR, 2010).	13
Figura 4. Estimación del área basal (AB) en el bosque templado y bosque mesófilo mediante modelos de regresión múltiple para el año 2007.	38
Figura 5. Estimación del volumen (VOL) en el bosque templado y bosque mesófilo mediante modelos de regresión múltiple para el año 2007.	39
Figura 6. Estimación de la cobertura arbórea (COB) en el bosque templado y bosque mesófilo mediante modelos de regresión múltiple para el año 2007.	40
Figura 7. Estimación de variables forestales mediante regresión lineal múltiple para el año 2007 y 2009, a) Área basal (AB) y volumen (VOL), b) porcentaje de cobertura (COB).	42
Figura 8. Estimación de variables forestales estimadores de razón y regresión para el año 2007 y 2009, a) Área basal (AB) y volumen (VOL), b) porcentaje de cobertura arbórea (COB).	45
Figura 9. Estimación del área basal (AB) en el bosque templado y bosque mesófilo mediante estimador no paramétrico K vecino más cercano (K-nn) para el año 2007.	47
Figura 10. Estimación del volumen (VOL) en el bosque templado y bosque mesófilo mediante estimador no paramétrico K vecino más cercano (K-nn) para el año 2007.	48
Figura 11. Estimación de la cobertura arbórea (COB) en el bosque templado y bosque mesófilo mediante estimador no paramétrico K vecino más cercano (K-nn) para el año 2007.	49

Figura 12. Estimación de variables forestales mediante estimador no paramétrico (K-nn) para el año 2007 y 2009, a) Área basal (AB) y volumen (VOL), b) porcentaje de cobertura arbórea (COB).	51
Figura 13. Comparación de las variables forestales estimadas por medio del inventario tradicional y métodos de percepción remota para el año 2007; a) Área basal (m^2) y volumen (m^3), b) Porcentaje de cobertura arbórea.	55
Figura 14. Comportamiento de las medias por tipo de vegetación estimadas a través del inventario convencional, K-nn, regresión lineal y estimadores de razón y regresión.	56

ESTIMACIÓN DE VARIABLES DASOMÉTRICAS EN EL BOSQUE TEMPLADO DE
HIDALGO, MÉXICO MEDIANTE DATOS ESPECTRALES Y DEL INVENTARIO
NACIONAL FORESTAL

Miguel Ángel Muñoz Ruiz, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2012

Los métodos basados en la percepción remota son herramientas importantes para la medición de variables biofísicas del bosque a un costo menor y a una escala espacial y temporal mayor. En este trabajo se analiza la relación existente entre datos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) y datos espectrales provenientes de imágenes de la plataforma SPOT correspondientes al bosque templado y bosque mesófilo de Hidalgo, México. Las estimaciones del área basal (AB), volumen (VOL) y cobertura arbórea (COB) se realizaron mediante cuatro enfoques: 1) Análisis de regresión lineal múltiple, 2) El procedimiento no paramétrico K vecino más cercano (K-nn), 3) Estimadores de razón y regresión, y 4) Inventario forestal tradicional. Las estimaciones totales derivadas de los tres primeros métodos se encuentran dentro del intervalo de confianza del 95 % del inventario forestal tradicional, siendo los estimadores de razón y regresión los más cercanos con $AB= 5,469,636 \text{ m}^2$, $VOL= 30,372,039 \text{ m}^3$ y $COB= 52.06 \%$ para bosque templado y 67.18% para bosque mesófilo. Las estimaciones con el algoritmo K-nn fueron muy similares con un total de $AB= 5,542,808 \text{ m}^2$, $VOL= 29,839,360 \text{ m}^3$ y $COB= 51.42 \%$ y 66.98% para los dos grupos de vegetación considerados. Finalmente, las estimaciones totales de la regresión lineal fueron más conservadoras con $AB= 5,315,590 \text{ m}^2$, $VOL= 29,533,000 \text{ m}^3$ y la $COB = 52.47 \%$ y 66.87% para bosque templado y bosque mesófilo. Los resultados encontrados sugieren que existe una buena correlación entre los datos del INFyS y las bandas espectrales del satélite SPOT; particularmente con la verde, el infrarrojo cercano e infrarrojo medio así como con índices y cocientes basados en estas bandas. Las estimaciones en el bosque mesófilo fueron menos precisas en comparación con el bosque templado.

Palabras clave: percepción remota, inventario forestal, área basal, volumen, cobertura arbórea.

ESTIMATING DASOMETRIC VARIABLES IN THE TEMPERATE FOREST OF HIDALGO, MEXICO USING SPECTRAL AND NATIONAL FOREST INVENTORY DATA

Miguel Ángel Muñoz Ruiz, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2012

Remote sensing based methods are important tools for measuring forest biophysical variables at a lower cost and greater spatial and temporal scales. This research analyzes the relationships between National Forest and Soils Inventory (INFyS) data and spectral data from images of the SPOT platform taken in temperate and cloud forests located in Hidalgo, Mexico. Basal area (BA), wood volume (VOL) and tree cover (COB) estimates were performed using four approaches: 1) Multiple linear regression analysis, 2) The nonparametric procedure known as K nearest neighbor (K-nn), 3) Ratio and regression estimators, and 4) Traditional forest inventory analysis. Total variable estimates from the first three methods are within the 95 % confidence interval of the traditional forest inventory; being the ratio and regression estimators method the one that provides the closest calculations to it with $AB= 5,469,636 \text{ m}^2$, $VOL= 30,372,039 \text{ m}^3$ and $COB= 52.06 \%$ for temperate forest and 67.18% for cloud forest. Estimates through the K-nn algorithm were very similar with a total $AB= 5,542,808 \text{ m}^2$, $VOL= 29,839,360 \text{ m}^3$ and $COB= 51.42 \%$ and 66.98% for both groups of vegetation considered. Finally, total variable estimates through the linear regression analysis method were more conservative with $AB= 5,315,590 \text{ m}^2$, $VOL= 29,533,000 \text{ m}^3$ and $COB= 52.47 \%$ and 66.87% for temperate forest and cloud forest respectively. Found results suggest a good correlation between INFyS and SPOT spectral data, particularly with the green, near infrared and mid-infrared bands, as well as with indices and simple ratios built using these bands. Estimates for the cloud forest were less precise compared with estimates for the temperate forests.

Keywords: remote sensing, forest inventory, basal area, volume, tree cover.

1. INTRODUCCIÓN

En México existe una gran variedad de recursos forestales y biológicos, entre los que destacan las selvas bajas en el trópico seco, las selvas altas en las zonas tropicales más húmedas, así como los bosques templados y de clima frío en las partes altas de las montañas. Estos recursos proporcionan a sus dueños ingresos económicos importantes provenientes de bienes maderables, paralelamente son fuente de bienes no maderables y de una gran cantidad de servicios ecosistémicos como la regulación del ciclo hidrológico, la belleza escénica, la regulación del clima, la conservación de la diversidad y la captura de carbono entre muchos más.

Para manejar los recursos forestales de manera sustentable es necesario entender su dinámica natural mediante el monitoreo espacio-temporal de algunos parámetros o variables biofísicas importantes, entre otros: el área basal, el volumen de madera, la cobertura arbórea y el índice de área foliar; las tres primeras para controlar la densidad y la estructura del bosque, mientras que el índice de área foliar ayuda a entender el flujo de energía y la dinámica de claros en los bosques (Dykstra, 1984; Gallant, 1991; Trotter and Dymond, 1997; Merino y Segura, 2002).

Cuando se planea el uso y aprovechamiento de los recursos mediante un programa de manejo forestal, es de vital importancia conocer las características arriba mencionadas, lo cual se logra mediante la medición del bosque –inventario forestal. Generalmente estos inventarios se realizan a una escala local. Si se requiere extrapolar a una escala regional, los costos del inventario se elevan sustancialmente, lo que hace poco viable su realización.

El mapeo de las variables forestales es fundamental para el manejo forestal (Franco *et al.*, 2001). Con el avance de la tecnología computacional y el desarrollo de aplicaciones de sistemas de información geográfica (SIG) se han generado herramientas y métodos que permiten estimar con precisión aceptable algunas variables biofísicas del bosque a

un costo considerablemente menor, comparado cuando se realiza de la forma tradicional (De Gier, 2003; Lu, 2006; Wijaya *et al.*, 2010).

Los sensores remotos son herramientas de gran utilidad que pueden proporcionar información a una escala grande sobre los recursos forestales, por tal motivo el propósito de este trabajo es analizar la factibilidad del uso de datos espectrales obtenidos mediante percepción remota, particularmente de los sensores montados en la plataforma satelital SPOT, como una opción para estimar parámetros dasométricos del bosque como la cobertura arbórea, el volumen maderable y el área basal, aspectos importantes para apoyar la implementación de una silvicultura sustentable.

1.1 Objetivos

a. Objetivo general

- Estimar variables dasométricas en el bosque templado del estado de Hidalgo, a través de técnicas de percepción remota y sistemas de información geográfica.

b. Objetivos particulares

- Estimar el área basal, el volumen de madera y la cobertura en los bosques templados de Hidalgo, Méx., mediante el uso de datos espectrales provenientes de imágenes de satélite SPOT e información del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS).
- Comparar las estimaciones dasométricas obtenidas mediante la combinación de datos espectrales y de campo con estimaciones obtenidas utilizando únicamente datos del INFyS.

2. MARCO TEÓRICO

La alta demanda actual de productos y servicios provenientes de los bosques hace necesario realizar un manejo forestal sustentable¹ que asegure su conservación y los beneficios que provee a largo plazo. Para ello es necesario evaluar continuamente las condiciones del bosque, esto se puede realizar con la medición de variables biofísicas como el volumen, área basal y cobertura arbórea, entre otras.

2.1 Variables dasométricas de los bosques

2.1.1 Cobertura arbórea

La cobertura arbórea (COB), expresión del índice de área foliar (LAI por sus siglas en inglés) es un importante parámetro estructural para cuantificar las características de intercambio de energía y masa de los ecosistemas terrestres, tales como la fotosíntesis, la respiración, la transpiración, el carbono y el ciclo de nutrientes y la interceptación de la precipitación (Begon *et al.* 1990; Gong *et al.*, 1995; Chen and Cihlar, 1996; Fassnacht *et al.*, 1997; Gobron *et al.*, 1997; White *et al.*, 1997; Chen *et al.*, 1999; Brown *et al.* 2000; Hu *et al.*, 2000; Ruiliang and Gong, 2004). El LAI se define como las unidades de superficie de hoja verde por unidad de superficie de terreno, pudiéndose valorar como total (ambas caras) o proyectada (superficie capaz de interceptar la radiación). La relación entre LAI total y proyectada es de 2.0 para las especies de hoja ancha y oscila entre 2 y 3 para las hojas en forma de acículas, con valores típicos entre 2.4 y 2.6 (Waring *et al.*, 1992). La densidad de copas puede ser definido como el porcentaje de superficie cubierta por la proyección vertical de las coronas de los árboles (Ruiliang and Gong, 2004).

¹El manejo forestal puede ser definido como un conjunto de técnicas encaminadas a la toma de decisiones y elección de las alternativas de manejo que contribuyan al logro de los objetivos empresariales (Leuschner, 1990). Otra definición simple es la que da Stoddard (1987), “establecer, poner en orden y mantener el negocio de un bosque”.

El LAI interviene en las ecuaciones que describen muchos de los procesos físicos y químicos de un dosel vegetal, por lo que su presencia es frecuente en los modelos que simulan masas de vegetación. Sin embargo, es un parámetro difícil de medir. Como medidas directas están las destructivas (cortar árboles y medir la superficie del follaje (Curran *et al.*, 1992) o las medidas usando la caída de hojas (Chason *et al.*, 1991; Fassnacht *et al.*, 1994). Si bien las mediciones en campo son las más precisas para estimar esta variable, también son las más costosas en tiempo, por lo que un buen esfuerzo científico se ha enfocado a la búsqueda en métodos más eficientes apoyados en la percepción remota que aprovechen las propiedades de absorción y reflectancia de las hojas para estimar COB y LAI.

2.1.2 Área basal

El Área basal es una medida directa de la densidad del rodal en la cual se consideran el número de individuos así como su tamaño, además de ser de las variables más utilizadas para modelar el efecto de la densidad en el crecimiento del arbolado tanto a nivel poblacional como individual (Torres y Magaña, 2001).

De acuerdo a Prodan *et al.* (1997), el área basal (AB) es una dimensión empleada para caracterizar el estado de desarrollo de un árbol. Se define como el área de la sección transversal del fuste a 1.30 m de altura sobre el suelo. Por su forma irregular nunca se mide en forma directa, sino que se deriva de la medición del diámetro o perímetro del fuste a la altura indicada. Se obtiene a través de las expresiones:

$$AB = \frac{\pi}{40000} \times D_n^2$$
$$AB = \frac{c^2}{4\pi} = \frac{c \times D_n}{4}$$

Donde:

D_n = diámetro en cm;

c = circunferencia en cm, y

$AB = \text{Área Basal, cm}^2 \text{ o m}^2.$

2.1.3 Volumen

La medición del volumen de los árboles de manera directa mediante la cubicación de secciones es complicado, por tal motivo se generan expresiones matemáticas que basadas en una muestra objetivamente seleccionada y cuidadosamente medida, permiten estimar de forma indirecta el volumen de los árboles sobre la base de mediciones simples. Su estimación es importante dado que puede usarse como una medida cuantitativa de la capacidad productividad del sitio.

El manual de la FAO sobre inventarios forestales (1981) citado en Prodan *et al.* (1997) presenta diversas definiciones sobre tipos de volúmenes, entre otras las siguientes.

Volumen bruto: Es el volumen de una parte específica de un árbol, sin corteza y sin deducción por defectos; cuando se usa, el término debe calificarse por una palabra o declaración especificando la porción del árbol a la que se refiere. Por ejemplo volumen bruto total del árbol.

Volumen neto: Volumen de una parte específica de un árbol sin corteza, hechas las deducciones por defectos o partes no útiles; este término también se califica de acuerdo con la porción del árbol a la que se refiere.

Volumen total: Volumen correspondiente al fuste principal de un árbol; para los arboles de forma deliquescente, hasta el punto de inicio de la copa; para los arboles de forma excurrente hasta la punta del árbol.

En la presente investigación la definición de volumen que se utilizó para los cálculos realizados fue la del volumen total, es decir el volumen correspondiente al fuste principal del árbol.

En general el contenido volumétrico del fuste se considera una función de las variables diámetro a la altura del pecho D , altura total o altura del fuste hasta su bifurcación H y alguna expresión de la forma, f .

$$v = f(D, H, f - \text{función})$$

La tabla de volumen se ha utilizado frecuentemente para referirse a un modelo matemático para predecir el volumen fustal, actualmente se utilizan funciones o ecuaciones de volumen.

2.2 Los sistemas de información geográfica (SIG)

En la actualidad los sistemas de información geográfica son una herramienta útil que facilita la toma de decisiones asociada al manejo de los recursos naturales así como para la modelación y estimación de riesgos por fenómenos naturales. Un SIG puede ser definido como un sistema con capacidades específicas para manejar, representar, analizar y modelar espacialmente información geográfica, y datos que aunque no tengan naturaleza espacial están de algún modo asociados a elementos geográficos (Zeiler, 1999; Eastman, 2001). Para realizar estas funciones, la entrada de datos dentro de un SIG debe incluir información explícita de la localización espacialmente de una entidad así como sus atributos (Johnston, 1998).

Un SIG proporciona el ambiente adecuado para el almacenamiento de la información espacial, misma que puede ser actualizada o manipulada con un mínimo esfuerzo a través del desarrollo de modelos cartográficos. La mayor parte de los SIG actuales incluyen funciones lógicas de entrada de datos, extracción de información, análisis espacial y presentación de resultados (Johnston *et al.*, 2001; Vienneau, 2001). El SIG está compuesto por cinco componentes principales: hardware, software, datos, personal y métodos o procedimientos (Eastman, 2001).

2.3 El espectro electromagnético

Los métodos de percepción remota detectan energía electromagnética, la cual incluye formas familiares a la luz visible, los rayos X, los rayos ultravioleta, las ondas de televisión y las ondas de radio. La longitud de onda de las diferentes formas de energía electromagnética puede ser medida en unidades que van desde los nanómetros (nm) hasta los metros (Figura 1). Los rangos del espectro electromagnético van desde los rayos cósmicos que son de onda muy corta ($10^{-7} \mu\text{m}$) hasta las ondas muy grandes ($> 10^8 \mu\text{m}$), ondas que son usadas en las transmisiones de la radio y televisión (Johnston, 1998).

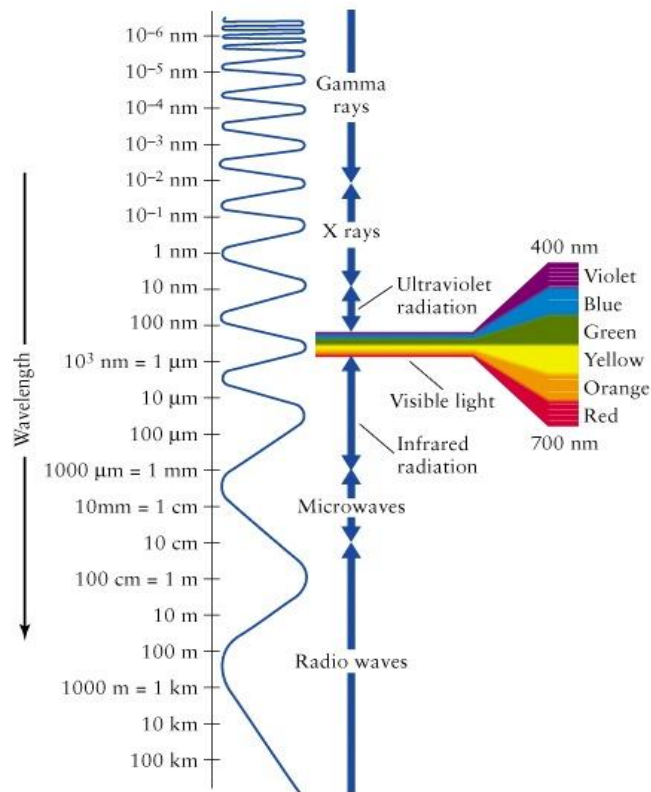


Figura 1. Espectro electromagnético (NASA, 2012a).

El sol es la fuente primaria de radiación electromagnética hacia la tierra, particularmente en el intervalo de la longitud de onda que va de 0.3 a $10 \mu\text{m}$. La radiación incidente que emite el sol y pasa a través de la atmósfera de la tierra interactúa con la superficie terrestre, donde puede ser reflejada, absorbida o

transmitida. La energía (radiación) que se refleja es detectada y registrada por los sensores montados en satélites. Su valor difiere para los distintos materiales que existen sobre la superficie de la tierra y para las diferentes longitudes de onda a que es sensible el sensor. Son estos registros, a nivel pixel, los que conforman la base de datos fundamental para realizar análisis mediante tecnología de percepción remota (Johnston, 1998).

2.4 La percepción remota y los sensores remotos

La percepción remota (PR) es una forma de adquisición de datos que se define como el grupo de técnicas para recolectar información sobre un objeto o área de interés sin estar en contacto físico con el objeto o área (Lillesand and Kiefer, 2001). Stein (1999) define a la PR como la adquisición de datos físicos sin estar en contacto con el objeto y las herramientas principales para la colección son los satélites y aeroplanos, aunque nuevos estudios involucran análisis de imágenes a un nivel más detallado.

La Oficina de las Naciones Unidas para los Asuntos del Espacio Exterior (UNOOSA, 2005) señala que la percepción remota es el censado de la superficie de la tierra desde el espacio haciendo uso de las propiedades de las ondas electromagnéticas emitidas, reflejadas o difractadas por los objetos percibidos, para el propósito de mejorar el manejo de recursos naturales, el uso de la tierra y la protección del ambiente.

En general la PR presenta las ventajas siguientes:

- Tiene una visión en conjunto del objeto de estudio y su entorno, lo que facilita su análisis por grupos multidisciplinarios y la realización de grupos más eficaces.
- Proporciona un registro permanente y exacto de las condiciones al momento de realizar el estudio.
- Facilita la actualización de estudios realizados.
- Es posible hacer mediciones sin salir a campo.

Entre sus limitaciones se encuentran:

- No permite evaluar las características internas de los objetos.
- La observación desde planos superiores dificulta la identificación de los objetos y rasgos.
- Requiere de personal especializado.

Los sistemas de sensores remotos son de dos tipos generales: pasivos y activos. Los dispositivos de los sensores remotos pasivos son los más comunes y usan fuentes de energía natural para detectar características de la tierra. Como ejemplos están las cámaras fotográficas, video cámaras, escáneres multiespectrales y escáneres térmicos. Los sistemas de sensores remotos activos, como los de radar, emiten su propia fuente de energía para iluminar características de interés.

Entre los sistemas de sensores remotos pasivos que en la actualidad tienen una gran relevancia están los satélites que orbitan alrededor de la tierra para la adquisición de imágenes. Las imágenes obtenidas mediante satélite tienen varias ventajas como fuente de datos:

- Una imagen cubre una gran extensión de área.
- Frecuente recurrencia de cobertura de un área alta resolución temporal.
- El análisis de la imagen puede proporcionar información cuantitativa acerca de propiedades ecológicas, las cuales no pueden ser fácilmente derivadas de fotografías aéreas o estudios de campo (Índices de Vegetación del tipo Normalizado).

Una desventaja de un número importante de tipos de imágenes de satélite es su resolución espacial, ya que estas pueden proveer información de comunidades de plantas y condiciones ambientales, pero no para un organismo individual. La nubosidad y los efectos atmosféricos también pueden interferir con las imágenes satelitales porque la energía reflejada debe pasar a través de la atmosfera antes de regresar al

satélite ubicado en el espacio. Además, las imágenes de satélite dependen de la reflectancia espectral, por ello son aplicables solo a condiciones y fenómenos que tienen características espectrales distinguibles (Johnston, 1998).

Normalmente los datos recuperados por los sensores remotos están disponibles a nivel pixel, lo que tiene una correspondencia con un área en el mundo real. Estos valores son obtenidos por la observación de la reflectancia de la radiación solar sobre la superficie de la tierra, por lo tanto el valor registrado tiene la influencia de los tipos de vegetación, presencia de edificios, presencia de agua y la composición geológica de la superficie. Por otra parte, los valores registrados en los pixeles representan la reflectancia en diferentes bandas espectrales, que son sensitivas a diferentes partes del espectro electromagnético (Stein, 1999).

La cobertura vegetal y el uso del suelo existentes sobre un área particular de la tierra se manifiestan en las imágenes mediante atributos como el tono, la textura, patrón, forma, tamaño, sitio y posición geográfica, que son la base y fundamento de la interpretación. La firma espectral, la escala y la fecha de toma de la escena son claves para la identificación de una cobertura, por lo que es importante considerarlas, además de la resolución a la cual se estudia un determinado objeto o área (Richards and Jia, 1999; Lillesand and Kiefer, 2001; Pérez, 2005).

2.5 Sensor remoto SPOT

El sistema SPOT (Système Pour L'Observation de la Terre), está en operación desde 1986, fecha del lanzamiento del primer satélite (SPOT Image, 2008). Los satélites SPOT 1-3 son multiespectrales, cuentan con tres bandas (20 m): verde, rojo e infrarrojo; y una pancromática (10 m). El SPOT 4 posee las mismas tres bandas (verde, rojo e infrarrojo) más una centrada en el infrarrojo de onda corta, además de una lente que puede tomar escenas adyacentes, lo que lo hace muy útil en aplicaciones estereoscópicas. En el 2002 se puso en órbita el satélite SPOT 5, mejorando las

resolución espacial de las bandas multispectrales a 10 m, y la pancromática a 5 m, además de una banda remuestreada a 2.5 m (Eastman, 2001). De este satélite resaltan tres características importantes: alta resolución espacial, amplio tamaño de escenas y posibilidad estereoscópica. Para lograr estos objetivos se le instalaron los sensores de Alta Resolución Geométrica (HRG), Supermodo Pancromático a 2.5 m (THR) y Alta Resolución Estereoscópica (HRS) (Fontannaz, 2002).

Es importante mencionar que las imágenes de los satélites SPOT cubren casi la totalidad del globo terráqueo. Una imagen de este sensor abarca una superficie de 3,600 km², en escenas de 60 km por 60 km, útiles para ser trabajadas a escalas locales o regionales (de 1: 100 000 a 1: 10 000), (SPOT Image, 2008).

3. METODOLOGÍA

3.1 Área de estudio

El área de estudio se circunscribe a la superficie ocupada por el bosque templado que contempla al bosque de encino, bosque de encino-pino, bosque de oyamel, bosque de pino, bosque de pino-encino, bosque de táscate y bosque mesófilo de montaña en el estado de Hidalgo, México, según la descripción de la carta de Uso del Suelo y Vegetación, escala 1: 250 000, Serie III de INEGI (2002), corresponde a una extensión total de 505, 267 ha, que representan el 24.24% del total del territorio estatal (INEGI, 2010a) (Figura 2a, 2c). La zona de estudio se localiza entre las coordenadas 99° 53' 43" y 97° 59' 8" de longitud oeste y 21° 24' 22" y 19° 38' 3" de latitud norte. De acuerdo a la carta climática escala 1: 1 000 000 elaborada por García, E.-CONABIO (1998), los climas predominantes en la zona de estudio son los templados en el 54 %, en el 21 % se encuentra el clima semiárido, en el 18 % el clima semicálido, el clima cálido y semifrío ocupan el 2.6% cada uno y el árido representa el 1.8 %. La temperatura media anual es de 16 °C, la temperatura mínima del mes más frío, enero, es alrededor de 4 °C y la máxima que se presenta en abril y mayo es de 27 °C. Las

lluvias se presentan en verano, en los meses de junio a septiembre, la precipitación media del estado es de 800 mm anuales (García, E.-CONABIO, 1998). La superficie estatal forma parte de las provincias Sierra Madre Oriental, Eje Neovolcánico y Llanura Costera del Golfo Norte. La altura mayor presente en la zona de estudio es de 3350 msnm la cual se encuentra en el cerro la Peñuela (INEGI, 2010b). Las rocas dominantes son las ígneas extrusivas y sedimentarias. Los suelos dominantes son vertisol eútrico (VRe), los leptosoles cálcicos (LPk), regosol calcárico (RGc), feozem háplico (PHh) y cambisol eútrico (CMe), (INIFAP – CONABIO, 1995).

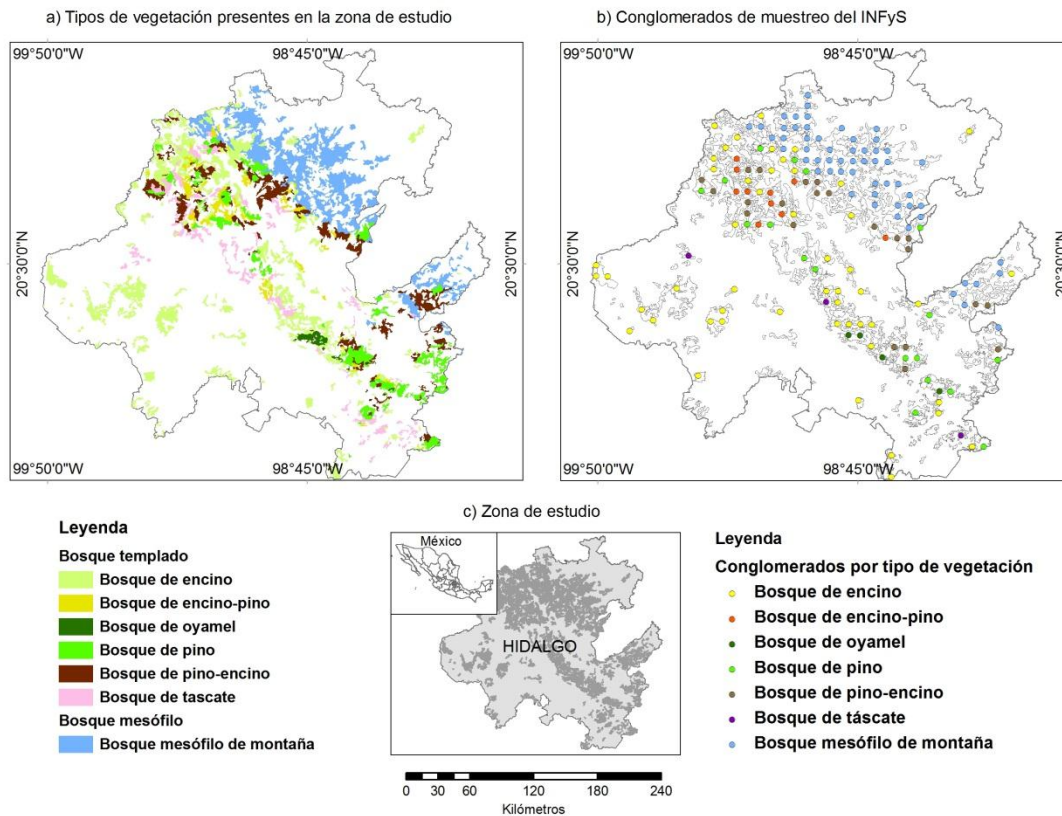


Figura 2. a) Tipos de vegetación presentes en la zona (INEGI, 2002), b) Conglomerados del INFyS (CONAFOR, 2010), y c) Ubicación del área de estudio (bosque templado y bosque mesófilo).

3.2 Datos de campo del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS)

Los datos de referencia para el diámetro normal (Dn), la altura de los arboles (H) y la cobertura arbórea (COB) que se utilizaron para realizar el cálculo de las variables

forestales de interés se obtuvieron del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS), administrado por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2010).

La información recolectada por CONAFOR siguió un diseño de muestreo sistemático y estratificado por conglomerado con un distanciamiento entre conglomerados de 5 × 5 km para los boques templados, selvas altas y medianas, y de 10 × 10 km para selvas bajas, la estratificación se basó en la carta de Uso del Suelo y Vegetación Serie III a escala 1: 250 000 elaborada por el INEGI (CONAFOR, 2010).

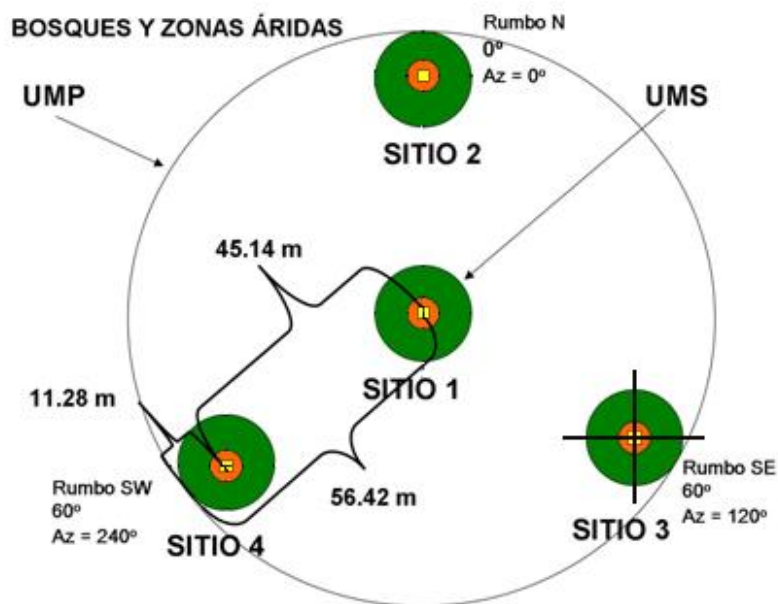


Figura 3. Forma de unidad de muestreo (conglomerado) utilizado en los bosques templados (CONAFOR, 2010).

El INFyS utilizó conglomerados de forma circular referenciando una superficie de 1 ha (Radio 56.42 m), integrado por cuatro unidades de muestreo secundarias o sitios de 400 m² (Radio 11.28 m), ubicados en forma de una "Y" invertida y con una equidistancia del centro a cada uno de 45.14 m (Figura 3). En estos sitios se midieron los árboles con diámetro a la altura del pecho (D_n) mayor a 7.5 cm. Dentro de cada sitio se definieron subsitios de muestreo de 12.56 m² (Radio = 2 m) para registrar renuevo: elementos con $D_n < 7.5$ cm y altura ≥ 25 cm. Se tomaron también subsitios en forma de cuadrado de 1 m² (L = 1 m) para el registro de hierbas, helechos, musgos y

líquenes; finalmente se realizaron transectos de muestreo de 15 m para registrar información de combustibles forestales (CONAFOR, 2010).

El tamaño de la muestra del INFyS en todo el país es de aproximadamente 25,000 conglomerados tomados durante el periodo de 2004 a 2007, para el estado de Hidalgo se reportan 230 conglomerados de los cuales 170 corresponden a bosque templado y bosque mesófilo y el resto a selvas subcaducifolias. Los conglomerados fueron medidos por personal de CONAFOR principalmente en 2007 y una pequeña cantidad en el año 2006.

3.2.1 Cálculo de área basal, volumen y cobertura arbórea

El área basal (AB) para cada árbol fue calculada a partir de las mediciones de diámetro normal (D_n) obtenidas del INFyS de CONAFOR, utilizando la fórmula $AB = \frac{\pi}{40000} \times D_n^2$, donde π : 3.1416, D_n : Diámetro normal en cm y el AB esta dada en m².

En el caso de la estimación de volumen, para facilitar los cálculos debido a la gran cantidad de especies que se reportan en el INFyS, se realizó una agrupación de especies y se utilizaron las ecuaciones propuestas en el Inventario Forestal Estatal del estado de Hidalgo (Dirección General del Inventario Nacional Forestal -DGINF, 1976). Los cuatro grupos y sus ecuaciones se describen a continuación: volumen grupo pino: $vol = e^{[-9.62145860 + 1.86021863 \times \ln(D_n) + 0.96053450 \times \ln(H)]}$; volumen grupo encinos: $vol = e^{[-9.65237643 + 1.86211603 \times \ln(D_n) + 0.99010357 \times \ln(H)]}$; volumen grupo hojosas: $vol = e^{[-9.54274357 + 1.81010631 \times \ln(D_n) + 1.05764337 \times \ln(H)]}$ y volumen grupo otras especies: $vol = e^{[-9.84376850 + 1.93425311 \times \ln(D_n) + 0.96703607 \times \ln(H)]}$; Donde vol : volumen estimado por grupo en m³; e : función exponencial; D_n : Diámetro a la altura del pecho en cm; H : altura total del árbol en m y \ln es la función logaritmo natural. En el Anexo 1 se muestran las especies clasificadas en cada grupo. Los parámetros de ajuste de las ecuaciones se detallan en DGINF (1976).

La cobertura arbórea de cada árbol, en m^2 , fue calculada mediante la fórmula $COB = D_c^2 \times \left(\frac{p_i}{4}\right)$ donde COB : Cobertura arbórea estimada y D_c : diámetro de copa en m.

Los cálculos a nivel individual de las tres variables forestales de interés se sumaron para obtener el volumen, área basal y cobertura de copa para cada sitio de $400 m^2$, posteriormente con los datos por sitio se calculó el promedio de los cuatro sitios para obtener el volumen total, área basal total y cobertura arbórea total por conglomerado, el promedio final fue extrapolado a valores por hectárea multiplicando por 25 y finalmente el porcentaje de cobertura de copa (COB) fue calculado como la relación de la cobertura total por conglomerado y dividiendo entre su superficie ($10,000 m^2$) para posteriormente multiplicar por 100 (Kimothi, *et al.*, 2010).

3.3 Datos espectrales (SPOT HRG2): Preprocesamiento

Se obtuvieron 102 imágenes de los satélites SPOT 2, SPOT 4 y SPOT 5 a través de la Estación de Recepción México de la Constelación SPOT, (ERMEXS), administrada por la Secretaría de Marina. Las imágenes se obtuvieron en dos periodos (2007 y 2009), el primero tratando de considerar las fechas en que se midieron los datos de campo del INFyS y el segundo para una comparación posterior, sin embargo debido a la limitada disponibilidad de imágenes se contempló un periodo más amplio para cada toma de escenas. El primer periodo consideró 53 imágenes que van desde el 17 de octubre del 2006 hasta el 9 de diciembre del 2007, mientras que para el año 2009 se obtuvieron 49 imágenes con fechas del 20 de noviembre del 2008 hasta el 28 de marzo del 2010. Del total de imágenes disponibles se escogieron aquellas que presentaron condiciones adecuadas de nubosidad (menor al 10 %) además se prefirieron imágenes de la plataforma SPOT 5 ya que cuentan con una mayor resolución (10 m) y tienen un nivel de procesamiento 1A es decir no presentan ninguna corrección geométrica, formato útil para el proceso de ortorectificación, en aquellas áreas donde no existió cobertura del satélite SPOT 5 fueron utilizadas imágenes del satélite SPOT 4 (resolución 20 m) y un nivel de procesamiento 2A (corrección geométrica en la proyección cartográfica UTM

WGS84), (SPOT Image, 2009). En el Cuadro 1 se presentan las características de las imágenes seleccionadas para los periodos del 2007 y 2009.

Cuadro 1. Características de las imágenes SPOT para los periodos 2007 y 2009.

Toma	Satélite	Fecha de toma	Nivel de procesamiento	Clave de la imagen
1ra	5	13-Febrero-2007	1A	e55883100702131j1a27002
1ra	4	25-Febrero-2007	2A	e45873090702252mi2a07001
1ra	4	25-Febrero-2007	2A	e45873100702252mi2a02001
1ra	5	28-Febrero-2007	1A	e55883090702282j1a05002
1ra	5	11-Marzo-2007	1A	e55883080704111j1a09002
1ra	5	21-Marzo-2007	1A	e55903110703211j1a09006
1ra	5	21-Abril-2007	1A	e55863080704211j1a04002
1ra	5	15-October-2007	1A	e55883100710152j2a06001
1ra	4	17-October-2007	2A	e45893080710172i1a07002
1ra	5	10-Noviembre-2007	1A	e55893100711102j2a03001
1ra	5	21-Noviembre-2007	1A	e55903090711212j1a04004
1ra	5	21-Noviembre-2007	1A	e55903100711212j1a07002
1ra	5	07-Diciembre-2007	1A	e55893090712072j1a03003
2da	5	10-Enero-2009	1A	e55863100901102j1a03007
2da	5	10-Enero-2009	1A	e55863090901102j1a05005
2da	5	20-Enero-2009	1A	e55883100901202j1a07005
2da	5	25-Febrero-2009	1A	e55863080902252j1a03004
2da	5	03-Marzo-2009	1A	e55903110903032j1a09005
2da	5	28-Marzo-2010	1A	e55893101003282j1a05020
2da	5	08-Noviembre-2009	1A	e55893090911082j1a02027
2da	5	08-Noviembre-2009	1A	e55893080911082j1a00027
2da	5	13-Noviembre-2009	1A	e55903100911131j1a05016
2da	5	13-Noviembre-2009	1A	e55903090911131j1a06017
2da	5	13-Noviembre-2009	1A	e55883090911132j1a08004
2da	5	13-Noviembre-2009	1A	e55883080911132j1a02010

3.3.1 Corrección geométrica

Las imágenes SPOT 5 fueron ortorectificadas utilizando el Modelo de Elevación Digital (DEM) generado por la NASA (2012b), con una resolución espacial de 30 m. En el proceso se utilizó el método de remuestreo de vecino más cercano para mantener

invariantes los valores espectrales de cada escena, el Error Cuadrático Medio (RMS²) se mantuvo por debajo de un pixel (10 m) en todas las escenas. Las imágenes resultantes del proceso de ortorectificación se proyectaron al sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM) zona 14 N, con datum y elipsoide WGS84.

Las imágenes Spot 4 fueron rectificadas geoméricamente a partir de la cartografía vectorial de caminos de INEGI escala 1: 50 000, utilizando la geocodificación polinomial de orden cúbico. Al igual que las imágenes SPOT 5, se utilizó el método de remuestreo de vecino más cercano. En este proceso el RMS se mantuvo por debajo de un pixel (20 m). Las imágenes se proyectaron al sistema UTM 14 N, datum y elipsoide WGS84.

3.3.2 Corrección radiométrica y atmosférica de las imágenes SPOT HRG2

El nivel de procesamiento 1A con el que fueron obtenidas las imágenes SPOT del instrumento HRG2, implica que han sido corregidas las distorsiones radiométricas producto de las variaciones de sensibilidad entre los detectores elementales del instrumento de toma de imágenes (SPOT Image, 2009), sin embargo, aun es necesario llevar a cabo una corrección radiométrica y atmosférica.

Las imágenes SPOT presentan sus metadatos en un formato DIMAP, el cual es un formato público de descripción de datos geográficos de cada escena, en este formato el orden de las bandas es diferente al reportado por SPOT Image (2009), las bandas son: banda 1: IRC (infrarrojo cercano), banda 2: rojo, banda 3: verde y la banda 4: IRM (infrarrojo medio), dadas estas características de las escenas y para evitar confusiones al realizar los cálculos de los Índices de Vegetación de Diferencias Normalizada (NDVI), se procedió al intercambio de bandas quedando la banda 1: verde, banda 2: rojo, banda 3: IRC y banda 4: IRM.

² El RMS es una medida cuantitativa de la precisión de la corrección geométrica que considera los errores en los puntos de control (GCP), se expresa en pixeles, por lo que un RMS menor a 1 significa buen nivel de precisión.

Con las bandas en el orden correcto, y para hacer comparables las escenas de distintas fechas, fue necesario reescalar los valores registrados en las imágenes (comúnmente conocidos como números digitales $-DN$) a reflectancia exoatmosférica adimensional (Ingram *et al.*, 2005; Thenkabail *et al.*, 2004; Soudani *et al.*, 2006).

Previo al cálculo de las reflectancias para cada banda fue necesario realizar la conversión de DN a radiancia (Thenkabail *et al.*, 2004; Soudani *et al.*, 2006; Lu *et al.*, 2008). Este proceso se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$L_{\lambda} = \frac{DN}{A} \quad (1)$$

Donde:

L_{λ} = Radiancia espectral en la apertura del sensor en $\text{watts/m}^2 \times \text{steradian} \times \mu\text{m}$, para cada banda;

DN = Números digitales para cada banda (0 a 255);

A = Ganancia de calibración absoluta en $\text{watts/m}^2 \times \text{steradian} \times \mu\text{m}$ para cada banda, obtenida de los metadatos de la imagen.

Posteriormente se corrigieron los efectos provocados por la atmósfera mediante la combinación de la corrección radiométrica y el método mejorado de sustracción del objeto oscuro (Modelo COST) (Moran *et al.*, 1992; Chavez, 1996; Skirvin, 2000).

El modelo COST de Chavez (1996) es una técnica basada estrictamente en la imagen, en información que se puede obtener fácilmente de los metadatos y la imagen misma. En este proceso se asume que dentro de la imagen satelital existen objetos con un porcentaje de reflectancia cercano a cero (agua limpia y profunda, sombras, vegetación densa, etc.), por lo que los datos registrados por el sensor en estas características de la superficie son resultado de la dispersión atmosférica, la cual debe ser removida. Durante el proceso se calcula la constante L_{haze} mediante la fórmula (3), la cual representa el efecto que tiene la atmosfera sobre la energía captada por el sensor y es eliminada al restar los valores a la calibración radiométrica en la fórmula (2). La determinación de la constante L_{haze} fue realizada mediante el algoritmo implementado

en Excel por Skirvin (2000) "Landsat 5 Atmospheric and Radiometric Correction", mismo que fue adaptado para las imágenes SPOT, además en el proceso son corregidos también los efectos causados por el ángulo cenital solar y la irradiación solar.

Para realizar la conversión de radiancia a reflectancia exoatmosférica y la corrección por medio del modelo COST (Moran *et al.*, 1992; Chavez, 1996; Skirvin, 2000), se utilizaron las formulas siguientes, las cuales fueron programadas en el Modulo Model Maker de Erdas Imagine 2011 (Erdas Inc., 2011):

$$\rho = \frac{\pi \times d^2 \times (L_{\lambda} - L_{haze})}{ESUN_{\lambda} \times \cos^2 \theta}; \quad (2)$$

$$L_{haze} = L_{\lambda min} - L_{\lambda, 1\%}; \quad (3)$$

$$L_{\lambda min} = \frac{Lm + DNmin \times (Lmax - Lm)}{255}; \quad (4)$$

$$L_{\lambda, 1\%} = \frac{0.001 \times ESUN_{\lambda} \times \cos^2 \theta}{d^2 \times \pi}; \quad (5)$$

Donde:

ρ = Reflectancia exoatmosférica adimensional;

L_{haze} = Radiancia resultado de la interacción de la radiación con los componentes de la atmosfera;

$ESUN_{\lambda}$ = Irradiancia solar espectral al tope de la atmosfera;

d^2 = Distancia tierra-sol en unidades astronómicas (Administración de Parques Nacionales - Sistema de Información de Biodiversidad, 2005), d se calcula como:

$$d = 1 + 0.0167 \times \cos^2 \times \left[\left(\frac{2\pi}{365} \right) (jd - 3) \right];$$

jd = día juliano;

θ = Angulo cenital solar en radianes, θ se calcula como:

$$\theta = (90 - \theta_e) \frac{\pi}{180};$$

θ_e = Angulo de elevación solar;

$L_{\lambda min}$ = Radiancia mínima espectral para cada banda;

L_m = La radiancia del valor mínimo posible de cada banda, para las imágenes SPOT HRG este valor es igual a 0;

DN_{min} = Número digital mínimo de cada banda y

L_{max} = La radiancia del valor máximo posible de la imagen en este caso se calcula como:

$$L_{max} = \frac{255}{A}$$

3.3.3 Mosaico de las imágenes SPOT

Una vez realizado el proceso de ortorectificación, de convertir las imágenes a reflectancia exoatmosférica y aplicar el procedimiento de corrección atmosférica, se generó un mosaico para cada uno de los periodos con el objeto de obtener una única imagen y facilitar con ello su manipulación para la extracción de las firmas espectrales y la generación de los Índices de Vegetación (NDVI) y los Cocientes Simples (CS). Para la extracción de los datos espectrales de la imagen se consideró a las zonas identificadas como bosque templado y bosque mesófilo de acuerdo al mapa de Uso de Suelo y Vegetación Serie III de INEGI (2002).

3.4 Extracción de datos espectrales de las imágenes SPOT

Con las imágenes SPOT corregidas atmosféricamente y transformados los números digitales a reflectancia exoatmosférica adimensional, se efectuaron transformaciones matemáticas basadas en índices de vegetación y cocientes simples para realzar rasgos de interés, esto funciona porque determinadas características son más sensibles en alguna parte del espectro electromagnético y pueden ser detectadas mejor en bandas específicas (Cohen and Goward, 2004). Los datos espectrales que se tomaron como variables fueron las 4 bandas de las imágenes SPOT, el verde (V), rojo (R), infrarrojo cercano (IRC) e infrarrojo medio (IRM), además de 12 transformaciones matemáticas

aplicadas a la reflectancia: (1) índice de vegetación de diferencias normalizado (*NDVI23*), calculado como $NDVI23 = \frac{(IRC - R)}{(IRC + R)}$, (Rouse, *et al.* 1973; Aguirre-Salado *et al.*, 2009; Poulain *et al.*, 2010; Wijaya *et al.*, 2010); (2) cociente simple (*IRC/R*), calculado como $IRC/R = \frac{IRC}{R}$, (Rouse, *et al.* 1973; Poulain *et al.*, 2010; Wijaya *et al.*, 2010); (3) índice de vegetación de diferencias normalizado del verde (*GNDVI*), calculado como $GNDVI = \frac{(IRC - V)}{(IRC + V)}$, (Poulain *et al.*, 2010); (4) (*NDVI41*), calculado como $NDVI41 = \frac{(IRM - V)}{(IRM + V)}$, (Aguirre-Salado *et al.*, 2009); (5) (*NDVI42*), calculado como $NDVI42 = \frac{(IRM - Rojo)}{(IRM + Rojo)}$, (Lu, *et al.* 2004; Aguirre-Salado *et al.*, 2009; Wijaya *et al.*, 2010); (6) índice de estrés hídrico (*NDVI43*), calculado como $NDVI43 = \frac{(IRM - IRC)}{(IRM + IRC)}$, (Lu, *et al.*, 2004; Aguirre-Salado *et al.*, 2009; Wijaya *et al.*, 2010); (7) (*TNDVI*), calculado como $TNDVI = \sqrt{\frac{IRC - R}{IRC + R} + 0.5}$, (Erdas Inc., 2011); (8) (*NDVI21*), calculado como $NDVI21 = \frac{(R - V)}{(R + V)}$, (Lu, *et al.*, 2004; Wijaya *et al.*, 2010); (9) cociente simple (*IRM/R*), calculado como $IRM/R = \frac{IRM}{R}$, (Lu, *et al.*, 2004; Wijaya *et al.*, 2010); (10) cociente simple (*IRM/IRC*), calculado como $IRM/IRC = \frac{IRM}{IRC}$, (Lu, *et al.*, 2004; Wijaya *et al.*, 2010); (11) Índice de vegetación (*IV*), calculado como $IV = IRC - R$, (Erdas Inc., 2011) y (12) (*IRC/R SQ*), calculado como $IRC/R SQ = \sqrt{IRC/R}$, (Erdas Inc., 2011).

Los datos espectrales provenientes de las bandas de la imagen, índices de vegetación y cocientes simples, fueron extraídos de cuatro maneras: (1) el valor del pixel en el centro de cada conglomerado de 1 ha, (2) El valor del pixel central de cada sitio de 400 m², (3) El valor promedio de los pixeles dentro de cada sitio de 400 m² del conglomerado, y (4) el valor promedio de las reflectancias de los pixeles localizados dentro de la máscara de 1 ha de cada conglomerado. Después de los análisis de correlación se decidió reportar los datos extraídos del promedio de los pixeles de una máscara de 1 ha, ya que estos valores espectrales son los que presentan menor variabilidad y mejor ajuste con los datos de campo.

3.5 Procesamiento conjunto de los datos de campo y espectrales

Los análisis implementados considerando la información de campo y las firmas espectrales correspondientes (referenciadas a la misma área) obtenidas de las imágenes de satélite, se hicieron en forma separada para dos grupos de especies. En una primer agrupación que se denominó bosque templado, se consideró al bosque de encino, bosque de encino-pino, bosque de pino, bosque de pino-encino, bosque de oyamel y bosque de táscate. En el segundo grupo se analizó al bosque mesófilo de montaña. Esta separación se realizó debido a la fuerte variabilidad presente en el bosque mesófilo, lo que se reflejó en las bajas correlaciones entre datos de campo y datos espectrales al manejarlos de forma conjunta con los demás tipos de vegetación.

3.5.1 Análisis de correlación

Para conocer el grado de relación y el comportamiento de la respuesta espectral captada en los píxeles de cada banda de las imágenes, los índices de vegetación y los cocientes simples con los parámetros forestales de interés (volumen, área basal y cobertura arbórea), se realizó un análisis de correlación de Pearson para los dos grupos que se contemplaron: bosque templado y bosque mesófilo.

3.5.2 Regresión Stepwise

Mediante el procedimiento de regresión conocido como “Stepwise” se definió un modelo de regresión lineal múltiple para la estimación de los parámetros forestales de interés: área basal (m^2ha^{-1}), volumen (m^3ha^{-1}), y cobertura arbórea (m^2ha^{-1}). El modelo que se utilizó es de la forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1X_1 + \beta_2X_2 + \dots + \beta_kX_k + \varepsilon;$$

Donde:

y = Parámetro forestal a estimar;

X_k : Bandas espectrales, índices de vegetación, cocientes simples y

β_k : Coeficientes de regresión.

El coeficiente de determinación (r^2) se utilizó como un indicador de ajuste, se tomó un valor de probabilidad menor al 0.05 para cada variable y fue calculado con la fórmula siguiente:

$$r^2 = \frac{SCR}{SCT} = 1 - \frac{SCE}{SCT};$$

Donde:

SCR = Suma de cuadrados de regresión;

SCE = Suma de cuadrados del error y

SCT = Suma de cuadrados corregidos por la media.

Para todos los parámetros se estimaron límites de confianza al 95% mediante la fórmula propuesta por Neter *et al.* (1996):

$$IC = Y'_i \pm t_{n-(k+1)(1-\frac{\alpha}{2})} S'_R \sqrt{1 + h_{ii}};$$

Donde:

IC = Intervalo de confianza;

Y'_i = Valor predicho;

t = Valor de t de student con $n - (k+1)$ grados de libertad y un nivel de significancia $(1 - \frac{\alpha}{2})$;

S'_R = Cuadrado Medio del Error y

$h_{ii} = \vec{x}_i^t (X^t X)^{-1} \vec{X}_i \Rightarrow$ Varianza del valor estimado de Y'_i .

3.5.3 Determinación de un estimador de razón y regresión para el cálculo del área basal, volumen y cobertura a partir de los datos espectrales

Los estimadores de razón y regresión son utilizados para estimar una variable de interés, normalmente difícil de medir, a través de una función que depende de otra variable de fácil medición. En el presente trabajo, para estimar las variables área basal (AB), volumen (VOL) y porcentaje promedio de la cobertura de copa (COB), se utilizó la relación entre estas variables y los datos espectrales provenientes de la imagen para el bosque templado y bosque mesófilo. Los estimadores de razón y regresión permiten construir intervalos de confianza de menor amplitud que los obtenidos con una muestra aleatoria. Los estimadores de razón utilizan a \hat{R} como un valor estimado de la proporción entre la variable auxiliar (datos espectrales) y las variables dasométricas (área basal, volumen y cobertura), (Valdez-Lazalde *et al.*, 2006), se expresa como:

$$\hat{R} = \frac{\sum_{i=1}^n VD}{\sum_{i=1}^n VE}$$

Donde:

VD = Variable dasométrica de interés medida en campo en la i -ésima unidad muestral y

VE = Variable espectral con alta correlación con la variable dasométrica en la i -ésima unidad muestral.

La estimación de la media poblacional del estimador de razón se expresa como:

$$\overline{VD}_{\hat{R}} = \hat{R} \times \bar{X}$$

Siendo \bar{X} la media poblacional de la variable espectral que se calculó mediante la ecuación:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N VE$$

Por otro lado para el estimador de regresión, la estimación de las variables dasométricas promedio es:

$$\overline{VD}_r = \overline{VD} + b \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n VE - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N VE \right|$$

Donde:

b = tasa de cambio de la variable dasométrica respecto a la variable espectral de alta correlación (VE) y

\overline{VD} = promedio de la variable dasométrica medida en campo.

3.5.4 Interpolación mediante el método de K-vecino más cercano (K-nn)

El método conocido como K-nn es una técnica de interpolación no paramétrica que permite estimar valores de variables forestales simultáneamente mediante el cálculo de un promedio ponderado de K mediciones obtenidas en parcelas de muestreo en campo (Franco *et al.*, 2001). Los pesos (ponderaciones) se asignan de acuerdo a la distancia en el espacio espectral, definido por las bandas de la imagen de satélite, entre el valor registrado para el pixel bajo clasificación (al que se le asignará valor) y las parcelas de muestreo de campo. El proceso de clasificación y estimación reproduce la estructura de la covarianza de los datos observados y retiene la gama completa de la variabilidad inherente en la muestra (Haapanen *et al.*, 2002). K-nn se considera un algoritmo simple pero muy poderoso que permite extender un rango amplio de datos de campo a paisajes completos. Este método fue primero aplicado al inventario forestal de Finlandia a finales de los 1980s y desde 1990 ha sido utilizado operacionalmente en el inventario nacional forestal finlandés (Haapanen *et al.*, 2002).

Adicionalmente, K-nn puede producir estimaciones muy locales pero con una precisión mejorada. Mediante el algoritmo K-nn la información contenida en las parcelas de muestreo es propagada en toda la población bajo el supuesto de que existen condiciones forestales similares en la imagen de satélite y la respuesta espectral-

radiométrica-temporal medida en los pixeles es dependiente de las condiciones forestales (Haapanen, 2001).

La fórmula que implementa el K-nn es:

$$Y'_i = \frac{\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{d^2}\right) Y_i}{\sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{d^2}\right)} ;$$

Donde:

Y' = Promedio ponderado inversamente al cuadrado de la distancia espectral de los k vecinos más cercanos;

d = distancia euclidiana espectral y

Y_i = observaciones a ser promediadas (datos correspondientes a las parcelas medidas en campo).

En el cálculo de las distancias euclidianas se utilizaron las variables espectrales significativas que arrojó el método de regresión Stepwise. La selección del número óptimo de vecinos más cercanos (k-óptimo) se realizó heurísticamente con base en el valor de la raíz del cuadrado medio del error (RECM) obtenido mediante la validación con los datos de campo, comparando y calculando el RECM de los valores observados de los datos de campo y los valores estimados mediante el algoritmo. El algoritmo K-nn se implementó para $k = 4$ y $k = 10$ (Franco *et al.*, 2001). Con los modelos de regresión generados e identificado el óptimo número de vecinos más cercanos (k-óptimo) para las variables forestales, se procedió al cálculo de éstas para toda la imagen.

En el caso de la regresión, los modelos obtenidos para AB, VOL y COB fueron programados en el modulo Model Maker de ERDAS IMAGINE 2011 (Erdas Inc., 2011), (Anexo 2). En el paquete estadístico SAS 9.1 (Institute Inc. 2004) se adaptó el algoritmo K-nn programado por Aguirre-Salado *et al.* (2009) utilizando los modelos de la regresión lineal para cada variable. Finalmente se procedió al cálculo del valor de las variables dasométricas (AB en m^2ha^{-1} , VOL en m^3ha^{-1} y para la COB en %) para cada pixel de la imagen del bosque templado y bosque mesófilo.

3.5.5 Estimación del error

Inicialmente, las estimaciones totales de las variables forestales obtenidas mediante el modelo de regresión lineal y el algoritmo K-nn para el bosque templado y el bosque mesófilo fueron comparadas con las estimaciones totales y sus intervalos de confianza obtenidos para las mismas variables mediante el procesamiento de los datos del INFyS.

Un segundo proceso de análisis se llevó a cabo para conocer la magnitud que guardan los errores individuales entre las estimaciones de la regresión lineal y K-nn con las estimaciones observadas de campo de AB, VOL y COB para cada conglomerado. Este procedimiento se hizo mediante la extracción de los valores por conglomerado de las estimaciones de la regresión lineal y K-nn y comparando posteriormente con las estimaciones generadas a partir de los datos del INFyS.

La fórmula siguiente se utilizó para el análisis del error:

$$\text{RECM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$$

Donde:

RECM = Raíz del error cuadrático medio;

\hat{y} = Valor estimado mediante regresión o K-nn;

y = Valor observado (obtenido mediante el procesamiento de los datos de campo del INFyS) y

n = Número de observaciones.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Relación entre las variables forestales y los datos espectrales

Las variables forestales: área basal (AB), volumen (VOL) y cobertura arbórea (COB), para el grupo de vegetación bosque templado presentan correlaciones negativas con las datos espectrales del 2007 (Cuadro 2), provenientes de las bandas del verde, rojo e infrarrojo medio y un valor muy bajo de correlación con la banda del infrarrojo cercano. Correlaciones negativas entre área basal y la respuesta espectral de las bandas del rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo medio se han encontrado en estudios con imágenes Landsat TM (Jensen *et al.*, 1999; Steininger, 2000) y SPOT 5 (Castillo-Santiago *et al.*, 2010); para el caso de los índices de vegetación las correlaciones negativas están situadas en el NDVI43 y el NDVI21, mientras que para los cocientes simples la correlación negativa se encuentra en IRM/IRC.

Cuadro 2. Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables forestales: área basal, volumen y cobertura arbórea, con la reflectancia, índices de vegetación y cocientes simples para bosque templado y bosque mesófilo del 2007.

Variables espectrales	Bosque templado			Bosque mesófilo		
	AB	VOL	COB	AB	VOL	COB
Verde	-0.43	-0.47	-0.31	-0.46	-0.44	0.08
Rojo	-0.39	-0.44	-0.30	-0.45	-0.43	0.04
IRC	0.03	0.03	0.15	-0.36	-0.33	-0.17
IRM	-0.37	-0.43	-0.24	-0.47	-0.45	-0.26
NDVI23	0.46	0.52	0.40	0.07	0.07	-0.08
IRC/R	0.40	0.47	0.38	0.12	0.12	0.01
GNDVI	0.50	0.55	0.42	0.00	0.00	-0.19
NDVI41	0.12	0.07	0.15	-0.38	-0.39	-0.46
NDVI42	0.21	0.22	0.25	-0.26	-0.26	-0.33
NDVI43	-0.50	-0.58	-0.40	-0.32	-0.33	-0.26
TNDVI	0.36	0.41	0.37	-0.26	-0.24	-0.17
NDVI21	-0.17	-0.25	-0.21	-0.17	-0.19	-0.24
IRM/R	0.21	0.22	0.24	-0.23	-0.22	-0.28
IRM/IRC	-0.50	-0.58	-0.40	-0.31	-0.32	-0.26
IV	0.23	0.26	0.30	-0.32	-0.30	-0.21
IRC/RED SQ	0.43	0.50	0.39	0.10	0.11	-0.01

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas.

El índice de estrés hídrico NDVI43 y el cociente simple IRM/IRC presentan los valores negativos más altos de correlación para las tres variables forestales (AB= -0.50, VOL= -0.58 y COB= -0.40) en el bosque templado. Una tendencia similar con el NDVI43 se encontró por Aguirre-Salado *et al.* (2009), quienes hallaron correlaciones de -0.81 y -0.77 para AB y VOL respectivamente. La correlación negativa (inversa) para los dos parámetros espectrales puede ser explicada por la disminución del albedo en las zonas con vegetación densa y cerrada, en este caso el bosque de coníferas tiende a absorber más energía de la que pudiera reflejar. La banda del Infrarrojo medio (IRM) es comúnmente conocida como “banda de absorción de agua” debido a que el agua presente en las hojas absorbe la radiación de estas longitudes de onda (Lillesand and Kiefer, 2001; Ingram *et al.*, 2005), es decir que la densidad de dosel en estos parámetros espectrales es inversamente proporcional al estrés hídrico, así entre más se acerque el valor a -1, existirá una mayor cantidad de humedad presente en la vegetación (Rock *et al.*, 1986; Gong *et al.*, 2003; Speranza y Zerda, 2005; Aguirre-Salado *et al.*, 2009).

Por otro lado Steininger (2000) encontró que las bandas del infrarrojo medio de las imágenes Landsat TM, fueron las más útiles para la estimación de edad y biomasa en los bosques del Amazonas. Otros estudios han encontrado que la respuesta en la banda del infrarrojo medio decrece con el incremento del cierre del dosel, mientras que en sitios abiertos aumenta debido al bajo contenido de agua en la vegetación y el suelo desnudo (Nemani *et al.*, 1993).

Contrario a lo expresado en el párrafo anterior, el índice de vegetación de diferencias normalizado del verde (GNDVI), presentó valores altos directamente correlacionados con los datos de las variables forestales en bosque templado, 0.50 para AB, 0.55 para VOL y 0.42 para COB, valores cercanos a la correlación de 0.5 son reportados en Poulain *et al.* (2010) en su trabajo sobre estimación de parámetros forestales con el uso de sensores remotos de la plataforma ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) en *Nothofagus pumilio* en Chile. En acuerdo con lo reportado por Heiskanen (2006) y Aguirre-Salado *et al.* (2009), el NDVI23 fue la

segunda variable espectral con valores de correlación positivos altos con 0.46 para AB, 0.52 para VOL y 0.40 para COB. Estas correlaciones positivas son congruentes con la reflectividad provocada por la clorofila, la cual es más notoria en los bosques más densos, esto significa que existe una mayor reflectividad calculada por medio del NDVI23 en aquellos bosques con una densidad más alta.

Resultados encontrados por Aguirre-Salado *et al.* (2009) para bosques manejados de *P. patula*, muestran que los índices de vegetación que presentan los mayores coeficientes de correlación son aquellos que utilizan las bandas del rojo e infrarrojo cercano, debido a que en estas bandas pueden ser captados aspectos estructurales de las células y su condición de humedad (Harris, 1987). Pinedo (2008) en su investigación sobre modelación de atributos de bosques templados con imágenes Landsat TM y SPOT-HRV encontró que la banda 4 de Landsat y 3 de SPOT (bandas del infrarrojo cercano) tienen una buena relación con las ecuaciones para la predicción de volumen para la zona de Guadalupe y Calvo, Chihuahua, México.

Un patrón distinto se encontró en el bosque mesófilo de montaña (Cuadro 2). La mayoría de las correlaciones observadas entre los datos espectrales y los datos de AB, VOL y COB resultaron negativas. Las bandas sin transformación matemática contienen los coeficientes de correlación más altos; entre ellas la banda del IRM presenta la mayor correlación para AB y VOL (-0.47 y -0.45 respectivamente), aunque baja para la COB (-0.26). Ingram *et al.* (2005) en su investigación sobre mapeo de estructura forestal en el bosque tropical de Madagascar encontró que las bandas que mejor se correlacionan con el área basal en este tipo de vegetación son las del Infrarrojo Medio (Banda 5 y 7) de las imágenes Landsat TM y ETM+ con valores de correlación de -0.77 y -0.76 respectivamente para cada banda.

La banda del verde se encuentra en el segundo lugar con una buena correlación con AB y VOL (-0.46 y -0.44), aunque para la COB fue muy baja (0.08). En tercer lugar se encuentra la banda del Rojo con buena correlación para AB y VOL (-0.45 y -0.43 respectivamente) y al igual que en el Verde la COB presenta una correlación muy baja

(0.04). En el caso de los parámetros espectrales con transformación matemática el NDVI41 presentó los valores más altos de correlación con -0.38, -0.39 y -0.46 para AB, VOL y COB respectivamente. En los cocientes simples el IRM/IRC mostró los mejores valores de correlación con -0.31, -0.32 y -0.26 para AB, VOL y COB.

En general, para el bosque templado, los índices de vegetación presentan las correlaciones más altas con las variables forestales bajo estudio que los cocientes simples y las bandas sin transformaciones matemáticas, en contraste, en el bosque mesófilo las correlaciones más altas se muestran en las bandas de las imágenes sin transformación matemática.

El patrón de correlación de los parámetros espectrales del 2009 para el bosque templado es similar al manifestado en los datos del 2007, su principal diferencia se presenta en la disminución de los valores de correlación. La mayor correlación se nota en la banda del IRM con coeficientes de -0.40, -0.47 y -0.25 para AB, VOL y COB respectivamente (Cuadro 3).

En cuanto a los índices de vegetación, el NDVI43 presenta los más altos coeficientes de correlación (AB= -0.32, VOL= -0.39 y COB= -0.33), en los cocientes simples el IRM/IRC contiene los valores más altos con -0.33, -0.38 y -0.34 para AB, VOL y COB respectivamente, aunque los valores son menores que en 2007 la tendencia se sigue manteniendo, es decir que en cuanto a las bandas con transformación matemática, el NDVI43 y el Cociente simple IRM/IRC son los parámetros que mejor explican la relación negativa entre la información espectral y los datos de campo del bosque templado.

En el caso de los datos del 2009 para el bosque mesófilo, la tendencia de las correlaciones es distinta a la ocurrida en los datos del 2007, en general existe una reducción en la correlación en todos los parámetros espectrales como también se manifestó en el bosque templado. La banda del IRC presenta los valores más altos de correlación (-0.39, -0.38 y -0.33 para AB, VOL y COB), seguido por el TNDVI (-0.38, -

0.39 y -0.35) el IRM (-0.37, -0.31 y -0.33) y finalmente el IV (-0.35, -0.35 y -0.31), esto expone una diferencia con los datos del 2007 en donde las mejores correlaciones se expresan en las cuatro bandas originales de las imágenes siendo el IRM la que presenta la mayor correlación (Cuadro 3).

Cuadro 3. Coeficientes de correlación de Pearson entre las variables forestales: área basal, volumen y cobertura arbórea, con la reflectancia, índices de vegetación y cocientes simples para bosque templado y bosque mesófilo del 2009.

Variables espectrales	Bosque templado			Bosque mesófilo		
	AB	VOL	COB	AB	VOL	COB
Verde	-0.37	-0.40	-0.34	-0.29	-0.26	-0.18
Rojo	-0.32	-0.35	-0.33	-0.22	-0.18	-0.13
IRC	-0.21	-0.25	0.01	-0.39	-0.38	-0.33
IRM	-0.40	-0.47	-0.25	-0.37	-0.31	-0.33
NDVI23	0.23	0.25	0.36	-0.20	-0.24	-0.23
IRC/R	0.19	0.22	0.35	-0.16	-0.19	-0.19
GNDVI	0.27	0.28	0.38	-0.23	-0.25	-0.26
NDVI41	0.01	-0.06	0.24	-0.13	-0.10	-0.28
NDVI42	0.03	0.00	0.30	-0.14	-0.13	-0.28
NDVI43	-0.32	-0.39	-0.33	0.17	0.23	0.09
TNDVI	0.05	0.03	0.24	-0.38	-0.39	-0.35
NDVI21	-0.03	-0.08	-0.19	0.06	0.13	0.07
IRM/R	0.08	0.06	0.33	-0.15	-0.14	-0.26
IRM/IRC	-0.33	-0.38	-0.34	0.19	0.25	0.11
IV	-0.08	-0.11	0.14	-0.35	-0.35	-0.31
IRC/RED SQ	0.21	0.23	0.36	-0.17	-0.20	-0.20

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas.

Una posible fuente de error inherente al análisis, es la diferencia que existe en las fechas en que fueron tomadas las escenas para los datos del 2007 (13 de febrero al 7 de diciembre) y 2009 (10 de enero del 2009 al 28 de marzo del 2010), esto debido a su falta de disponibilidad para la zona de estudio. De esta forma la reflectancia espectral y la estructura del bosque puede cambiar dentro de este periodo de tiempo, afectando de manera negativa la correlación entre los datos de campo y las variables espectrales (Scheuber, 2010).

4.2 Modelos de regresión lineal

Mediante el procedimiento de regresión Stepwise se eligieron las variables espectrales que mejor predicen a las variables forestales de interés para los años 2007 y 2009 en el bosque templado y bosque mesófilo (Cuadro 4). Para la variable forestal AB de 2007 del bosque templado, el procedimiento seleccionó la banda del VERDE, el NDVI21 y el cociente simple IRM/IRC. La selección de las variables coincide con los coeficientes de correlación negativos más altos en el caso del cociente simple IRM/IRC y la banda del VERDE, aunque en el caso del NDVI21 su coeficiente es bajo. La correlación negativa significa que los datos espectrales son inversamente proporcionales a los datos de las variables forestales; para la COB del bosque templado se seleccionó al GNDVI, este índice es consistente con la correlación que presentan los valores más altos, además de ser positiva; en el caso del volumen (VOL) las variables elegidas fueron la banda del VERDE, el NDVI43 (Índice de estrés hídrico) y el NDVI21 (Índice de Vegetación de Diferencias Normalizado) y al igual que en AB las variables seleccionadas son negativas, aunque no todas tienen los valores más altos de correlación como es el NDVI21.

Cuadro 4. Modelos de regresión y variables seleccionadas por el procedimiento STEPWISE para la estimación de las variables forestales del bosque templado y bosque mesófilo.

Cobertura	Modelo	Año	R ²	Signif
Bosque templado	$AB=B_0+B_1(\text{VERDE})+B_2(\text{NDVI21})+B_3(\text{IRM/IRC})$	2007	0.3245	<.0001
	$VOL=B_0+B_1(\text{VERDE})+B_2(\text{NDVI43})+B_3(\text{NDVI21})$	2007	0.3997	<.0001
	$COB=B_0+B_1(\text{GNDVI})$	2007	0.1782	<.0001
Bosque mesófilo	$AB=B_0+B_1(\text{IRM})$	2007	0.2205	0.0003
	$VOL=B_0+B_1(\text{IRM})$	2007	0.2011	0.0005
	$COB=B_0+B_1(\text{ROJO})+B_2(\text{NDVI41})$	2007	0.2085	0.0020
Bosque templado	$AB=B_0+B_1(\text{NDVI23})+B_2(\text{GNDVI})+B_3(\text{NDVI43})+B_4(\text{NDVI21})+B_5(\text{IRM/R})+B_6(\text{IV})$	2009	0.4693	<.0001
	$VOL=B_0+B_1(\text{NDVI23})+B_2(\text{GNDVI})+B_3(\text{NDVI43})+B_4(\text{TNDVI})+B_5(\text{NDVI21})+B_6(\text{IRM/R})+B_7(\text{IRM/IRC})+B_8(\text{IV})$	2009	0.5336	<.0001
	$COB=B_0+B_1(\text{GNDVI})+B_2(\text{IV})$	2009	0.1780	<.0001
Bosque mesófilo	$AB=B_0+B_1(\text{IRC})$	2009	0.1544	0.0023
	$VOL=B_0+B_1(\text{TNDVI})+B_2(\text{IRM/R})$	2009	0.2163	0.0012
	$COB=B_0+B_1(\text{NDVI43})+B_2(\text{TNDVI})$	2009	0.1569	0.0091

Signif: Significancia.

Siguiendo con los datos del 2007 pero para bosque mesófilo (Cuadro 4), el procedimiento Stepwise seleccionó a la banda del IRM para el AB y VOL, esto es consistente con los valores más altos de correlación presentados en el Cuadro 2; en el caso de la COB se seleccionó la banda del Rojo y el Índice NDVI41, este último siendo el que presenta la mas alta correlación con la cobertura forestal.

En general con respecto a los datos espectrales del 2007 el proceso de regresión por pasos seleccionó a las bandas del Verde e IRM además de índices y cocientes basados en éstas y en las bandas del Rojo e IRC pues son las bandas que mejor describen a las variables de densidad forestal ya que es en esta parte del espectro electromagnético donde existe una fuerte absorción de energía provocada por la presencia de humedad en el follaje y está íntimamente ligada a la densidad de la vegetación (Aguirre-Salado *et al.*, 2009).

Baruah *et. al.* (2006), estimaron el volumen de madera para eucalipto a través de imágenes Landsat ETM+ en una región de Chile y encontraron que la banda 5 (infrarrojo medio), la banda 2 (verde) y aquellos índices basados en estas bandas son un fuerte indicador para estimar el volumen.

En el Cuadro 5 se presentan los valores de los parámetros para las variables seleccionadas por el método Stepwise para el bosque templado y bosque mesófilo de los años 2007 y 2009.

Cuadro 5. Coeficientes de los parámetros de ajuste de los modelos de regresión y variables seleccionadas para la estimación de las variables forestales del bosque templado y bosque mesófilo.

Año	Grupo de vegetación	Variables forestales						
		Param AB	Signif	Param VOL	Signif	Param COB	Signif	
2007	bosque templado	B0	28.55534	<.0001	57.82237	0.0006	-55.43561	0.0225
		B1	-93.98174	0.0881	-540.44749	0.1034	187.52583	<.0001
		B2	43.95468	0.0029	-234.44883	<.0001		
		B3	-16.061	<.0001	267.30808	0.004		
	bosque mesófilo	B0	23.61167	<.0001	172.18178	<.0001	277.36631	0.0002
		B1	-72.27893	0.0003	-588.12793	0.0005	-1054.40351	0.0761

		B2				-297.77085	0.0208	
2009	bosque templado	B0	27.27819	<.0001	-262.39254	0.1719	-51.42508	0.0263
		B1	215.40792	<.0001	1858.71377	<.0001	217.52737	<.0001
		B2	-312.40025	<.0001	-2790.15035	<.0001	-164.02823	0.0391
		B3	-104.60818	<.0001	-1267.28025	<.0001		
		B4	259.57139	<.0001	516.94232	0.1101		
		B5	11.56094	<.0001	2067.13345	<.0001		
		B6	-52.39966	<.0001	87.7038	<.0001		
		B7			257.49079	0.0288		
		B8			-825.35639	0.0049		
		B0	23.61167	<.0001	172.18178	<.0001	245.74271	<.0001
	bosque mesófilo	B1	-72.27893	0.0003	-588.12793	0.0005	-96.04491	0.1284
		B2				-251.93094	0.0029	

Param: Parámetro estimado por medio del proceso Stepwise para Área basal (AB), Volumen (VOL) y Cobertura (COB);
Signif: Significancia.

Para los datos provenientes del 2009 y debido a los bajos coeficientes de correlación, el procedimiento seleccionó más variables explicativas de los parámetros forestales del bosque templado (Cuadro 4); para AB las variables seleccionadas fueron: el NDVI23, GNDVI, NDVI43, NDVI21, el Cociente simple IRM/R y el Índice de Vegetación (IV), como se observa sólo un parámetro espectral (NDVI21) coincide con los seleccionados en 2007. En el caso de COB, se seleccionó al GNDVI (Consistente con los datos del 2007), y al IV. El NDVI23, GNDVI, NDVI43, TNDVI, NDVI21, Cociente simples IRM/R, IRM/IRC e IV, se seleccionaron como variables explicativas para los datos de VOL.

En el bosque mesófilo se seleccionó al IRC para AB, TNDVI e IRM/R para VOL y para la COB se seleccionó al NDVI43 y TNDVI (parámetro con el mas alto coeficiente de correlación con los datos de campo), como se nota las variables elegidas no coinciden con las del 2007.

Los parámetros explicativos incluidos en los modelos de regresión seleccionados en los dos años comparados son diferentes para una misma variable (variable dependiente - AB, VOL o COB) en bosque templado y bosque mesófilo. Esto puede relacionarse a las diferencias de las condiciones de toma de la escena de la imagen, ángulo de la

posición del sol y azimut ocasionando un efecto óptico diferente de las imágenes de los dos años comparados (Steininger, 2000; Aguirre-Salado *et al.*, 2009). Debido a éstas diferencias, las estimaciones para el año 2009 se realizaron utilizando el modelo de regresión ajustado con las variables seleccionadas en el procedimiento por pasos de 2007 (regresión forzada, Aguirre-Salado *et al.* 2009), esto con la intención de mantener la consistencia en ambas estimaciones. En el Cuadro 6 se presentan los coeficientes de los parámetros de la regresión forzada para la estimación del AB, VOL y COB de las imágenes del año 2009.

Cuadro 6. Coeficientes de los parámetros de ajuste de los modelos de la regresión forzada para la estimación de las variables forestales del bosque templado y bosque mesófilo del 2009.

Año	Grupo de vegetación	Variables forestales						
		Param AB	Signif	Param VOL	Signif	Param COB	Signif	
2009	bosque templado	B0	31.22756	<.0001	80.38357	<.0001	-35.25247	0.1088
		B1	-134.52574	0.0002	-920.66497	0.0001	147.21955	<.0001
		B2	53.54241	<.0001	-200.20917	<.0001		
		B3	-16.17126	<.0001	332.38216	0.0002		
	bosque mesófilo	B0	21.59376	<.0001	152.82808	<.0001	175.15496	0.0002
		B1	-49.17204	0.0042	-373.36804	0.0183	-302.04981	0.1988
		B2					-170.00918	0.0221
		B3						

Param: Parámetro estimado por medio de la regresión forzada para los datos espectrales del 2009 en Área Basal (AB), Volumen (VOL) y Cobertura arbórea (COB);
Signif: Significancia.

4.3 Estimación de las variables forestales AB, VOL y COB mediante regresión lineal múltiple para los datos espectrales del 2007 y 2009

En la estimación de las variables forestales mediante regresión lineal se utilizaron las variables espectrales provenientes de las imágenes SPOT que fueron elegidas en el procedimiento de regresión por pasos para el 2007 (Cuadro 5). Los resultados se presentan en el Cuadro 7 para los tipos de vegetación agrupados en bosque templado y bosque mesófilo.

Cuadro 7. Estimación promedio por hectárea y total de los parámetros forestales AB, VOL y COB, por grupo de vegetación y mediante la regresión lineal múltiple para el año 2007.

Grupo de vegetación	Superficie (ha)	AB (m ² ha ⁻¹)	AB Total	VOL (m ³ ha ⁻¹)	VOL Total	COB (%)
Bosque templado	363,500	9.75	3,545,500	49.29	17,917,900	52.47
Bosque mesófilo	141,767	12.49	1,770,090	81.93	11,615,100	66.87
TOTAL	505,267		5,315,590		29,533,000	

De forma similar, en el Cuadro 8 se presentan las estimaciones realizadas bajo el mismo proceso pero los datos son agregados por tipo de vegetación más específica.

Cuadro 8. Estimación promedio por hectárea y total de los variables forestales AB, VOL y COB, por tipo de vegetación y mediante la regresión lineal múltiple para el año 2007.

Tipo de vegetación	Superficie (ha)	AB (m ² ha ⁻¹)	AB Total	VOL (m ³ ha ⁻¹)	VOL Total	COB (%)
Bosque de encino	155,559	8.76	1,362,580	42.09	6,548,060	48.66
Bosque de encino-pino	26,664	10.77	287,256	55.37	1,476,400	58.19
Bosque de oyamel	6,163	13.95	85,986	87.28	537,947	75.47
Bosque de pino	59,600	12.29	732,724	66.86	3,984,670	60.86
Bosque de pino-encino	67,858	11.27	765,037	59.85	4,061,290	62.07
Bosque de táscate	47,657	6.54	311,916	27.48	1,309,560	34.53
Bosque mesófilo	141,767	12.49	1,770,090	81.93	11,615,100	66.87
TOTAL	505,267		5,315,589		29,533,027	

Como se detalla en los Cuadros 7 y 8, las estimaciones totales de AB, VOL y COB generadas por grupos de especies (bosque templado y bosque mesófilo) son muy similares a las estimaciones totales generadas por tipo de vegetación de mayor especificidad. Para AB se estimaron 5,315,590 m² con un promedio por hectárea de 9.75 m² para bosque templado y 12.49 m² para bosque mesófilo, el volumen (VOL) promedio es de 49.29 m³ha⁻¹ y 81.93 m³ha⁻¹ para bosque templado y mesófilo respectivamente, con un total de 29,533,000 m³, mientras que el porcentaje de cobertura (COB) es de 52.47 % para bosque templado y 66.87 % para bosque mesófilo.

En las Figuras 4, 5 y 6 se muestra la distribución espacial de las estimaciones para el AB (m²ha⁻¹), VOL (m³ha⁻¹) y COB (%) respectivamente, en el bosque templado y bosque mesófilo del estado de Hidalgo.

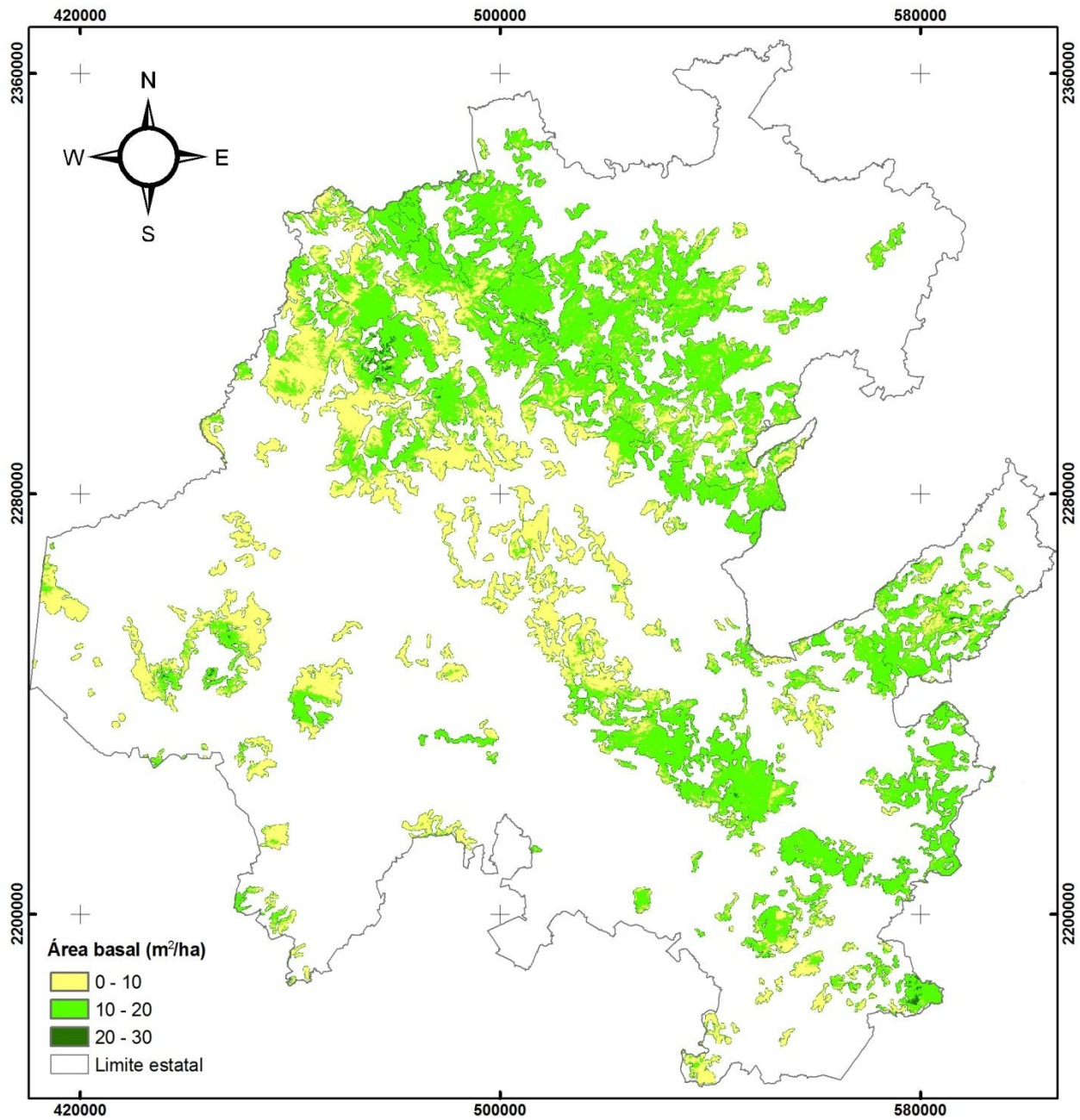


Figura 4. Estimación del área basal (AB) en el bosque templado y bosque mesófilo mediante modelos de regresión múltiple para el año 2007.

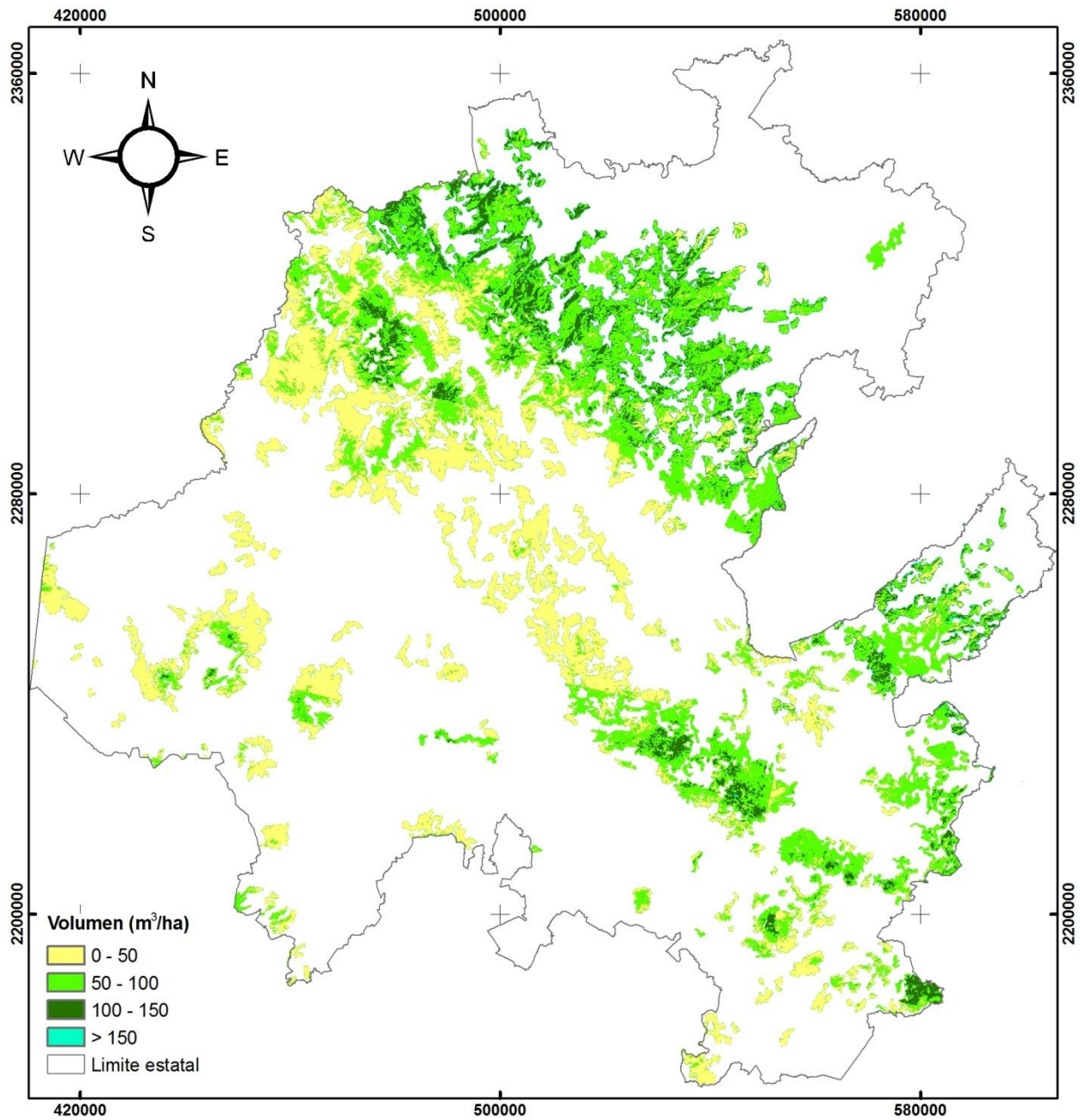


Figura 5. Estimación del volumen (VOL) en el bosque templado y bosque mesófilo mediante modelos de regresión múltiple para el año 2007.

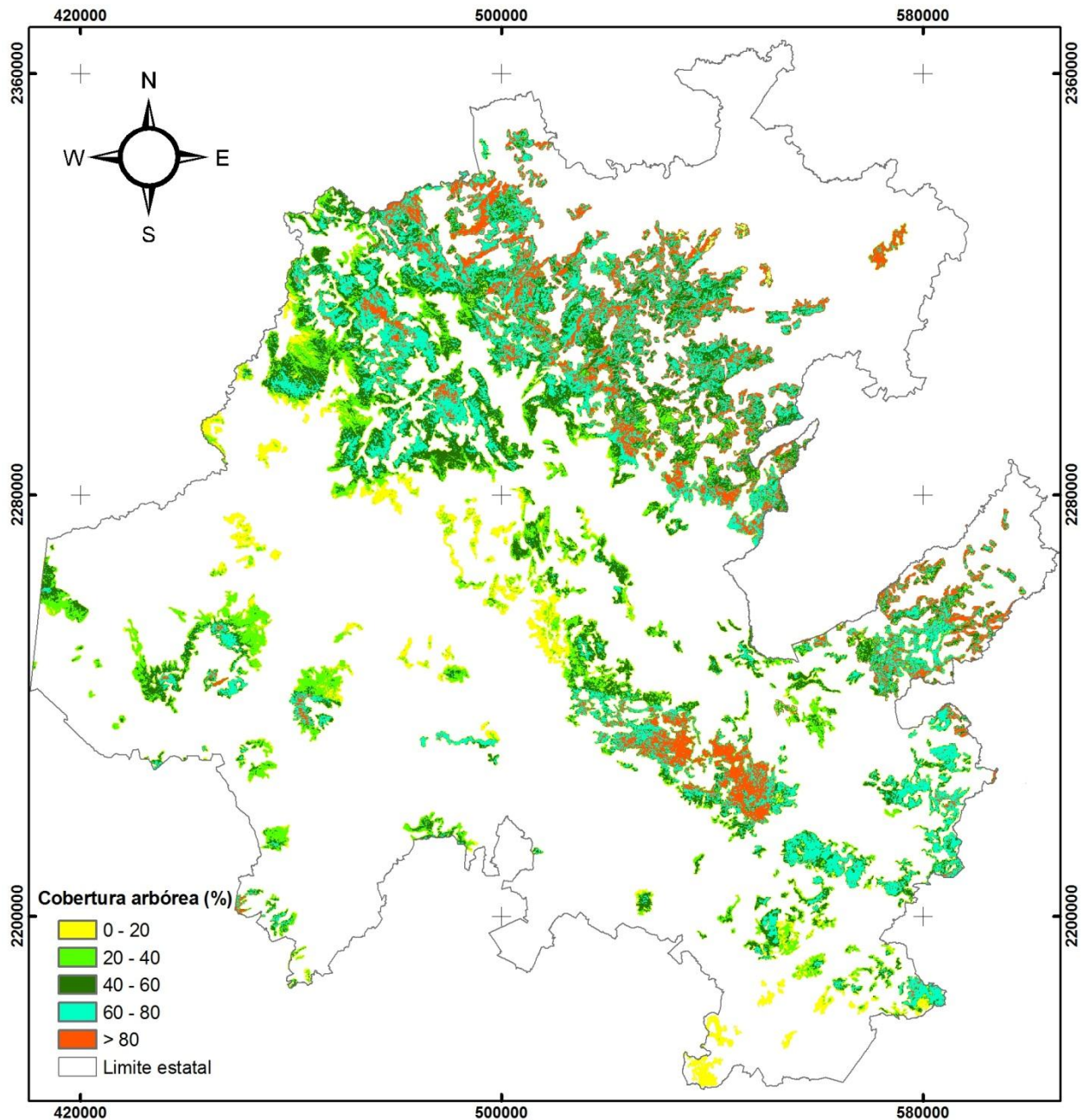


Figura 6. Estimación de la cobertura arbórea (COB) en el bosque templado y bosque mesófilo mediante modelos de regresión múltiple para el año 2007.

En el Cuadro 9 se muestran las estimaciones obtenidas por grupo de vegetación para los datos espectrales del 2009. Las estimaciones fueron realizadas a través de la regresión lineal múltiple, utilizando las variables elegidas por el procedimiento por pasos Stepwise en los datos espectrales del 2007, ya que como se menciona en la

metodología, en el apartado de regresión lineal, con el uso de estas variables se intenta mantener la consistencia en las estimaciones de los dos años comparados (Cuadro 6).

Cuadro 9. Estimación promedio por ha y total de las variables forestales AB, VOL y COB, por grupo de vegetación y mediante la regresión lineal múltiple para el año 2009.

Grupo de vegetación	Superficie (ha)	AB (m ² ha ⁻¹)	AB Total	VOL (m ³ ha ⁻¹)	VOL Total	COB (%)
Bosque templado	363,500	10.41	3,783,710	54.43	19,785,100	55.16
Bosque mesófilo	141,767	12.84	1,819,840	86.40	12,249,100	67.15
TOTAL	505,267		5,603,550		32,034,200	

Los cálculos de AB, VOL y COB por tipo de vegetación para el año 2009 se muestran en el Cuadro 10. Como se puede constatar, los valores totales reportados son muy similares a los obtenidos por grupo de vegetación para 2009 (Cuadro 9).

Cuadro 10. Estimación promedio por ha y total de las variables forestales AB, VOL y COB, por tipo de vegetación y mediante la regresión lineal múltiple para el año 2009.

Tipo de vegetación	Superficie (ha)	AB (m ² ha ⁻¹)	AB Total	VOL (m ³ ha ⁻¹)	VOL Total	COB (%)
Bosque de encino	155,559	9.25	1,438,632	48.07	7,478,152	50.71
Bosque de encino-pino	26,664	12.16	324,136	64.32	1,714,884	65.66
Bosque de oyamel	6,163	13.72	84,538	75.38	464,534	48.63
Bosque de pino	59,600	13.08	779,568	70.25	4,186,684	62.90
Bosque de pino-encino	67,858	10.89	739,066	58.14	3,945,055	59.50
Bosque de táscate	47,657	8.77	417,751	41.88	1,995,695	48.83
Bosque mesófilo	141,767	12.84	1,819,840	86.40	12,249,100	67.15
TOTAL	505,267		5,603,532		32,034,103	

En el inventario total del 2009 se muestra un aumento del 5.42 % para el AB en comparación con el año 2007, de esta manera se tiene un total de 5,603, 550 m², con un promedio de 10.41 m²ha⁻¹ y 12.84 m²ha⁻¹ para el bosque templado y bosque mesófilo respectivamente, el VOL total es de 32,034,200 m³ (aumentó en 8.47 % con respecto al 2007), con un promedio por hectárea de 54.43 m³ y 86.40 m³ para el bosque templado y el bosque mesófilo, mientras que la variable COB muestra un promedio de 55.16 % para bosque templado y 67.15 % para bosque mesófilo lo que representa un aumento aproximado del 2.49 % en comparación con el 2007 (Figura 7). El aumento reflejado en las estimaciones del 2009 es congruente si se considera que

existe una diferencia de dos años con los datos del campo y la información espectral de la primera toma de imágenes (2007) por lo que se esperaría el crecimiento de la estructura forestal del bosque en ese periodo de tiempo, asumiendo que la superficie forestal se mantuvo.

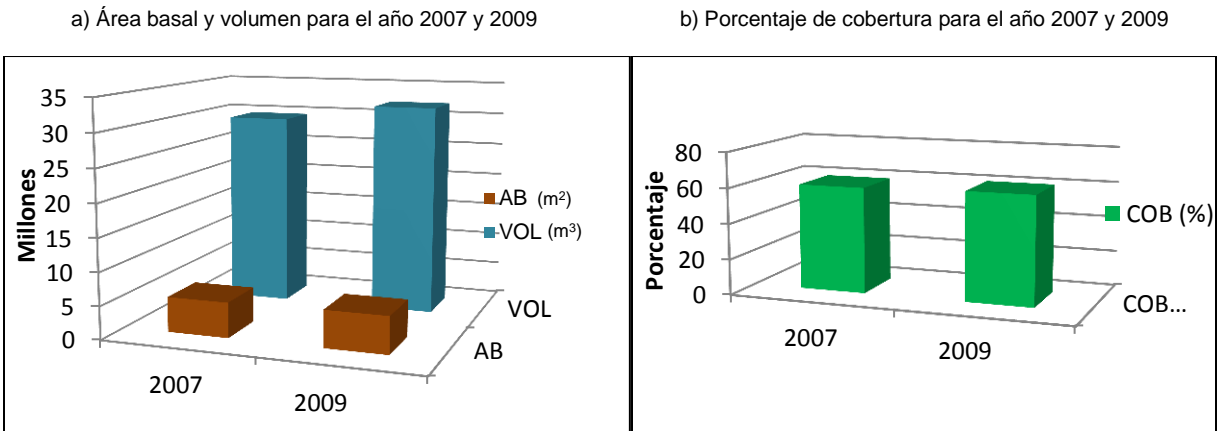


Figura 7. Estimación de variables forestales mediante regresión lineal múltiple para el año 2007 y 2009, a) Área basal (AB) y volumen (VOL), b) porcentaje de cobertura (COB).

4.4 Estimación de las variables forestales AB, VOL y COB mediante estimadores de razón y regresión para el año 2007 y 2009

Dentro del análisis de correlación efectuado, el índice de vegetación de diferencias normalizado basado en la banda del verde (GNDVI) es el que mejor coeficientes positivos presenta entre los datos espectrales y la información de los conglomerados del INFyS para el bosque templado del año 2007, por tal motivo podemos determinar un estimador de razón y regresión basado en este índice y calcular el inventario total.

Para el bosque mesófilo también se generó un estimador de razón y regresión pero con la banda del IRM ya que presenta los mejores coeficientes de correlación.

El inventario total es de 5,469,636 m² para AB, 30,372,039 m³ de VOL y un porcentaje de cobertura (COB) de 52.06 % y 67.18 % para el bosque templado y bosque mesófilo respectivamente. Las medias y los resultados totales se muestran en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Estimación promedio por ha y total de las variables forestales AB, VOL y COB, considerando los estimadores de razón y regresión para el bosque templado y bosque mesófilo del año 2007.

Tipo de vegetación	Sup. (ha)	AB	AB Total (m ²)	P	VOL	VOL Total (m ³)	P	COB	P
Bosque templado	363,500	10.04	3,648,567	13.67	49.46	17,977,826	17.56	52.06	16.81
IC+95		11.41	4,147,315		58.14	21,134,368		60.81	
IC-95		8.67	3,149,819		40.77	14,821,284		43.31	
Bosque mesófilo	141,767	12.85	1,821,069	19.91	87.43	12,394,213	24.36	67.18	20.82
IC+95		15.40	2,183,621		108.73	15,413,735		81.16	
IC-95		10.29	1,458,516		66.13	9,374,692		53.20	
Inventario Total	505,267		5,469,636			30,372,039			

Sup.: Superficie;

AB: Área basal (m²ha⁻¹); VOL: Volumen (m³ha⁻¹); COB: Cobertura arbórea (%);

P: Precisión (%);

IC: Intervalo de Confianza al 95 %.

En el Cuadro 12 se presentan las estimaciones totales obtenidas por medio de los estimadores de razón y regresión por tipo de vegetación más específica para el año 2007. Como se nota estas estimaciones totales son ligeramente menores para el caso del AB (5,410,072 m²) y VOL (30,020,059 m³), mientras que el porcentaje de COB es variante entre los tipos de vegetación más específica (de 31.09 % en bosque de táscate hasta > al 100 % en bosque de encino-pino).

Cuadro 12. Estimación promedio por ha y total de las variables forestales AB, VOL y COB, considerando los estimadores de razón y regresión para los diferentes tipos de vegetación del año 2007.

Tipo de vegetación	Sup. (ha)	AB	AB Total (m ²)	P	VOL	VOL Total (m ³)	P	COB	P
Bosque de encino	155,559	8.13	1,265,398	29.13	34.21	5,321,516	36.51	39.70	33.27
Bosque de encino-pino	26,664	13.63	363,452	17.38	60.96	1,625,447	20.49	101.94	12.96
Bosque de oyamel	6,163	25.93	159,792	9.14	193.32	1,191,400	6.46	88.13	14.99
Bosque de pino	59,600	12.86	766,328	18.43	67.97	4,051,277	18.38	69.54	19.00
Bosque de pino-encino	67,858	10.23	694,367	23.15	57.52	3,903,474	21.71	58.28	22.67
Bosque de táscate	47,657	7.13	339,666	33.24	32.16	1,532,732	38.84	31.09	42.48
Bosque mesófilo	141,767	12.85	1,821,069	19.91	87.43	12,394,213	24.36	67.18	20.82
TOTAL	505,267		5,410,072			30,020,059		65.12	

Sup.: Superficie;

AB: Área basal (m²ha⁻¹); VOL: Volumen (m³ha⁻¹); COB: Cobertura arbórea (%);

P: Precisión (%).

Al igual que en las estimaciones del año 2007 se utilizaron el GNDVI y la banda del IRM para generar estimadores de razón y regresión para obtener el inventario total del bosque templado y bosque mesófilo con los datos espectrales del año 2009, de esta forma podemos mantener consistentes las estimaciones para los dos años comparados. Los resultados se muestran en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Estimación promedio por ha y total de las variables forestales AB, VOL y COB, considerando los estimadores de razón y regresión basados en el GNDVI para el bosque templado y la banda del IRM para el bosque mesófilo del año 2009.

Tipo de vegetación	Sup. (ha)	AB	AB Total (m ²)	P	VOL	VOL Total (m ³)	P	COB	P
Bosque templado	363,500	10.83	3,937,331	13.84	55.37	20,127,981	17.98	54.82	15.80
IC+95		12.32	4,477,059		65.24	23,714,934		63.40	
IC-95		9.35	3,397,381		45.50	16,541,029		46.24	
Bosque mesófilo	141,767	12.82	1,817,474	18.56	86.21	12,221,624	24.69	66.70	21.66
IC+95		15.20	2,155,140		107.51	15,241,281		81.16	
IC-95		10.44	1,479,809		64.91	9,201,968		52.24	
TOTAL	505,267		5,754,805			32,349,605		60.76	

Sup.: Superficie;

AB: Área basal (m²ha⁻¹); VOL: Volumen (m³ha⁻¹); COB: Cobertura arbórea (%);

P: Precisión (%).

En el Cuadro 14 se presentan las estimaciones a través de los estimadores de razón y regresión por tipo de vegetación mas específica para el 2009.

Cuadro 14. Estimación promedio por ha y total de las variables forestales AB, VOL y COB, considerando los estimadores de razón y regresión para los diferentes tipos de vegetación del año 2009.

Tipo de vegetación	Sup. (ha)	AB	AB Total (m ²)	P	VOL	VOL Total (m ³)	P	COB	P
Bosque de encino	155,559	8.75	1,360,670	25.77	37.70	5,864,265	31.89	42.37	28.30
Bosque de encino-pino	26,664	13.18	351,354	42.71	60.75	1,619,900	59.77	100.25	44.41
Bosque de oyamel	6,163	24.13	148,716	38.08	174.26	1,073,912	55.37	84.26	18.30
Bosque de pino	59,600	13.79	822,000	29.98	73.58	4,385,043	38.38	61.98	32.56
Bosque de pino-encino	67,858	10.04	681,364	28.39	59.20	4,016,934	33.93	52.18	41.59
Bosque de táscate	47,657	7.47	355,879	61.53	23.83	1,135,667	189.30	38.15	42.74
Bosque mesófilo	141,767	12.82	1,817,474	18.56	86.21	12,221,624	24.69	66.70	21.66
TOTAL	505,267	12.88	5,537,457		73.65	30,317,345		63.70	

Sup.: Superficie;

AB: Área basal (m²ha⁻¹); VOL: Volumen (m³ha⁻¹); COB: Cobertura arbórea (%);

P: Precisión (%).

Como se observa en el cuadro anterior las estimaciones totales tienen una tendencia similar a las estimaciones del 2007, es decir que por tipo de vegetación mas especifica el AB (5,537,457 m²) y el VOL (30,317,345 m³) son menores a las estimaciones por grupo de vegetación (bosque templado y bosque mesófilo), mientras que la COB se mantiene con valores similares entre el año 2007 y 2009 para los tipos de vegetación más específica.

En comparación con los resultados obtenidos en el 2007, bajo este enfoque el AB para el año 2009 presenta en promedio 10.83 m²ha⁻¹ para el bosque templado y 12.82 m²ha⁻¹ para el bosque mesófilo con un inventario total de 5,754,806 m² lo que constituye un aumento del 5.21 %. El VOL total es de 32,349,605 m³ (6.51 % mas que en el 2007), con un promedio para el bosque templado de 55.37 m³ha⁻¹ y para bosque mesófilo 86.21 m³ha⁻¹. Finalmente la COB es de 54.82 % en el bosque templado y 66.70 % en el bosque mesófilo aumentando en aproximadamente 1.91 % con respecto al 2007. En la Figura 10 se puede observar el contraste entre las estimaciones para el año 2007 y 2009. La tendencia de aumento en las estimaciones por medio de los estimadores de razón y regresión entre los dos años comparados es similar a la presentada en las estimaciones por medio de la regresión lineal, esta tendencia es esperada debido a la diferencia de dos años en los datos espectrales por lo que se traduce en el crecimiento de la estructura de los bosques.

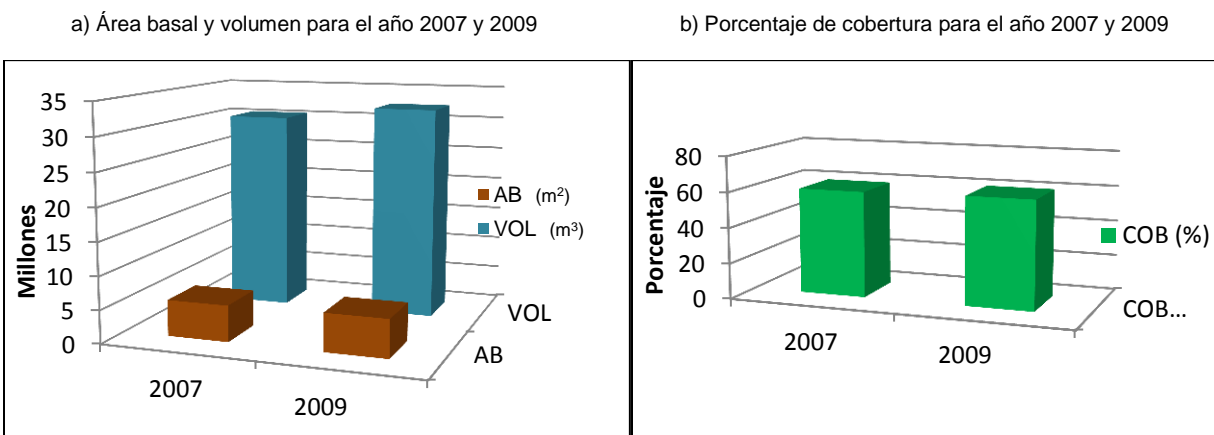


Figura 8. Estimación de variables forestales estimadores de razón y regresión para el año 2007 y 2009, a) Área basal (AB) y volumen (VOL), b) porcentaje de cobertura arbórea (COB).

Como puede observarse la precisión se modifica entre las estimaciones por grupo de vegetación y las estimaciones por tipo de vegetación mas especifica. Entre las causas que pueden provocar dicho comportamiento están las siguientes: 1) Para el caso del bosque mesófilo la variabilidad de especies que se encuentran en este tipo de vegetación afectando la firma espectral dentro de las escenas satelitales, 2) El amplio rango de fechas en que fueron tomadas las imágenes de satélite lo que afecta los valores espectrales de cada escena y hace que exista mayor variabilidad espectral (Scheuber, 2010), 3) La agrupación de especies realizada para facilitar el cálculo de los parámetros forestales medidos en campo también tiene influencia sobre la variabilidad presentada, y 4) La poca cantidad de sitios de muestreo que presentan algunos tipos de vegetación como es el caso del bosque de encino pino (11 conglomerados), bosque de oyamel (4 conglomerados) y bosque de táscate (4 conglomerados).

4.5 Calculo de las variables forestales mediante estimador no paramétrico K vecino más cercano (K-nn)

Las estimaciones mediante el estimador no paramétrico vecino más cercano (K-nn) para el bosque templado y bosque mesófilo son similares a las generadas mediante los estimadores de razón y regresión y más altas que las realizadas con los modelos de regresión lineal múltiple. En el Cuadro 15 se presentan las estimaciones promedio y totales por grupos de vegetación (bosque templado y bosque mesófilo) para el año 2007.

Cuadro 15. Estimación promedio por ha y total de las variables forestales AB, VOL y COB, por grupo de vegetación mediante el estimador no paramétrico K vecino más cercano (K-nn) para el 2007.

Grupo de vegetación	Superficie (ha)	AB (m ² ha ⁻¹)	AB Total	VOL (m ³ ha ⁻¹)	VOL Total	COB (%)
Bosque templado	363,500	10.25	3,722,860	49.98	18,155,200	51.42
Bosque mesófilo	141,767	12.85	1,819,948	82.49	11,684,160	66.98
TOTAL	505,267		5,542,808		29,839,360	

Bajo este enfoque el inventario total de AB es de 5,542,808 m², con un promedio de 10.25 m²ha⁻¹ para el bosque templado y 12.85 m²ha⁻¹ para el bosque mesófilo (Figura 9), el VOL presenta en promedio 49.98 m³ha⁻¹ en el bosque templado y 82.49 m³ha⁻¹ en el bosque mesófilo (Figura 10), con un total de 29,839,360 m³ mientras que la cobertura presenta un porcentaje de 51.42 % para bosque templado y 66.98 % en el bosque mesófilo (Figura 11).

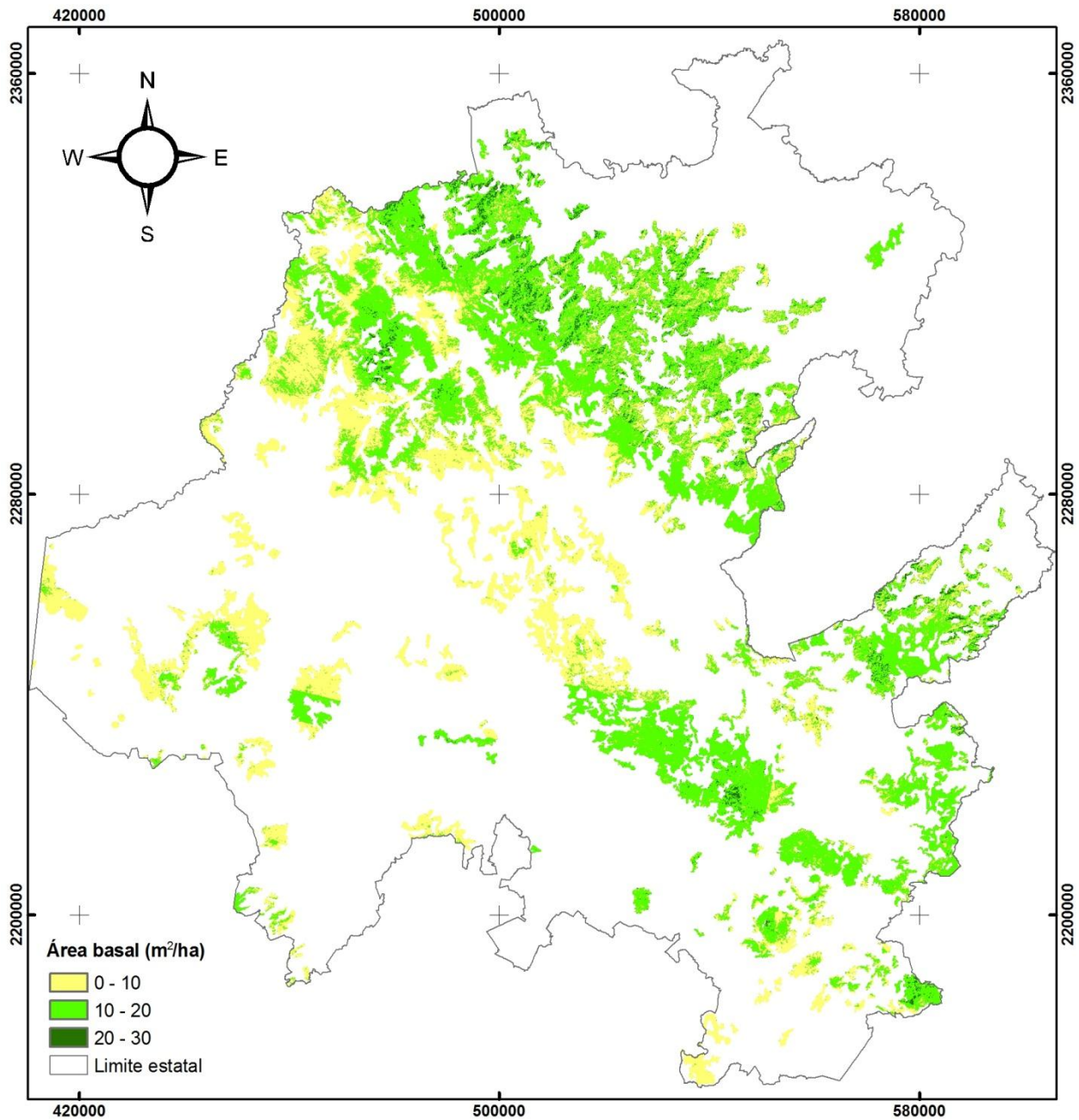


Figura 9. Estimación del área basal (AB) en el bosque templado y bosque mesófilo mediante estimador no paramétrico K vecino más cercano (K-*nn*) para el año 2007.

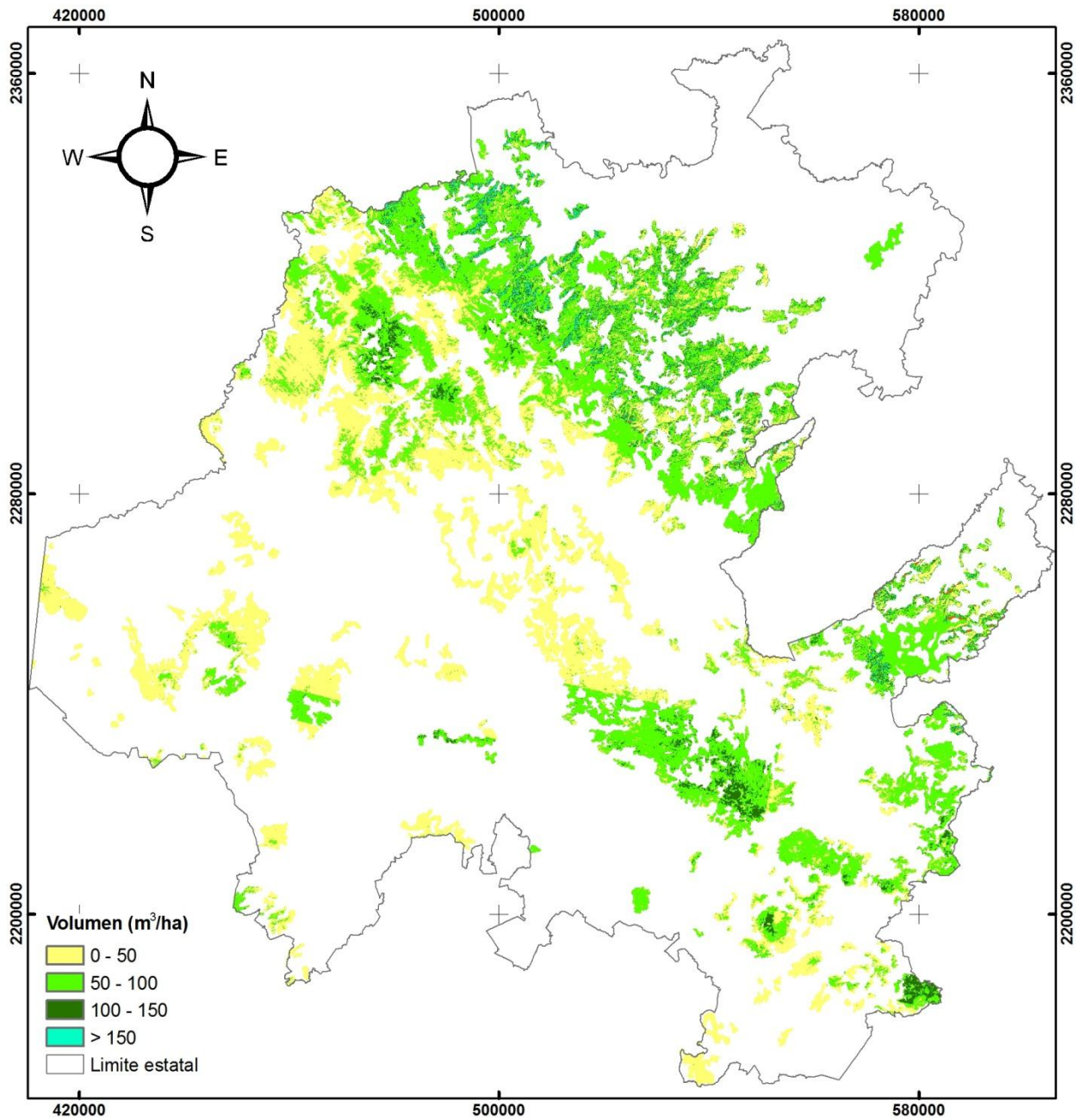


Figura 10. Estimación del volumen (VOL) en el bosque templado y bosque mesófilo mediante estimador no paramétrico K vecino más cercano (K-nn) para el año 2007.

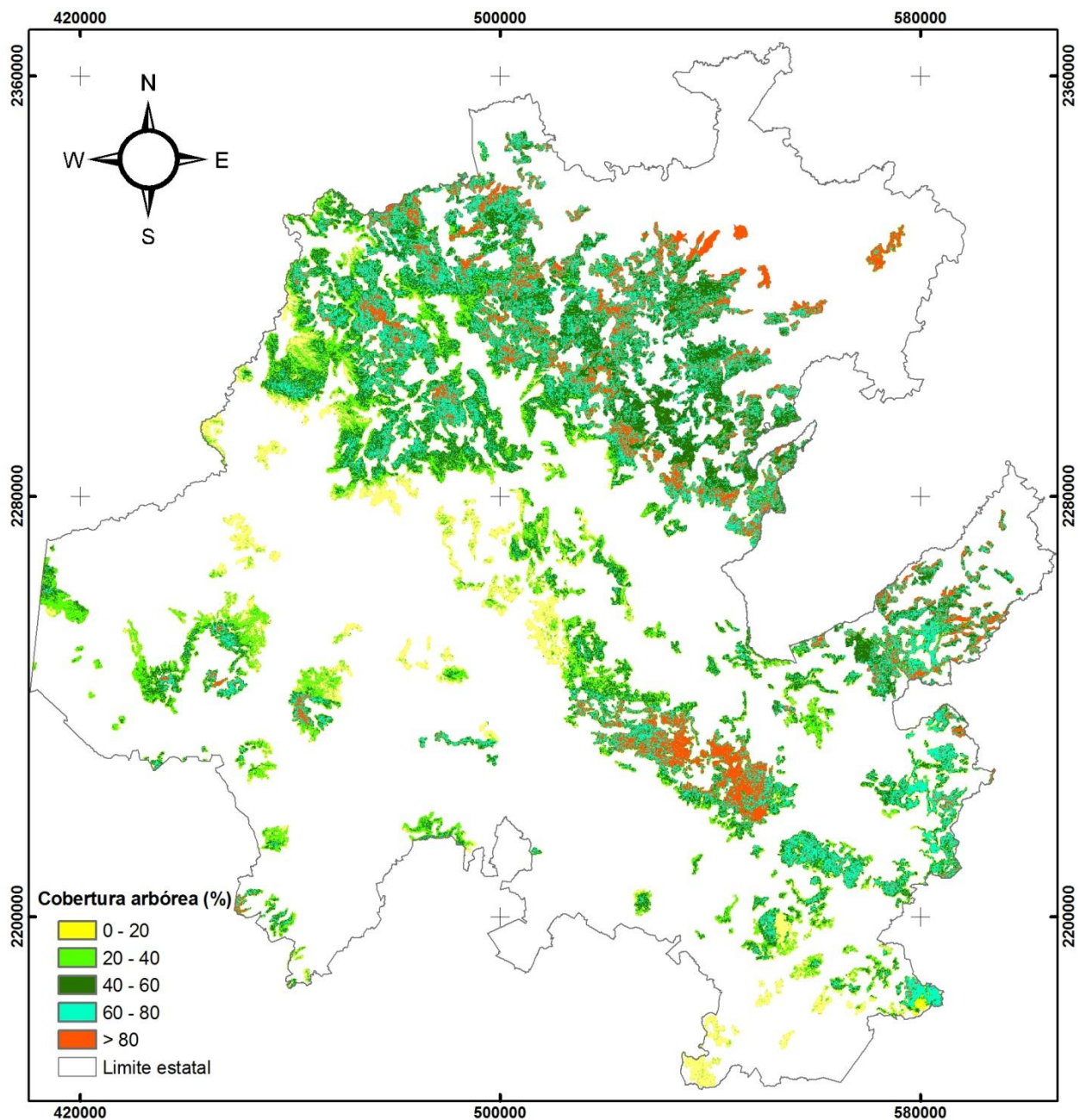


Figura 11. Estimación de la cobertura arbórea (COB) en el bosque templado y bosque mesófilo mediante estimador no paramétrico K vecino más cercano (K-nn) para el año 2007.

Las estimaciones obtenidas para los datos espectrales del 2007 por tipo de vegetación más detallada muestran ser muy similares a las generadas por grupo de vegetación. En el Cuadro 16 se pueden observar las estimaciones promedio y total para los tipos de vegetación presentes en la zona de estudio.

Cuadro 16. Estimación promedio por ha y total de las variables forestales AB, VOL y COB, por tipo de vegetación y mediante estimador no paramétrico vecino mas cercano K-nn para el 2007.

Tipo de vegetación	Superficie (ha)	AB (m ² ha ⁻¹)	AB Total	VOL (m ³ ha ⁻¹)	VOL Total	COB (%)
Bosque de encino	155,559	9.16	1,424,000	42.47	6,602,170	47.84
Bosque de encino-pino	26,664	11.23	299,296	55.67	1,483,470	57.71
Bosque de oyamel	6,163	15.69	96,686	87.01	536,192	77.60
Bosque de pino	59,600	12.59	750,050	65.98	3,929,890	60.56
Bosque de pino-encino	67,858	11.83	802,510	61.98	4,203,440	60.65
Bosque de táscate	47,657	7.36	350,323	29.40	1,400,020	34.20
Bosque mesófilo	141,767	12.85	1,819,948	82.49	11,684,160	66.98
TOTAL	505,267		5,542,813		29,839,342	

Para el cálculo de las variables forestales se utilizaron diferentes valores de k-nn, para el área basal se usó el k-nn=4 mientras que para el volumen y cobertura se determinó la utilización de k-nn=10, los resultados obtenidos bajo este método presentaron errores ligeramente más bajos que los obtenidos con el método de regresión lineal (Aguirre-Salado *et al.*, 2009).

Con base a los datos espectrales del 2009 se calculó el inventario total para las variables forestales AB, VOL y COB, las cuales mostraron en el caso del AB ser muy similares a las del año 2007 con 5,534,997 m² con un promedio de 10.59 m²ha⁻¹ para el bosque templado y 11.64 m²ha⁻¹ para el bosque mesófilo, para el volumen las estimaciones mostraron un aumento del 3.12 % con respecto a las del año 2007 mientras que la cobertura presento un ligero aumento comparado con el porcentaje de cobertura del año 2007 (53.53 % y 67.01 % para bosque templado y mesófilo respectivamente), (Cuadro 17).

Cuadro 17. Estimación promedio por ha y total de las variables forestales AB, VOL y COB, por grupo de vegetación mediante el estimador no paramétrico K vecino más cercano (K-nn) para el 2009.

Grupo de vegetación	Superficie (ha)	AB (m ² ha ⁻¹)	AB Total	VOL (m ³ ha ⁻¹)	VOL Total	COB (%)
Bosque templado	363,500	10.59	3,885,700	55.95	20,520,727	53.53
Bosque mesófilo	141,767	11.64	1,649,297	71.66	10,249,273	67.01
TOTAL	505,267		5,534,997		30,770,000	

Las estimaciones por tipo de vegetación más detallada no mostraron cambios significativos con respecto a las estimaciones por grupo de vegetación (Cuadro 18).

Cuadro 18. Estimación promedio por ha y total de las variables forestales AB, VOL y COB, por tipo de vegetación y mediante estimador no paramétrico vecino mas cercano K-nn para el 2009.

Tipo de vegetación	Superficie (ha)	AB (m^2ha^{-1})	AB Total	VOL (m^3ha^{-1})	VOL Total	COB (%)
Bosque de encino	155,559	8.85	1,389,045	45.68	7,169,337	49.53
Bosque de encino-pino	26,664	12.51	336,656	68.30	1,837,564	62.86
Bosque de oyamel	6,163	15.23	94,750	83.32	518,380	47.32
Bosque de pino	59,600	13.45	808,943	71.20	4,281,664	60.34
Bosque de pino-encino	67,858	11.94	817,997	64.31	4,404,136	58.47
Bosque de táscate	47,657	9.12	438,316	48.03	2,309,391	46.66
Bosque mesófilo	141,767	11.64	1,649,297	71.66	10,249,23	67.01
TOTAL	505,267	11.82	5,535,005	64.64	30,769,744	57.94

En la Figura 12 se muestran las estimaciones totales para AB, VOL y COB del año 2007 y 2009.

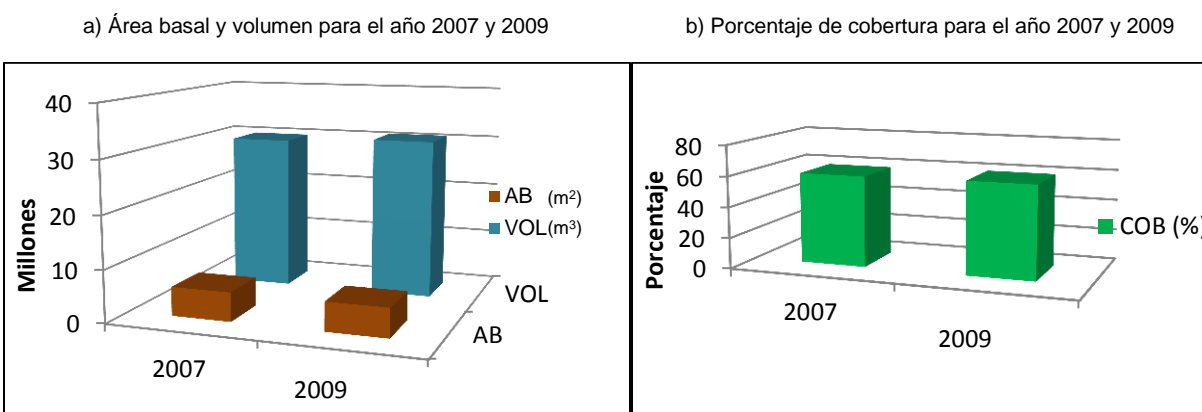


Figura 12. Estimación de variables forestales mediante estimador no paramétrico (K-nn) para el año 2007 y 2009, a) Área basal (AB) y volumen (VOL), b) porcentaje de cobertura arbórea (COB).

Existen varias publicaciones acerca del uso del k-nn para la estimación de variables forestales. Una aportación importante es la realizada por Franco *et al.* (2001) en la cual se reporta la estimación de área basal, volumen y tipo de cobertura en los bosques del Condado de San Luis en Minnesota usando mediciones de campo (Inventario Forestal conducido por el Servicio Forestal de los Estados Unidos) y como datos auxiliares de imágenes satelitales Landsat TM. Para estimar las variables forestales se probó el k-

nn=1 mostrando un RECM (Raíz del Error Cuadrático Medio) de $8.5 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ y $51.6 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ para área basal y volumen en la zona, sin embargo, elevando el k-nn hasta 5 y 9 el RECM presentó una disminución de hasta el 14% y estabilizándose después de k-nn=10, los resultados encontrados por Franco *et al.* (2001) concuerdan con los conseguidos por Nilsson (1997) y Tokola *et al.* (1996) que reportan una estabilidad en las estimaciones cuando el k-nn se encuentra entre 10 y 15.

Por otro lado en el trabajo de Tian *et al.* (2012), en la estimación de biomasa en una región de China mostro un rango optimo de K-nn de 3 hasta 6, con un RECM de 15 a 20 tonha^{-1} de biomasa y aumentando éste con el aumento de k.

La decisión de cuantos k vecinos más cercanos usar depende de la meta de nuestro trabajo, si se desea producir una estimación global para una región, entonces usar 9 o más k-nn puede ser apropiado, sin embargo, si el objetivo es la generación de mapas de producción k=1 puede ser la mejor opción ya que retiene el rango completo de variabilidad presente en los datos (Franco *et al.*, 2001). En el caso del presente trabajo los k-nn utilizados son los que menor valor de RECM presentaron.

4.6 Comparación de las estimaciones generadas por regresión lineal, estimadores de razón y regresión y k-nn vs estimaciones mediante un inventario tradicional

Con los datos de campo del INFyS se calculó el inventario forestal del área de estudio de forma tradicional con el método simple al azar y el método estratificado para el bosque templado, utilizando a los tipos de vegetación como elemento de estratificación. Para el bosque mesófilo se utilizó el método simple al azar. De los dos métodos el estratificado fue el que mayor precisión presentó en el bosque templado, por tal motivo fue utilizado para hacer las comparaciones con las estimaciones de regresión lineal y k-nn (Shiver and Borders, 1996; Aguirre-Salado *et al.*, 2009).

El inventario tradicional estima un total de 5,844,503 m² de área basal dentro de una superficie de 505,267 ha, comprendidas entre el bosque templado (71.94%) y bosque mesófilo (28.06%), con un promedio de 11.08 y 12.82 m²ha⁻¹ respectivamente. El volumen total estimado es de 32,809,314.83 m³, con un promedio de 56.63 m³ha⁻¹ en el bosque templado y 86.22 m³ha⁻¹ en el bosque mesófilo; mientras que la cobertura arbórea promedio es de 57.81 % para bosque templado y de 66.70 % para el bosque mesófilo (Cuadro 19).

Cuadro 19. Estimación de las variables forestales AB, VOL y COB del 2007 mediante inventario tradicional estratificado para bosque templado e inventario simple al azar para el bosque mesófilo.

	Bosque templado			Bosque mesófilo		
	AB (m ² ha ⁻¹)	VOL (m ³ ha ⁻¹)	COB (%)	AB (m ² ha ⁻¹)	VOL (m ³ ha ⁻¹)	COB (%)
Media	11.08	56.63	57.81	12.82	86.22	66.70
Var Media	0.58	22.10	31.79	1.58	131.61	50.56
IC+	12.60	66.04	69.08	15.34	109.18	80.94
IC-	9.55	47.23	46.53	10.30	63.25	52.47
Precisión	13.76%	16.60%	19.51%	19.65%	26.63%	21.34%
Inventario	4,026,877	20,586,538	21,012,973.96	1,817,626	12,222,776	9,456,370.00
IC+ 95	4,581,104	24,004,235	25,112,218.35	2,174,779	15,478,269	11,474,226.67
IC- 95	3,472,650	17,168,842	16,913,729.56	1,460,472	8,967,284	7,438,513.34

IC: Intervalo de confianza al 95 %.

En el Cuadro 20 se concentran las estimaciones totales de AB, VOL y COB, éstas fueron obtenidas por medio de la regresión lineal múltiple utilizando las mismas variables para el año 2007 y 2009, se presentan también las estimaciones totales generadas a partir de los estimadores de razón y regresión calculados por medio del GNDVI en el caso del bosque templado y por medio de la banda del IRM para el bosque mesófilo y finalmente las estimaciones obtenidas por medio del método no paramétrico de K vecino más cercano (K-nn).

Cuadro 20. Comparación del inventario convencional vs los distintos métodos de percepción remota para la estimación total de las variables forestales AB, VOL y COB del 2007.

Métodos de estimación	2007									Tasa de cambio entre inventario convencional y métodos de percepción remota		
	IC-95	AB	IC+95	IC-95	VOL	IC+95	IC-95	COB	IC+95	AB	VOL	COB
Inventario tradicional	5,290,276	5,844,503	6,755,883	26,136,126	32,809,315	39,482,504	49.50	62.26	75.01			
Regresión lineal		5,315,590			29,533,000			59.67		-9.05	-9.99	-4.15
Estimadores de razón y regresión	4,608,335	5,469,636	6,330,936	24,195,976	30,372,039	36,548,103	48.25	59.62	71	-6.41	-7.43	-4.23
K-nn		5,542,808			29,839,360			59.20		-5.16	-9.05	-4.91

AB: Área basal (m²); VOL: Volumen (m³); COB: Cobertura arbórea (%);
IC: Intervalo de confianza al 95 %.

Como se desprende del análisis del Cuadro 20 y la Figura 13, las estimaciones totales por medio de los métodos alternativos, tienden a ser conservadores respecto a los valores estimados mediante el inventario tradicional. Para los estimadores de razón y regresión, que son las que más se acercan a los resultados del estimador puntual (medias) que presenta el inventario tradicional, sus estimaciones están por debajo del inventario tradicional en un 6.41 % para la variable forestal AB (5,469,636 m²), mientras que para el volumen existe una subestimación del 7.43 % (30,372,039 m³) con respecto al inventario convencional y en la cobertura la subestimación es del 4.23 % presentando en promedio 59.62 % de cobertura en el total de la zona de estudio.

El segundo lugar encontramos al método no paramétrico de K vecino más cercano (K-nn) que presenta para el caso del AB una subestimación de 5.16 % (5,542,808 m²) mientras que para el volumen presenta un total de 29,839,360 m³ siendo un 9.05 % menos que las estimaciones del inventario convencional y en el caso de la COB las estimaciones son en 4.91 % menos que el inventario tradicional presentando en promedio 59.20 % de cobertura.

Finalmente las estimaciones por medio del proceso de regresión lineal fueron las más conservadoras en comparación con el inventario tradicional y los dos métodos de

percepción antes expuestos. Para las variables forestales área basal (AB) y volumen (VOL) existe una subestimación aproximadamente del 9 %, de esta forma para AB se estima un total de 5,315,590 m² y para VOL se contempla un total de 29,533,000 m³ para bosque templado y bosque mesófilo en conjunto, mientras que para el porcentaje de cobertura arbórea se mantiene la tendencia de los otros métodos de percepción de una subestimación del 4 % con respecto al inventario tradicional, de esta manera para COB se contempla un porcentaje de cobertura del 59.67 % para el bosque templado y bosque mesófilo.

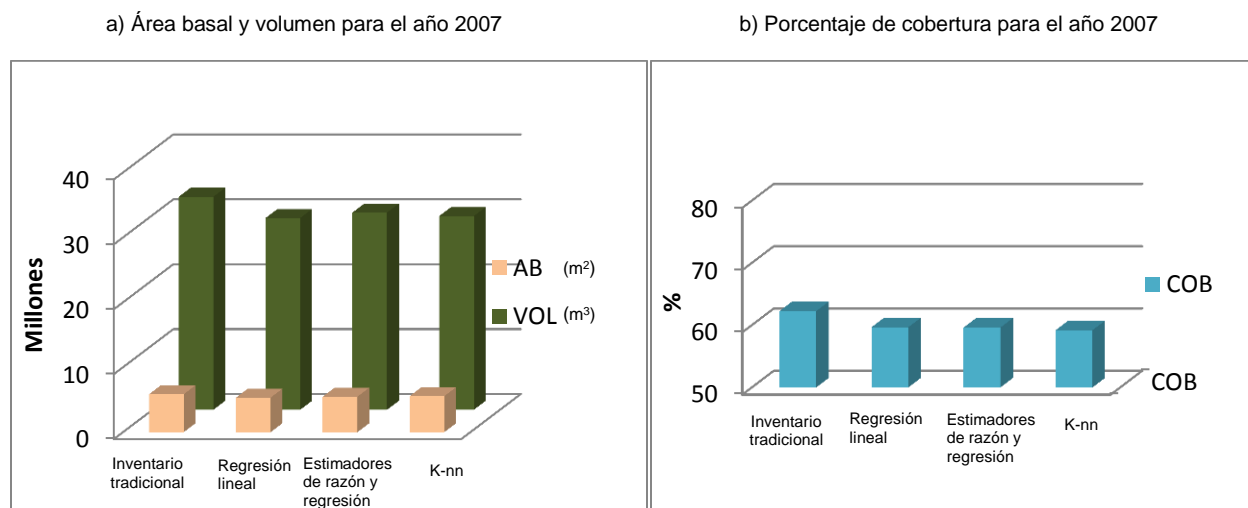


Figura 13. Comparación de las variables forestales estimadas por medio del inventario tradicional y métodos de percepción remota para el año 2007; a) Área basal (m²) y volumen (m³), b) Porcentaje de cobertura arbórea.

Las estimaciones mediante los métodos de percepción remota son mas conservadoras en relación al inventario total calculado con el método estratificado para el bosque templado y el método simple al azar para el bosque mesófilo, lo cual es deseable cuando se requiere un esquema de manejo forestal sustentable, por ejemplo para la estimación de biomasa y carbono dentro de la búsqueda de bonos por captura de carbono (Mäkelä y Pekkarinen, 2004; Aguirre-Salado *et al.*, 2009).

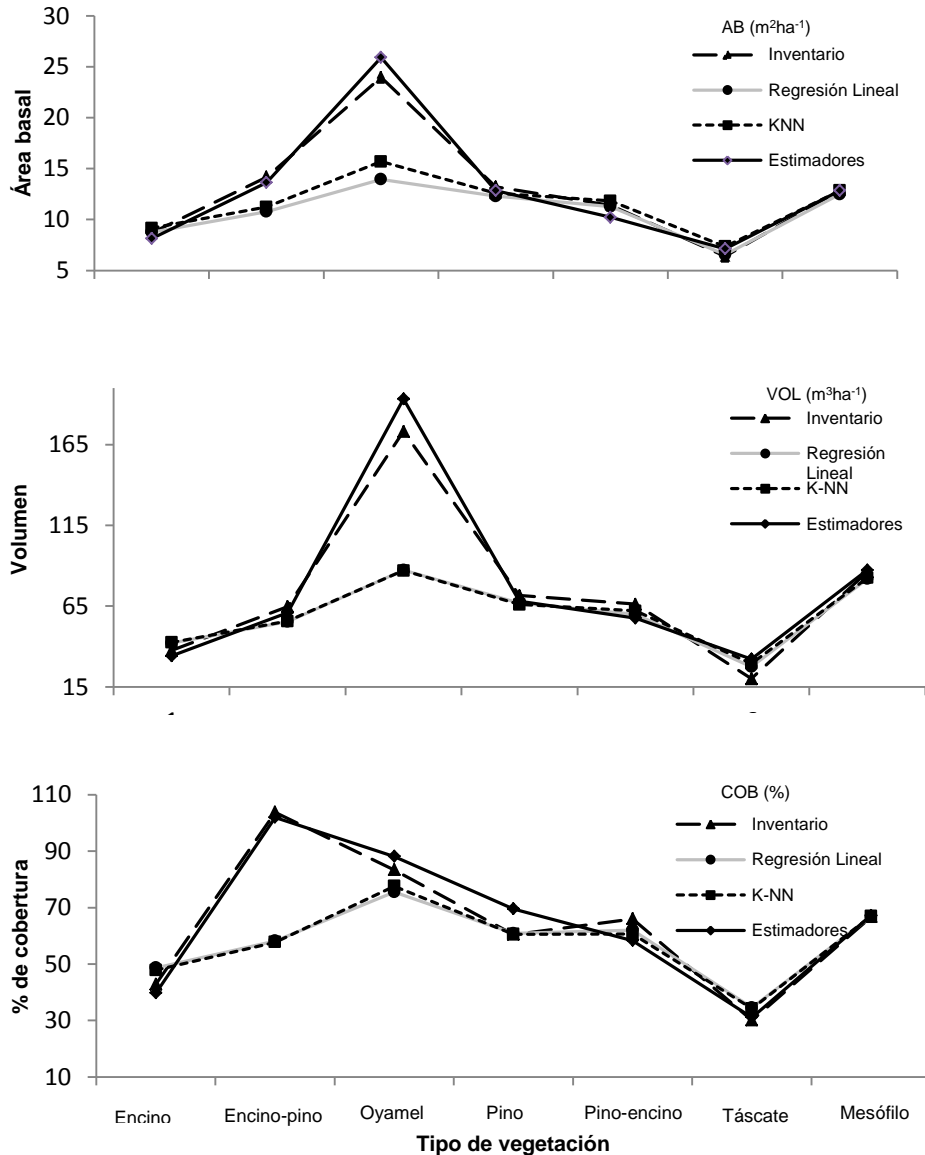


Figura 14. Comportamiento de las medias por tipo de vegetación estimadas a través del inventario convencional, K-nn, regresión lineal y estimadores de razón y regresión.

Las estimaciones para las variables forestales son consistentes en la mayoría de los tipos de vegetación, siendo las más optimistas las estimaciones del inventario convencional, seguidas por las estimaciones a través de los estimadores de razón y regresión y del método no paramétrico del K vecino mas cercano (K-nn) y más conservadoras las de la regresión lineal, sin embargo, como se observa en la Figura 14, el pico abrupto se refiere al bosque de encino-pino y bosque de oyamel, para las estimaciones mediante inventario convencional y estimadores de razón y regresión, este comportamiento puede ser explicado por el reducido número de conglomerados

tomados en la zona (11 para bosque de encino-pino y 4 para bosque de oyamel), asimismo por la información de reportada en los conglomerados y que está fuera de los intervalos de confianza al 95 % para AB (8.55 - 19.78 m²ha⁻¹ en bosque de encino-pino y 11.07 - 36.85 m²ha⁻¹ en bosque de oyamel), VOL (29.10 - 100.38 m³ha⁻¹ para bosque de encino-pino y 70.85-275.46 m³ha⁻¹ para bosque de oyamel) y COB (27.92 - 179 % para bosque de encino-pino y 26.17 - 140.51 % para bosque de oyamel), el rango de los valores reportados para bosque de encino-pino en AB es de 3.9 - 26.87 m²ha⁻¹, para volumen: 7 - 145 m³ha⁻¹ y para COB: 43-264 %, mientras que para el bosque de oyamel en AB es de 12 - 32 m²ha⁻¹, para VOL: 64 - 216 m³ha⁻¹ y finalmente para COB: 52 - >100 %).

Las estimaciones obtenidas mediante regresión lineal y K-nn son consideradas aceptables ya que se encuentran dentro del intervalo de confianza al 95% que presenta el inventario tradicional estratificado (bosque templado) y muestreo simple al azar (bosque mesófilo).

4.7 Estimación de error

El error a priori fue calculado mediante el RECM (Raíz del Error Cuadrático Medio) con los mismos datos del INFyS para la zona de estudio. En general de los dos métodos de percepción remota utilizados para la estimación del inventario, el método del K-nn presentó errores más bajos que las estimaciones realizadas con la regresión lineal.

Las estimaciones con la regresión lineal presentaron para el bosque templado un error de 6.70 m²ha⁻¹ para el AB, el VOL presentó un error de 41.45 m³ha⁻¹ y la COB 29.69 %. Hall *et al.* (2006) utilizando imágenes de satélite Landsat TM para el cálculo de datos estructurales como altura y cobertura arbórea para después calcular biomasa y volumen en bosques de Alberta, Canadá reportaron errores absolutos en volumen de 74.7 m³ha⁻¹, los cuales son mayores a los reportados en el presente estudio, mientras que para la cobertura los valores máximos promedio reportados son del 46 % en

comparación con los de la presente investigación que están por arriba del 50 % para bosque templado y 60 % para el bosque mesófilo en cualquiera de los métodos de percepción remota empelados. Los valores de RECM encontrados en esta investigación son parecidos a los encontrados en el trabajo de Aguirre-Salado *et al.* (2009), en donde reporta errores en sus estimaciones del año 2006 de $4.2 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ para AB y $57.71 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ para volumen en predios forestales de *p. patula* en el estado de Hidalgo.

Las estimaciones en el bosque mesófilo presentaron errores absolutos de $8.5 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ para AB, $79.14 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ para el VOL y 29 % para la COB. Como se observa existen diferencias muy marcadas entre los dos grupos de vegetación sobre todo en la variable forestal VOL, esto puede ser explicado por la variabilidad existente de especies en el bosque mesófilo. Castillo-Santiago *et al.* (2010), en su trabajo sobre la estimación de variables de la estructura forestal usando imágenes SPOT 5 en bosques lluviosos, encontró un RECM de $5.05 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ para área basal y $71.67 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ para volumen, estos resultados son similares a los encontrados en la presente investigación bajo el método de regresión lineal y K-nn.

El estimador no paramétrico K-nn presentó, para el bosque templado, errores absolutos muy parecidos a los obtenidos mediante modelos de regresión lineal ($6.63 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$, $40.55 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ y 29 % para AB, VOL y COB respectivamente). En cuanto al bosque mesófilo se encontraron errores de $8.25 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ para AB, $75.76 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ para VOL y 29.09 % para COB. Por otro lado Franco *et al.*, (2001), en su investigación utilizando el K-nn reporta valores similares, para AB un RECM de $8.5 \text{ m}^2\text{ha}^{-1}$ y $51.60 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ para VOL.

Algunos autores argumentan que el cálculo del error utilizando los mismos datos para la estimación tienden a ser demasiado optimistas, es decir, cuando la prueba de ensayo es la misma que la muestra de entrenamiento el estimador tiende a ser sesgado hacia abajo (Franco *et al.*, 2001). Esta forma de obtener el error es llamada estimación del error aparente (Efron and Tibshirani, 1993). A pesar de lo reportado por

la literatura se decidió utilizar esta forma de medir el error debido a que no se contó con parcelas de validación en campo.

5. CONCLUSIONES

Las bandas del verde, infrarrojo cercano e infrarrojo medio así como las transformaciones matemáticas basadas en estas bandas son las que mejor describieron a las variables forestales área basal, volumen y cobertura por lo cual se puede enfatizar su uso en cualquier plataforma satelital para inventarios de futuros trabajos.

Las correlaciones de las variables forestales del bosque templado y bosque mesófilo con los parámetros espectrales provenientes de la imagen, se encontraron en un rango de -0.58 a 0.50, siendo la variable forestal volumen (VOL) del bosque templado la que presentó la mayor correlación con el NDVI43 e IRM/IRC ($r^2 = -0.58$). En el bosque mesófilo la variable forestal que mejor se correlacionó fue el área basal (AB) con la banda del IRM ($r^2 = -0.47$).

Las estimaciones totales obtenidas mediante la regresión lineal, el estimador no paramétrico vecino más cercano (k-nn) y los estimadores de razón y regresión se consideran buenas y aceptables ya que se encuentran dentro del intervalo de confianza del inventario tradicional, sin embargo existen algunas desventajas que es preciso considerar, la regresión lineal puede ofrecer estimaciones negativas lo que puede reducir los cálculos de las estimaciones totales, las valoraciones totales del método de los estimadores de razón y regresión están cerca de las estimaciones del inventario convencional, sin embargo, no se puede plasmar en un mapa la variabilidad de la estructura forestal y el K-nn presenta la principal desventaja de requerir un gran esfuerzo computacional para su procesamiento.

Para hacer más consistentes las estimaciones y reducir el sesgo en los cálculos se recomienda utilizar escenas satelitales de un mismo periodo de tiempo (diferencia de no más de dos meses entre todas las imágenes), esto con el afán de reducir la variabilidad espectral en una región debida a los ángulos de la posición del sol y azimut de toma de la escena o a características atmosféricas particulares presentes en el momento de la captura de la imagen.

Los resultados obtenidos muestran que las imágenes de satélite y las técnicas de percepción remota son una buena opción para el monitoreo de los recursos forestales a una escala espacial grande y durante intervalos de tiempo mas cortos, con el fin de medir el estado y desarrollo de los bosques y cuantificar la cantidad de madera existente, biomasa y de esta manera generar proyectos por la captura de carbono.

Las estimaciones realizadas en el presente trabajo son consistentes con otros estudios realizados sobre la evaluación de parámetros forestales por lo que pueden ser consideradas como confiables además las imágenes SPOT 5 multiespectrales con 10 m de resolución son una buena opción para el mapeo de variables forestales ya que presentan un buen nivel de detalle y retienen un amplio rango de la variabilidad presente en la vegetación y que con otras plataformas satelitales de menor resolución se puede perder.

6. LITERATURA CITADA

- Administración de Parques Nacionales-Sistema de Información de Biodiversidad. 2005. Protocolo para el preprocesamiento de imágenes satelitales Landsat para aplicaciones de la Administración de Parques Nacionales. Buenos Aires. http://www.sib.gov.ar/archivos/Protocolo_Landsat.pdf, Consultada 10-08-2011.
- Aguirre-Salado, C. A., J. R. Valdez-Lazalde, G. Ángeles-Pérez, H. M. De los Santos-Posadas R. Haapanen, A. I. Aguirre-Salado. 2009. Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosques manejados de pino *patula* en Hidalgo, México. *Agrociencia* 43: 209-220.
- Baruah, P. J., T. Endo, T. Katsura and Y. Yasuoka. 2006. Estimating timber-volume in a commercial eucalyptus globulus Plantation: results from two approaches. In *Proceedings: Asian Conference of Remote Sensing, October 9-13, 2006, Ulaanbaatar, Mongolia*. 6 p.
- Begon, M., J. L. Harper and C. R. Townsend. 1990. *Ecology individuals, populations and communities*. 2a Ed. Blackwell Scientific Publications. Massachusetts. USA. pp. 47-121.
- Brown, L., J. M. Chen, S. G. Leblanc and J. Cihlar. 2000. A shortwave infrared modification to the simple ratio for LAI retrieval in boreal forests: An image and model analysis. *Remote Sensing of Environment* 71: 16–25.
- Castillo-Santiago, M. A., M. Ricker and B. H. J. de Jong. 2010. Estimation of tropical forest structure from SPOT-5 satellite images. *International Journal of Remote Sensing* 31: (10) 2767-2782.
- Chason, J. W., D. D. Baldocchi and M. A. Huston. 1991. A comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area. *Agricultural and Forest Meteorology* 57: 107-128.
- Curran, P. J., J. L. Dungan and H. L. Gholz. 1992. Seasonal LAI in Slash Pine Estimated with Landsat TM. *Remote Sensing of Environment* 39: 3-13.
- Chavez, P. S. 1996. Image-based atmospheric corrections—revisited and revised. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62 (9):1025-1036.
- Chen, J., and J. Cihlar. 1996. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images. *Remote Sensing of Environment* 55:153–162.

- Chen, J. M., S. G. Leblanc, J. R. Miller, J. Freemantle, S. E. Loechel, C. L. Walthall, K. A. Innanen, and H. P. White. 1999. Compact airborne spectrographic imager (CASI) used for mapping biophysical parameters of boreal forests. *Journal of Geophysical Research* 104 (D22), 27945–27958.
- Cohen, W. B., and S. Goward. 2004. Landsat's role in ecological applications of remote sensing. *Bioscience* 54(6): 535-545.
- CONAFOR, 2010. Inventario Nacional Forestal y de Suelos, manual y procedimientos para el muestreo de campo, remuestreo 2010. Zapopan, Jalisco, México. 140 p.
- De Gier A. 2003. A new approach to woody biomass assessment in woodlands and shrublands. In: P. Roy (ed.), *Geoinformatics for Tropical Ecosystems*, pp. 161–198, India.
- Dirección General del Inventario Nacional Forestal. 1976. Inventario Forestal del Estado de Hidalgo. México. Publicación Núm. 39. 62 p.
- Dykstra, D. P. 1984. *Mathematical programming for natural resource management*. McGraw-Hill Book Company. USA. 309 p.
- Eastman, J. R. 2001. *IDRISI for windows. User's Guide, version 3.2*. Clark Labs. 144 p.
- Efron, B., and R. J. Tibshirani. 1993. *An Introduction to the bootstrap*. New York, USA. Chapman and Hall. 436 p.
- ERDAS, Inc. 2011. *ERDAS IMAGINE 2011, Version 11.0.2*. USA.
- Fassnacht, K. S., S. T. Gower, J. M. Norman and R. E. Mcmurtrie. 1994. A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area in forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 71: 183-207.
- Fassnatch, K. S., S. T. Gower, M. D. MacKenzie, E. V. Nordheim, and T. M. Lillesand. 1997. Estimating the leaf area index of north central Wisconsin forests using the landsat thematic mapper. *Remote Sensing of Environment* 61: 229–245.
- Fazakas, Z., M. Nilsson and H. Olsson. 1999. Regional forest biomass and wood volume estimation using satellite data ancillary data. *Agricultural and Forest Meteorology* 98–99: 417–425.

- Franco, L. H., A. R. Ek and M. E. Bauer. 2001. Estimation and mapping of forest stand density, volume, and cover type using the k-nearest neighbors method. *Remote Sensing of Environment* 77: 25–274.
- Fontannaz, D. 2002. A new generation satellite, Spot 5 in orbit. *International Society of Photogrammetry and Remote Sensing* 7 (3): 30–32.
- Gallant, R. 1991. *An earth is vanishing forest*. McMillan Publishing Company, USA. pp. 28–49.
- García, E. - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 1998. 'Climas' (clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1 000 000. México.
- Gobron, N., B. Pinty, and M. M. Verstraete. 1997. Theoretical limits to the estimation of the leaf area index on the basis of visible and near-infrared remote sensing data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35, 1438–1445.
- Gong, P., R. Pu, and J. R. Miller. 1995. Coniferous forest leaf area index estimation along the Oregon transect using compact airborne spectrographic imager data. *PE and RS* 61: 1107–1117.
- Gong, P., R. Pu, G. S. Biging, M. R. Larrieu. 2003. Estimation of forest leaf area index using vegetation indices derived from Hyperion Hyperspectral Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41(6): 1355-1362.
- Haapanen, R. and A. Ek. 2001. *Software and Instructions for kNN Applications in Forest Resources Description and Estimation*. Department of Forest Resources College of Natural Resources and Agricultural Experiment Station. University of Minnesota. Staff paper series number 152. 19 p.
- Haapanen, R., K. Lehtinen, J. Miettinen, M. E. Bauer and A. R. Ek. 2002. Progress in adapting kNN methods for forest mapping and estimation using the new annual forest inventory and analysis data. In: *Proc. of Third Annual Forest Inventory and Analysis Symposium*. Traverse City, MI, Oct 17–19, 2001. USDA Forest Service General Technical Report NC-230. pp 87–95.
- 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 and Management* 225 (1-3): 378-390.

- Harris, R. 1987. Satellite remote sensing, an introduction. Routledge and Kegan Paul, London. 220 p.
- Heiskanen, J. 2006. Estimating aboveground tree biomass and leaf area index in a mountain birch forest using ASTER satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 27: 1135-1158.
- Hu, B., K. Inannen, and J. R. Miller. 2000. Retrieval of leaf area index and canopy closure from CASI data over the BOREAS flux tower sites. *Remote Sensing of Environment* 74: 255–274.
- INEGI. 2002. Uso del Suelo y Vegetación Escala 1: 250 000 Serie III, Información vectorial. México.
- INEGI. 2010a. Marco Geoestadístico versión 5.0. Áreas geoestadísticas estatales. Disponible en http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/M_Geoestadistico.aspx
- INEGI. 2010b. Anuario estadístico del estado de Hidalgo. Disponible en <<http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/aee05/estatal/hgo/index.ht>>
- Ingram, J. C., T. P. Dawson and R. J. Whittaker. 2005. Mapping tropical forest structure in southeastern Madagascar using remote sensing and artificial neural networks. *Remote Sensing of Environment* 94: 491–507.
- Instituto Nacional de investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP) - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 1995. 'Edafología'. Escalas 1:250 000 y 1:1 000 000. México.
- Jensen, J. R., F. Qiu and M. H. Ji .1999. Predictive modelling of coniferous forest age using statistical and artificial neural network approaches applied to remote sensor data. *International Journal of Remote Sensing* 20: 2805–2822.
- Johnston, C. A. 1998. *Geographic Information Systems in Ecology*. Blackwell. Science Ltd. London, UK. 239 p.
- Johnston, K., J. M. Ver Hoef, K. Krivoruchko and N. Lucas. 2001. *Using ARCGIS Geostatistical Analyst*. Environmental Systems Research Institute. USA. 310 p.

- Kimothi, M. M., S. Mohan, R. B. Singh, P. Soni, H. B. Vashistha and Ajai. 2009. Estimation of forest biophysical variables from Indian Earth Observation Satellite Cartosat-1 stereo data. *International Journal of Remote Sensing* 30 (2): 451-462.
- Leuschner, W. A. 1990. *Forest regulation, harvest scheduling and planning techniques*. John Wiley and sons. New York. USA. 281 p.
- Lillesand, T. M. and R. W. Kiefer. 2001. *Remote Sensing and image interpretation*. 4a. Ed. John Wiley and Sons, USA. 720 p.
- Lu, D., P. Mausel, E. Brondizio and E. Moran. 2004. Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. *Forest Ecology and Management* 198(1–3): 149–167.
- Lu, D. S. 2006. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing* 27(7): 1297–1328.
- Lu, D., M. Batistella, and E. Moran. 2008. Integration of Landsat TM and SPOT HRG Images for Vegetation Change Detection in the Brazilian Amazon. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 74(4): 421–430.
- Mäkelä, H., and A. Pekkarinen. 2004. Estimation of forest stand volumes by Landsat TM Imagery and stand-level field-inventory data. *Forest Ecology and Management* 196: 245-255.
- Merino, L. y G. Segura. 2002. El manejo de los recursos forestales en México, 1992 – 2002. Procesos, tendencias y políticas públicas. In: Leff, E., E. Ezcurra, I. Pizanty y L. P. Romero (Comp.). *La transición hacia el desarrollo sustentable. Prospectivas de América Latina y el Caribe*. INE. UAM. PNUMA. México. pp. 237–256.
- Moran, M. S., R. D. Jackson, P. N. Slater and P. M. Teillet. 1992. Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. *Remote Sensing of Environment* 41:169-184.
- NASA, 2012a. http://science-edu.larc.nasa.gov/EDDOCS/Wavelengths_for_Colors.html. Consultada 09-02-2012.
- NASA, 2012b. The Next Generation Earth Science Discovery Tool <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>. Consultado 10-08-2011.

- Nemani, R., L. L. Pierce, S. W. Running and L. Band. 1993. Forest ecosystem processes at the watershed scale: Sensitivity to remotely-sensed index estimates. *International Journal of Remote Sensing* 14: 2519– 2534.
- Neter, J., M. H. Kutner, C. J. Nachtsheim. and Wasserman. 1996. *Applied linear statistical models*. 4th Ed. IRWIN, pp. 233-237.
- Nilsson, M. 1997. *Estimation of Forest Variables Using Satellite Image Data and Airborne Lidar*. PhD dissertation, Swedish University of Agricultural Sciences. Umea, Sweden. 31 p.
- Pérez G., U. 2005. *La percepción remota*. Universidad de Tolima, LabSIG. España. 34 p.
- Pinedo A., A. 2008. *Modelación de atributos de bosques templados con Landsat TM y Spot-HRV e Índice de Sitio como indicador de productividad*. Tesis de Doctorado en Filosofía. Facultad de Zootecnia. Secretaría de Investigación y Posgrado. Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua, Chih., México. 78 p.
- Poulain, M., M. Peña, A. Schmidt, H. Schmidt and A. Schulte. 2010. Relationships between forest variables and remote sensing data in a *Nothofagus pumilio* forest. *Geocarto International* 25 (1): 25–43.
- Prodan, M., R. Peters, F. Cox and P. Real. 1997. *Mensura forestal*, Volumen 1 de Serie Investigación y educación en desarrollo sostenible. 1ª. IICA-Agroamérica. San José de Costa Rica. 586 p.
- Richards, J. A. and X. Jia. 1999. *Remote sensing digital image analysis*. 3a ed. Springer, Hong Kong. 355 p.
- Rock, B. N., J. E. Vogelmann, D. L. Williams, A. F. Vogelmann, and T. Hoshizaki. 1986. Remote detection of forest damage. *Bioscience* 36: 439-445.
- Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell and D. W. Deering. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, In: *Third ERTS Symposium*, NASA SP-351 I, Vol. I, 309–317 p.
- Ruiliang, Pu., and P. Gong. 2004. Wavelet transform applied to EO⁻¹ hyperspectral data for forest LAI and crown closure mapping. *Remote Sensing of Environment* 91: 212–224

- SAS, Institute Inc. 2004. SAS/IML Users guide, Version 9.1. Cary, N.C. SAS Institute Inc. 1031 p.
- Scheuber, M. 2010. Potentials and limits of the k-nearest-neighbour method for regionalising sample-based data in forestry. *European Journal of Forest Research* 129: 825-832.
- Shiver, B. D. and B. E. Borders. 1996. Sampling techniques for forest resource inventory. New York: John Wiley and Sons, pp. 126-128.
- Skirvin, S. M. 2000. Landsat 5 Atmospheric and Radiometric Correction, adapted from "Atmospheric and radiometric correction of Landsat TM 5 Data using the COST model of Chavez, 1996". Arizona Remote Sensing Center, Office of Arid Lands Studies, University of Arizona. 5 p.
- Soudani, K., C. François, G. Maire, V. Le Dantec and E. Dufrêne. 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.
- Speranza, F. C. y H. R. Zerda. 2005. Clasificación digital de coberturas vegetales a partir de datos satelitales multiespectrales. Actas VIII. Congreso Argentino de Ingeniería Rural (CADIR). Noviembre de 2005. Villa de Merlo. 10 p.
- Spot Image S. A. 2008. Spot image ask us for the earth <<http://www.spotimage.com/web/es/256-imagenes-spot.php>>
- Spot Image S. A. 2009. Ficha técnica Resolución y modos espectrales de las imágenes SPOT. 4 p.
- Stein, A., F. Van der Meer and B. Gorte. 1999. *Spatial Statistics for Remote Sensing*. Kluwer Academic Publishers. Hingham, MA, USA. 301 p.
- Steininger, M. K. 2000. Satellite estimation of tropical secondary forest aboveground biomass, data from Brazil and Bolivia. *International Journal of Remote Sensing* 21: 1139-1157.
- Stoddard, C. H. and G. M. Stoddard. 1987. *Essentials of Forestry Practice*. 4a ed. John Wiley and Sons, Inc. United States Of America. 375 p.

- Tian, X., Z. So, E. Chen, Z. Li. C. Van der Tol and J. Guo. 2012. Estimation of forest above-ground biomass using multi-parameter remote sensing data over a cold and arid area. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 14 (2012): 160–168.
- Thenkabail, P. S., E. A. Enclona, M. S. Ashton, C. Legg and M. J. De Dieu. 2004. Hyperion, IKONOS, ALI and ETM+ sensors in the study of African rainforests. *Remote Sensing of Environment* 90: 23-43.
- Tokola, T., J. Pitkânen, S. Partinen, and E. Muinonen. 1996. Point accuracy of a non-parametric method in estimation of forest characteristics with different satellite materials. *International Journal of Remote Sensing* 17 (12): 2333–2351.
- Torres, R. J. M. y O. S. T. Magaña. 2001. Evaluación de plantaciones forestales. Editorial. Limusa. México. 472 p.
- Trotter, C. and J. Dymond. 1997. Estimation of timber volume in a coniferous plantation forest using Landsat TM. *International Journal of Remote Sensing* 18 (10): 2209–2223.
- UNOOSA. 2005. Principles relating to remote sensing of the earth from outer space. United Nations Office for Outer Space Affairs. <http://www.osa.unvienna.org/SpaceLaw/rstxt.htm>.
- Valdez-Lazalde, J. R., M. J. González-Guillen, y H. M. De los Santos-Posadas. 2006. Estimación de cobertura arbórea mediante imágenes satelitales multiespectrales de alta resolución. *Agrociencia* 40: 383-394.
- Vienneau, A. 2001. Using ArcCatalog. Environmental Systems Research Institute. USA. 286 p.
- Waring, R. H., P. E. Schroeder and R. Oren. 1992. Application of the pipe model theory to predict canopy leaf area. *Canadian Journal of Forest Research* 12: 556-560.
- White, J. D., S. W. Running, R. Nemani, R. E. Keane and K. C. Ryan. 1997. Measurement and remote sensing of LAI in rocky mountain montane ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research* 27: 1714–1727.
- Wijaya, A., S. Kusnadi, R. Gloaguen and H. Heilmeyer. 2010. Improved strategy for estimating stem volume and forest biomass using moderate resolution remote sensing data and GIS. *Journal of Forestry Research* 21(1): 1–12.

Zeiler, M. 1999. Modeling our world. Environmental Systems Research Institute. USA.
199 p.

7. ANEXOS

ANEXO 1. Agrupación de las especies reportadas en el INFyS de la CONAFOR para el cálculo del volumen (VOL).

Genero	Especie	Grupo especies	Genero	Especie	Grupo especies
<i>Quercus</i>	<i>crassifolia</i>	Encinos	<i>Juniperus</i>	<i>depeana</i>	Hojosas
<i>Quercus</i>	<i>mexicana</i>	Encinos	<i>Juniperus</i>	<i>flascida</i>	Hojosas
<i>Quercus</i>	<i>castanea</i>	Encinos	<i>Acacia</i>	<i>farnesiana</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>laurina</i>	Encinos	<i>Acacia</i>	<i>micrantha</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>rugosa</i>	Encinos	<i>Acacia</i>	<i>pringlei</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>obtusata</i>	Encinos	<i>Acacia</i>	<i>berlandieri</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>rysophylla</i>	Encinos	<i>Acacia</i>	<i>pennatula</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>laeta</i>	Encinos	<i>Acacia</i>	<i>angustissima</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>polymorpha</i>	Encinos	<i>Alchornea</i>	<i>latifolia</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>xalapensis</i>	Encinos	<i>Allophylus</i>	<i>cominia</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>germana</i>	Encinos	<i>Alnus</i>	<i>zorullensis</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>affinis</i>	Encinos	<i>Alnus</i>	<i>glabrata</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>crassipes</i>	Encinos	<i>Alnus</i>	<i>acuminata</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>eduardii</i>	Encinos	<i>Annona</i>	<i>purpurea</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>diversifolia</i>	Encinos	<i>Arbutus</i>	<i>xalapensis</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>candicans</i>	Encinos	<i>Arbutus</i>	<i>glandulosa</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>tinkhamii</i>	Encinos	<i>Arbutus</i>	<i>tesselata</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>deserticola</i>	Encinos	<i>Arbutus</i>	<i>tesselata</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>laurifolia</i>	Encinos	<i>Ateleia</i>	<i>pteroarpa</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>dysophylla</i>	Encinos	<i>Bauhinia</i>	<i>divaricata</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>grisea</i>	Encinos	<i>Beilschmiedia</i>	<i>mexicana</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>glabrescens</i>	Encinos	<i>Brahea</i>	<i>dulcis</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>oleoides</i>	Encinos	<i>Buddleia</i>	<i>cordata</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>eugeniifolia</i>	Encinos	<i>Bursera</i>	<i>simaruba</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>peduncularis</i>	Encinos	<i>Bursera</i>	<i>morelensis</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>pringlei</i>	Encinos	<i>Bursera</i>	<i>cuneata</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>greggii</i>	Encinos	<i>Carpinus</i>	<i>caroliniana</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>sebifera</i>	Encinos	<i>Carpodiptera</i>	<i>ameliae</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>skinneri</i>	Encinos	<i>Carya</i>	<i>illinoensis</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>rubescens</i>	Encinos	<i>Carya</i>	<i>ovata</i>	Otras especies
<i>Quercus</i>	<i>acutifolia</i>	Encinos	<i>Cecropia</i>	<i>obtusifolia</i>	Otras especies
<i>Abies</i>	<i>religiosa</i>	Hojosas	<i>Cedrela</i>	<i>odorata</i>	Otras especies
<i>Cupressus</i>	<i>benthamii</i>	Hojosas	<i>Ceiba</i>	<i>pentandra</i>	Otras especies

Genero	Especie	Grupo especies	Genero	Especie	Grupo especies
Cupressus	<i>lusitanica</i>	Hojosas	<i>Cercis</i>	<i>canadensis</i>	Otras especies
Juniperus	<i>flaccida</i>	Hojosas	<i>Cercocarpus</i>	<i>fothergilloides</i>	Otras especies
Cercocarpus	<i>macrophyllus</i>	Otras especies	<i>Garrya</i>	<i>ovata</i>	Otras especies
Chione	<i>mexicana</i>	Otras especies	<i>Garrya</i>	<i>laurifolia</i>	Otras especies
Clethra	<i>mexicana</i>	Otras especies	<i>Gochnatia</i>	<i>hypoleuca</i>	Otras especies
Clethra	<i>macrophylla</i>	Otras especies	<i>Guazuma</i>	<i>ulmifolia</i>	Otras especies
Clethra	<i>kenoyeri</i>	Otras especies	<i>Hampea</i>	<i>nutricia</i>	Otras especies
Clethra	<i>pringlei</i>	Otras especies	<i>Harpalyce</i>	<i>arborescens</i>	Otras especies
Clethra	<i>alcoceri</i>	Otras especies	<i>Harpalyce</i>	<i>arborecens</i>	Otras especies
Cnidoscopus	<i>multilobus</i>	Otras especies	<i>Heliotta</i>	<i>parvifolia</i>	Otras especies
Coccoloba	<i>barbadensis</i>	Otras especies	<i>Heliocarpus</i>	<i>tomentosus</i>	Otras especies
Condalia	<i>mexicana</i>	Otras especies	<i>Heliocarpus</i>	<i>donnell-smithii</i>	Otras especies
Cornus	<i>excelsa</i>	Otras especies	<i>Heliocarpus</i>	<i>appendiculatus</i>	Otras especies
Crataegus	<i>rosei</i>	Otras especies	<i>Ilex</i>	<i>discolor</i>	Otras especies
Crataegus	<i>mexicana</i>	Otras especies	<i>Inga</i>	<i>vera</i>	Otras especies
Croton	<i>niveus</i>	Otras especies	<i>Inga</i>	<i>jinicuil</i>	Otras especies
Croton	<i>draco</i>	Otras especies	<i>Ipomoea</i>	<i>murucoides</i>	Otras especies
Cyathea	<i>fulva</i>	Otras especies	<i>Juglans</i>	<i>major</i>	Otras especies
Dalbergia	<i>palo-escrito</i>	Otras especies	<i>Juglans</i>	<i>mollis</i>	Otras especies
Daphnopsis	<i>mollis</i>	Otras especies	<i>Juglans</i>	<i>regia</i>	Otras especies
Decatropis	<i>bicolor</i>	Otras especies	<i>Leucaena</i>	<i>leucocephala</i>	Otras especies
Dendropanax	<i>arboreus</i>	Otras especies	<i>Leucaena</i>	<i>esculenta</i>	Otras especies
Diospyros	<i>riojae</i>	Otras especies	<i>Licaria</i>	<i>capitata</i>	Otras especies
Diphysa	<i>americana</i>	Otras especies	<i>Licaria</i>	<i>cervantesii</i>	Otras especies
Erythrina	<i>coralloides</i>	Otras especies	<i>Lindleyella</i>	<i>mespiloides</i>	Otras especies
Erythrina	<i>americana</i>	Otras especies	<i>Lippia</i>	<i>myriocephala</i>	Otras especies
Erythrina	<i>folkersii</i>	Otras especies	<i>Liquidambar</i>	<i>macrophylla</i>	Otras especies
Esenbeckia	<i>berlandieri</i>	Otras especies	<i>Lonchocarpus</i>	<i>rugosus</i>	Otras especies
Eysenhardtia	<i>polystachya</i>	Otras especies	<i>Luehea</i>	<i>candida</i>	Otras especies
Fagus	<i>mexicana</i>	Otras especies	<i>Lysiloma</i>	<i>acapulcensis</i>	Otras especies
Ficus	<i>petiolaris</i>	Otras especies	<i>Lysiloma</i>	<i>microphyllum</i>	Otras especies
Ficus	<i>pertusa</i>	Otras especies	<i>Lysiloma</i>	<i>divaricata</i>	Otras especies
Flourensia	<i>resinosa</i>	Otras especies	<i>Melia</i>	<i>azedarach</i>	Otras especies
Forestiera	<i>reticulata</i>	Otras especies	<i>Meliosma</i>	<i>dentata</i>	Otras especies
Forestiera	<i>phillyreoides</i>	Otras especies	<i>Morus</i>	<i>celtidifolia</i>	Otras especies
Fraxinus	<i>greggii</i>	Otras especies	<i>Myrcia</i>	<i>splendens</i>	Otras especies
Fuchsia	<i>arborescens</i>	Otras especies	<i>Myrica</i>	<i>cerifera</i>	Otras especies
Nectandra	<i>globosa</i>	Otras especies	<i>Sebastiania</i>	<i>pavoniana</i>	Otras especies
Nectandra	<i>salicifolia</i>	Otras especies	<i>Senna</i>	<i>atomaria</i>	Otras especies
Nectandra	<i>sanguinea</i>	Otras especies	<i>Spondias</i>	<i>purpurea</i>	Otras especies
Nolina	<i>parviflora</i>	Otras especies	Saurauia	<i>scabrida</i>	Otras especies

Genero	Especie	Grupo especies	Genero	Especie	Grupo especies
Nueva	<i>En identificación</i>	Otras especies	Schinus	<i>molle</i>	Otras especies
Nueva	<i>sp/conocida</i>	Otras especies	<i>Thouinia</i>	<i>paucidentata</i>	Otras especies
Nueva	<i>sp/desconocida</i>	Otras especies	<i>Ticodendron</i>	<i>incognitum</i>	Otras especies
Nueva	<i>en identificación</i>	Otras especies	<i>Tilia</i>	<i>mexicana</i>	Otras especies
Oreopanax	<i>xalapensis</i>	Otras especies	<i>Trema</i>	<i>micrantha</i>	Otras especies
Persea	<i>americana</i>	Otras especies	<i>Trichilia</i>	<i>havanensis</i>	Otras especies
Persea	<i>schiedeana</i>	Otras especies	<i>Trichospermum</i>	<i>mexicanum</i>	Otras especies
Phoebe	<i>ehrenbergii</i>	Otras especies	<i>Turpinia</i>	<i>occidentalis</i>	Otras especies
Piscidia	<i>piscipula</i>	Otras especies	<i>Ulmus</i>	<i>mexicana</i>	Otras especies
Pistacia	<i>mexicana</i>	Otras especies	<i>Vauquelinia</i>	<i>corymbosa</i>	Otras especies
Pithecellobium	<i>dulce</i>	Otras especies	<i>Vauquelinia</i>	<i>karwinskyi</i>	Otras especies
Plumeria	<i>rubra</i>	Otras especies	<i>Wimmeria</i>	<i>concolor</i>	Otras especies
Poulsenia	<i>armata</i>	Otras especies	<i>Yucca</i>	<i>filifera</i>	Otras especies
Prockia	<i>crucis</i>	Otras especies	<i>Yucca</i>	<i>elephantipes</i>	Otras especies
Prosopis	<i>laevigata</i>	Otras especies	<i>Zanthoxylum</i>	<i>elephantiasis</i>	Otras especies
Protium	<i>copal</i>	Otras especies	<i>Zinowiewia</i>	<i>concinna</i>	Otras especies
Prunus	<i>brachybotrya</i>	Otras especies	<i>Zuelania</i>	<i>guidonia</i>	Otras especies
Prunus	<i>serotina</i>	Otras especies	<i>Pinus</i>	<i>patula</i>	Pino
Pseudobombax	<i>ellipticum</i>	Otras especies	<i>Pinus</i>	<i>cembroides</i>	Pino
Psidium	<i>sartorianum</i>	Otras especies	<i>Pinus</i>	<i>cembra</i>	Pino
Psidium	<i>guajava</i>	Otras especies	<i>Pinus</i>	<i>montezumae</i>	Pino
Randia	<i>laetevirens</i>	Otras especies	<i>Pinus</i>	<i>teocote</i>	Pino
Rapanea	<i>myricoides</i>	Otras especies	<i>Pinus</i>	<i>greggii</i>	Pino
Rhamnus	<i>capraeifolia</i>	Otras especies	<i>Pinus</i>	<i>ocarpa</i>	Pino
Rhus	<i>schiedeana</i>	Otras especies	<i>Pinus</i>	<i>leiophylla</i>	Pino
Robinsonella	<i>cordata</i>	Otras especies	<i>Pinus</i>	<i>devoniana</i>	Pino
Salix	<i>bonplandiana</i>	Otras especies			
Sambucus	<i>nigra</i>	Otras especies			
Sapindus	<i>saponaria</i>	Otras especies			

ANEXO 2. Modelos Stepwise programados para la estimación de las variables forestales área basal (AB, m²ha⁻¹), volumen (VOL, m³ha⁻¹) y porcentaje de cobertura (COB, %) en el Modulo Model Maker de Erdas Imagine 2011.

1. Para el área basal (AB).

```
COMMENT "Generated from graphical model: c:/ab_regresion_stepwise_2007.gmd";
# CALCULO DE AREA BASAL CON REGRESION STEPWISE PARA 2007
# AREA BASAL CALCULADA CON REGRESIÓN STEPWISE
# IMAGENES DE ENTRADA
# VERDE
#
# set cell size for the model
#
SET CELLSIZE MIN;
#
# set window for the model
#
SET WINDOW UNION;
#
# set area of interest for the model
#
SET AOI NONE;
#
# declarations
#
Float RASTER n1_bostem_ndvi21 FILE OLD PUBINPUT NEAREST NEIGHBOR AOI NONE
"c:/ndvi21.img";
Float RASTER n45_ab_reg__2007 FILE NEW PUBOUT IGNORE 0 ATHEMATIC FLOAT SINGLE
"c:/ab_reg_steprom_2007.img";
Float RASTER n63_bostem_sr_irm_irc FILE OLD PUBINPUT NEAREST NEIGHBOR AOI NONE
"c:/bostem_sr_irm_irc.img";
Float RASTER n66_bostem_moshgo_09 FILE OLD PUBINPUT NEAREST NEIGHBOR AOI NONE
"c:/bostem_moshgo_09.img";
{
#
# function definitions
#
#define n69_memory Float(-93.98174 × $n66_bostem_moshgo_09(1))
#define n65_memory Float(-16.061 × $n63_bostem_sr_irm_irc)
#define n64_memory Float(43.95468 × $n1_bostem_ndvi21\
\
)
#define n24_memory Float(28.55534 +($n69_memory)+ ($n64_memory) + ($n65_memory)\
)
n45_ab_reg_steprom_2007_zero = EITHER 0 IF ($n24_memory <= 0) OR $n24_memory
OTHERWISE;
}
QUIT;
```

2. Para volumen (VOL).

```
COMMENT "Generated from graphical model: c:/
/vol_regresion_stepwise_promedios_2007_zero.gmd";
# CALCULO DE VOLUMEN CON REGRESION STEPWISE PARA 2007 PROMEDIOS
# VOLUMEN CALCULADO CON REGRESIÓN STEPWISE
# IMAGENES DE ENTRADA
# VERDE
#
# set cell size for the model
#
SET CELLSIZE MIN;
#
# set window for the model
#
SET WINDOW UNION;
#
# set area of interest for the model
#
SET AOI NONE;
#
# declarations
#
Float RASTER n1_bostem_ndvi43 FILE OLD PUBINPUT NEAREST NEIGHBOR AOI NONE
"c:/bostem_ndvi43.img";
Float RASTER n45_vol_reg_steprom_2007_zero FILE DELETE_IF_EXISTING PUBOUT IGNORE 0
ATHEMATIC FLOAT SINGLE "c:/vol_reg_steprom_2007_zero.img";
Float RASTER n63_bostem_ndvi21 FILE OLD PUBINPUT NEAREST NEIGHBOR AOI NONE
"c:/bostem_ndvi21.img";
Float RASTER n66_bostem_moshgo_09 FILE OLD PUBINPUT NEAREST NEIGHBOR AOI NONE
"c:/bostem_moshgo_09.img";
{
#
# function definitions
#
#define n69_memory Float(-540.44749 × $n66_bostem_moshgo_09(1))
#define n65_memory Float(267.30808 × $n63_bostem_ndvi21)
#define n64_memory Float(-234.44883 × $n1_bostem_ndvi43\
\
)
#define n24_memory Float(57.82237 +($n69_memory)+ ($n64_memory) + ($n65_memory)\
)
n45_vol_reg_steprom_2007_zero = EITHER 0 IF ($n24_memory <= 0) OR $n24_memory
OTHERWISE;
}
QUIT;
```

3. Para porcentaje de cobertura (COB).

```
COMMENT "Generated from graphical model:
c:/cob_regresion_stepwise_promedios_2007_zero.gmd";
# CALCULO DE PORCENTAJE DE COBERTURA CON REGRESION STEPWISE PARA 2007
PROMEDIOS
# PORCENTAJE DE COBERTURA CALCULADO CON REGRESIÓN STEPWISE
# IMAGENES DE ENTRADA
# VERDE
#
# set cell size for the model
#
SET CELLSIZE MIN;
#
# set window for the model
#
SET WINDOW UNION;
#
# set area of interest for the model
#
SET AOI NONE;
#
# declarations
#
Float RASTER n45_cob_reg_steprom_2007_zero_2v FILE NEW PUBOUT IGNORE 0 ATHEMATIC
FLOAT SINGLE "c:/cob_reg_steprom_2007_zero_2v.img";
Float RASTER n66_bostem_gndvi FILE OLD PUBINPUT NEAREST NEIGHBOR AOI NONE
"c:/bostem_gndvi.img";
{
#
# function definitions
#
#define n69_memory Float(187.52583 × $n66_bostem_gndvi(1))
#define n24_memory Float(-55.43561 +($n69_memory)\
)
n45_cob_reg_steprom_2007_zero_2v = EITHER 0 IF ($n24_memory < 0) OR $n24_memory
OTHERWISE;
}
QUIT;
```