



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO FORESTAL

**MODELADO ESPACIAL DE LOS RECURSOS
FORESTALES EN EL EJIDO DE ATOPIXCO, ESTADO
DE HIDALGO.**

PRESENTA:

ISIDRO AHMED CRUZ LEYVA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2008

La presente tesis titulada "MODELADO ESPACIAL DE LOS RECURSOS FORESTALES EN EL EJIDO DE ATOPIXCO, ESTADO DE HIDALGO" realizada por Isidro Ahmed Cruz Leyva, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para la obtención del grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS
FORESTAL**

Consejo Particular

Consejero:



Dr. Héctor Manuel de los Santos Posadas

Asesor:



Dr. José René Valdez Lazalde

Asesor:



Dr. Gregorio Angeles Pérez

Asesor:



Dr. Fabián Islas Gutiérrez

Montecillo, Texcoco, Estado de México, junio de 2008.

El presente trabajo se llevó a cabo bajo el financiamiento del Fondo Sectorial de Investigación para la Educación SEP-CONACYT otorgados al proyecto "44872: Dinámica y Productividad del Bosque Mesófilo de Montaña en la Sierra Hidalguense"

Agradecimientos

Al Dr. René Valdez Lazalde, mi Director de Tesis, por haberme concedido la oportunidad de ingresar al Postgrado Forestal y así completar mi instrucción académica; por su confianza e invaluable apoyo.

Al Dr. Héctor Manuel de los Santos Posadas, mi Profesor Consejero, por su infinita paciencia y amabilidad; por compartir generosamente su conocimiento y por haberme aceptado como su pupilo.

Al Dr. Gregorio Ángeles Pérez, mi Profesor Consejero, por su apoyo y paciencia; no tengo palabras para agradecer el que me haya dado la oportunidad de trabajar a su lado; por sus enseñanzas y confianza en mí.

Al Dr. Fabián Islas Gutiérrez, también mi Profesor Consejero, por su invaluable apoyo y paciencia. Gracias por haber confiado, sin dudar un instante, en mi trabajo y capacidad.

Al Dr. Salvador Sánchez Colón, mi mentor y guía, quien me mostró que la vida es un océano de oportunidades que puedo cruzarse con la ayuda del conocimiento, la confianza y el honor. Gracias por el regalo de su amistad y sabiduría.

Al Dr. Ricardo Rodríguez Estrella, también mi mentor y guía, quien confió en mí y me enseñó que más allá de la mirada se vislumbra un lejano horizonte, un nuevo mañana. Gracias por el regalo de su amistad y sabiduría.

Al M. en C. Ricardo González Rivera, también mi mentor y guía, por su invaluable apoyo en los buenos momentos y sobre todo en los tiempos más difíciles de mi vida. Gracia por el regalo de su amistad y valiosos consejos.

A mi amada familia quien siempre ha confiado en mi juicio y siempre me ha dado su ayuda, cariño y comprensión. Muchas gracias.

A los habitantes de los Ejidos “Atopixco” y “La Mojonera” en especial a Jesús Hernández y Lucio Serrano; sin su guía y ayuda desinteresada no habría terminado el trabajo de campo. Muchas gracias.

A mis muy queridos amigos: Saúl Ugalde Lezama y Carlos Arturo Aguirre Salado. Su amistad dio sentido a mi vida y su apoyo me dio el regalo de completar mi formación profesional.

A todos mis Maestros, Amigos y Compañeros del Colegio de Postgraduados. Muchas gracias por todo.

CONTENIDO

Índice de figuras.....	IV
Índice de cuadros.....	VII
Resumen general.....	IX
General summary.....	X

Capítulo 1. Introducción general

1.1. Presentación.....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. Objetivo general.....	3
1.2.2. Objetivos particulares.....	3
1.3. Antecedentes.....	3
1.3.1. Los sistemas de información geográfica.....	3
1.3.2. La percepción remota y los sensores remotos.....	5
1.3.3. El sensor remoto SPOT.....	8
1.3.3.1. Características especiales del SPOT.....	9

Capítulo 2. Modelación espacial del índice de área foliar y cobertura en bosques manejados de *Pinus patula* y *Pinus teocote* en el Ejido Atopixco, Hidalgo.

Resumen.....	12
Abstract.....	13
2.1. Introducción.....	14
2.2. Materiales y Métodos.....	16
2.2.1. Área de estudio.....	16
2.2.2. Adquisición y procesamiento en gabinete de datos de campo.....	18
2.2.2.1. Estimación del índice de área foliar (en sitio y alométrico) y cobertura arbórea.....	19
2.2.2.2. Procesamiento de información espectral (SPOT5 HRG).....	21
2.2.2.3. Generación del sistema de información geográfica.....	25
2.2.2.4. Análisis de correlación y regresión stepwise.....	26
2.2.2.5. Observaciones aberrantes y puntos de influencia.....	27
2.3. Resultados y Discusión.....	29
2.3.1. Descripción ecológica del índice de área foliar y la cobertura arbórea.....	29
2.3.2. Relación de la cobertura (COB) vs. variables cartográficas y espectrales.....	32
2.3.2.1. Modelado espacial de la cobertura.....	36
2.3.3. Relación del índice de área foliar en sitio (LAI5) vs. variables cartográficas y espectrales.....	39
2.3.3.1. Modelado del índice de área foliar en sitio.....	43
2.3.4. Relación del índice de área foliar alométrico (LAIAL) vs. variables cartográficas y espectrales.....	46
2.3.4.1. Modelado del índice de área foliar alométrico....	49
2.4. Conclusiones.....	52

Capítulo 3. Modelación espacial de área basal y volumen de madera en bosques manejados de *Pinus patula* y *Pinus teocote* en el Ejido Atopixco, Hidalgo.

Resumen.....	54
Abstract.....	55
3.1. Introducción.....	56
3.2. Materiales y Métodos.....	57
3.2.1. Área de estudio.....	57
3.2.2. Adquisición y procesamiento en gabinete de datos de campo.....	59
3.2.2.1. Inventario forestal.....	61
3.2.2.2. Procesamiento de información espectral (SPOT5 HRG).....	63
3.2.2.3. Generación del sistema de información geográfica.....	65
3.2.2.4. Análisis de correlación y regresión stepwise	65
3.3. Resultados y Discusión.....	67
3.3.1. Relación del área basal y la cobertura arbórea, variables cartográficas, variables espectrales e índices de área foliar.....	70
3.3.1.1. Modelado espacial del área basal.....	75
3.3.1.2. Comparación de las estimaciones de inventario para área basal.....	82
3.3.2. Relación del volumen de madera y la cobertura arbórea, variables cartográficas, variables espectrales e índices de área foliar.....	83
3.3.2.1. Modelado del volumen de madera.....	87
3.3.2.2. Comparación de las estimaciones de inventario para volumen de madera.....	94
3.4. Conclusiones.....	95

Capítulo 4. Discusión general y conclusiones

4. Discusión y conclusiones generales.....	98
5. Literatura citada.....	102

Índice de figuras

Capítulo I

Figura 1.	Funciones lógicas de un Sistema de Información Geográfica (<i>SIG</i>).....	4
Figura 2.	Ejemplo de la reflectancia para algunas coberturas.....	7
Figura 3.	Las bandas espectrales del sensor HRV y sus aplicaciones generales.....	9
Figura 4.	Características del sistema SPOT 1, 2, 3, 4 y 5, con sus modos.....	11

Capítulo II

Figura 1.	Ubicación de Ejido Atopixco, Municipio de Zacualtipán de Ángeles.....	16
Figura 2.	Ubicación de rodales bajo manejo forestal, Ejido Atopixco. Composición RGB (432) con los rodales sobrepuestos, imágenes año 2006. Los números indican el año de cosecha. La edad del rodal se calcula restando al año actual la edad de cosecha.....	18
Figura 3.	Paquete Gap Light Analyzer (a), ejemplo de fotografía hemisférica (b) y lente hemisférico montado en soporte magnético (c).....	20
Figura 4.	Curvas patrón para obtener el factor de corrección L (Huete <i>et al.</i> , 1988).....	25
Figura 5.	Distribución por clases de <i>DAP</i> de 1 cm de amplitud de los individuos del estrato arbóreo, Ejido Atopixco.....	30
Figura 6.	Correlación de la cobertura arbórea (<i>COB</i>) vs. área basal del estrato arbóreo.....	33
Figura 7.	Distribución del porcentaje de cobertura arbórea en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 1 para cobertura (<i>COB</i>).....	37
Figura 8.	Distribución del porcentaje de cobertura arbórea en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 3 para cobertura (<i>COB</i>).....	38
Figura 9.	Correlación del índice de área foliar en sitio (<i>LAI5</i>) vs. área basal del estrato arbóreo.....	41
Figura 10.	Distribución del índice de área foliar en sitio en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 5 para área foliar (<i>LAI5</i>).....	44
Figura 11.	Distribución del índice de área foliar en sitio en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 6 para área foliar (<i>LAI5</i>).....	45

Figura 12.	Correlación del índice de área foliar alométrico (<i>LAI/AL</i>) vs. área basal del estrato arbóreo.....	47
Figura 13.	Distribución del índice de área foliar alométrico en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 7 para área foliar (<i>LAI/AL</i>).....	49
Figura 14.	Distribución del índice de área foliar alométrico en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 8 para área foliar (<i>LAI/AL</i>).....	51

Capítulo III

Figura 1.	Ubicación de Ejido Atopixco, Municipio de Zacualtipán de Ángeles.....	57
Figura 2.	Ubicación de rodales bajo manejo forestal, Ejido Atopixco. Composición RGB (432) con los rodales sobrepuestos, imágenes año 2006. Los números indican el año de cosecha. La edad del rodal se calcula restando al año actual la edad de cosecha.....	59
Figura 3.	Adquisición de datos en campo, Ejido Atopixco.....	60
Figura 4.	Relaciones postuladas en las variables X e Y.....	62
Figura 5.	Distribución del área basal (<i>AB</i>) por hectárea del estrato arbóreo, Ejido Atopixco.....	68
Figura 6.	Relación volumen de madera (<i>VOL</i>) y área basal (<i>AB</i>) del estrato arbóreo, Ejido Atopixco.....	69
Figura 7.	Correlación del área basal (<i>AB</i>) y A) porcentaje de cobertura arbórea (<i>COB</i>), B) índice de área foliar en sitio (<i>LAI/5</i>), C) índice de área foliar alométrico (<i>LAI/AL</i>) del estrato arbóreo.....	76
Figura 8.	Distribución del área basal (m^2/ha) en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 1 para cobertura arbórea (<i>COB</i>).....	76
Figura 9.	Distribución del área basal (m^2/ha) en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 2 para índice de área foliar en sitio (<i>LAI/5</i>).....	77
Figura 10.	Distribución del área basal (m^2/ha) en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 3 para índice de área foliar alométrico (<i>LAI/AL</i>).....	78
Figura 11.	Distribución del área basal (m^2/ha) en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 4 para variables cartográficas.....	81
Figura 12.	Distribución del volumen de madera (m^3/ha) en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 5 para cobertura arbórea (<i>COB</i>).....	88

Figura 13.	Distribución del volumen de madera (m^3/ha) en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 6 para índice de área foliar en sitio (<i>LAI5</i>).....	89
Figura 14.	Correlación del volumen de madera (<i>VOL</i>) y A) porcentaje de cobertura arbórea (<i>COB</i>), B) índice de área foliar en sitio (<i>LAI5</i>), C) índice de área foliar alométrico (<i>LAI/AL</i>) del estrato arbóreo.....	90
Figura 15.	Distribución del volumen de madera (m^3/ha) en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 7 para índice de área foliar en alométrico (<i>LAI/AL</i>).....	91
Figura 16.	Distribución del volumen de madera (m^3/ha) en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 8 para variables cartográficas.....	92

Índice de cuadros

Capítulo II

Cuadro 1.	Parámetros de la escena SPOT 5.....	21
Cuadro 2.	Valores estructurales promedio e Índice de Valor de Importancia (IVIR) para las especies arbóreas del bosque manejado en el Ejido Atopixco, Hidalgo.....	29
Cuadro 3.	Valores estructurales promedio e índices de área foliar en sitio (LAI5), alométrico (LAIAL) y cobertura del dosel arbóreo (COB). Valores máximos en naranja encendido, valores mínimos en azul.....	31
Cuadro 4.	Correlación de Pearson para los pares de variables respuesta y predictoras..	32
Cuadro 5.	Significancia ($P < 0.001$) del análisis de varianza (ANOVA) y estimadores de los parámetros β_i	34
Cuadro 6.	Correlación de Pearson para los pares de variables respuesta y predictoras..	39
Cuadro 7.	Significancia ($P < 0.001$) del análisis de varianza (ANOVA) y estimadores de los parámetros β_i	40
Cuadro 8.	Correlación de Pearson para los pares de variables respuesta y predictoras..	46
Cuadro 9.	Significancia ($P < 0.001$) del análisis de varianza (ANOVA) y estimadores de los parámetros β_i	47

Capítulo III

Cuadro 1.	Parámetros de la escena SPOT 5.....	64
Cuadro 2.	Valores estructurales promedio por hectárea de área basal (AB) y volumen de madera (VOL) Valores máximos en naranja encendido, valores mínimos en azul.....	67
Cuadro 3.	Estimadores por sitio de 400 m ² , en muestreo simple aleatorio (MSA) y muestreo estratificado aleatorio (MEA).....	68
Cuadro 4.	Estimadores por sitio de 400 m ² , en muestreo por regresión (MRR).....	69
Cuadro 5.	Correlación de Pearson para los pares de variables respuesta y predictoras.	71
Cuadro 6.	Significancia ($P < 0.001$) del análisis de varianza (ANOVA) y estimadores de los parámetros β_i	72
Cuadro 7.	Comparación de las estimaciones de área basal (m ² /ha) con inventario tradicional y con inventario por SIG. Intervalos de confianza (IC) al 95% de significancia estadística.....	82

Cuadro 8.	Correlación de Pearson para los pares de variables respuesta y predictoras.	84
Cuadro 9.	Significancia ($P < 0.001$) del análisis de varianza (ANOVA) y estimadores de los parámetros β_i	85
Cuadro 10.	Comparación de las estimaciones de volumen de madera (m^3/ha) con inventario tradicional y con inventario por SIG. Intervalos de confianza (IC) al 95% de significancia estadística.....	94

MODELADO ESPACIAL DE LOS RECURSOS FORESTALES EN EL EJIDO DE ATOPIXCO, ESTADO DE HIDALGO.

Isidro Ahmed Cruz Leyva, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2008.

Resumen general

En este trabajo se modeló el $LAI5$ (m^2/m^2), el $LAIAL$ (m^2/m^2), y la COB utilizando variables cartográficas y espectrales. Se observó que la COB se relaciona con la Precipitación Media en Secas ($PMANA$) y su cuadrado ($PMANA2$), Precipitación Media Anual en Lluvias ($PMAMO$), Temperatura Máxima ($TMAX$) y su cuadrado ($TMAX2$), y la Banda 4 ($B4$) ($P < 0.001$, $R^2 = 0.66$). El $LAI5$ se relaciona con la Precipitación Media en Secas ($PMANA$) y su cuadrado ($PMANA2$), Precipitación Media Anual en Lluvias ($PMAMO$), Temperatura Máxima ($TMAX$) y su cuadrado ($TMAX2$), y la Banda 4 ($B4$) ($P < 0.001$, $R^2 = 0.71$). El $LAIAL$ se relaciona con Precipitación Media en Lluvias ($PMAMO$) y su cuadrado ($PMAMO2$), Precipitación Media Anual en Secas ($PMANA$), Temperatura Máxima ($TMAX$) y su cuadrado ($TMAX2$), y Pendiente del Suelo ($PENDIENTE$) ($P < 0.001$, $R^2 = 0.61$).

De forma paralela con las variables cartográficas, espectrales y biofísicas ($LAI5$, $LAIAL$ y COB) se modeló el AB (m^2/ha) y el VOL (m^3/ha). Se observó que el AB se relaciona con $LAIAL$, Temperatura Media Anual (TMA), $ALTITUD$ y la Banda 4 ($P < 0.001$, $R^2 = 0.97$). En este mismo sentido el VOL se relaciona fuertemente con $LAIAL$, Temperatura Media Anual (TMA) y $ALTITUD$ ($P < 0.001$, $R^2 = 0.88$). Finalmente se obtuvo un inventario forestal para AB y VOL . Para AB los modelos espaciales estiman una media de 12.16 a 20.47 m^2/ha ; para VOL se estima una media de 126.58 a 233.11 m^3/ha . Los resultados por modelación espacial concordaron con los obtenidos por la validación en campo (22.54 m^2/ha y 118.89 m^3/ha , respectivamente).

Palabra clave: Modelado Espacial, Variables Cartográficas, Variables Espectrales, SIG, Variables Biofísicas, Inventario Forestal.

**SPATIAL MODELLING OF FOREST RESOURCES IN THE ATOPIXCO EJIDO,
STATE OF HIDALGO**

**Isidro Ahmed Cruz Leyva, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2008.**

General summary

LAI5 (m^2/m^2), *LAIAL* (m^2/m^2) and *COB* were modelled using GIS and spectral variables. *COB* was found to be related to mean precipitation during the dry season (*PMANA*), its quadratic component (*PMANA2*), mean precipitation during the rainy season (*PMAMO*), maximum temperature (*TMAX*), its quadratic component (*TMAX2*), and band 4 reflectance (*B4*) ($P < 0.001$, $R^2 = 0.66$). *LAI5* is related to mean precipitation during the dry season (*PMANA*), its quadratic component (*PMANA2*), mean precipitation during the rainy season (*PMAMO*), maximum temperature (*TMAX*), its quadratic component (*TMAX2*), and Band 4 reflectance (*B4*). *LAIAL* is related to mean precipitation during the rainy season (*PMAMO*), its quadratic component (*PMAMO2*), mean precipitation during the dry season (*PMANA*), maximum temperature (*TMAX*), its quadratic component (*TMAX2*), and slope angle (*PENDIENTE*) ($P < 0.001$, $R^2 = 0.61$).

AB (m^2/ha) and *VOL* (m^3/ha) were modelled based on GIS, spectral and biophysical variables (*LAI5*, *LAIAL* y *COB*). *AB* is related to *LAIAL*, mean annual temperature (*TMA*), *ALTITUD* and Band 4 reflectance ($P < 0.001$, $R^2 = 0.97$). On the other hand, *VOL* is strongly related to *LAIAL*, mean annual temperature (*TMA*) and *ALTITUD* ($P < 0.001$, $R^2 = 0.88$).

A forest inventory was conducted to estimate *AB* y *VOL*. Our spatial models predict *AB* average values ranging between 12.16 and 20.47 m^2/ha , and *VOL* average values ranging between 126.58 a 233.11 m^3/ha . These results are in good agreement with the values obtained in the field (22.54 m^2/ha and 118.89 m^3/ha , respectively).

Key words: Spatial modelling, GIS variables, spectral variables, GIS, biophysical variables, forest inventory.

Capítulo 1. Introducción general

1.1. Presentación

La importancia económica de los bosques es considerable y más para países en vías de desarrollo como México. Tradicionalmente se ha prestado mucha atención a los aspectos relacionados con la producción de madera, pero en años recientes se ha dado mayor énfasis a estudios sobre la dinámica natural de ecosistemas forestales, actividad fuertemente ligada a parámetros forestales obtenidos durante la elaboración de los planes de manejo con fin maderable. El área basal (*AB*), el volumen de madera (*VOL*), las variables biofísicas de cobertura arbórea (*COB*) e índices de área foliar (*LAIs*) son parámetros de gran importancia para el manejo forestal, en particular para la silvicultura e inventarios forestales. En ecología aplicada, el conocimiento del área basal y el volumen de madera contribuyen al control de la composición, densidad, estructura, protección, recuperación de áreas no productivas, de la duración del turno u horizonte de planeación y conservación de la calidad del sitio. Por su parte, el estudio de la cobertura e índice de área foliar ayuda a comprender el flujo de energía (productividad) y la dinámica de claros (*GAP*) en bosques (Dykstra, 1984; Gallant, 1991; Merino y Segura, 2002; Trotter *et al.*, 1997).

Conocer estos parámetros es de utilidad en el proceso de manejo forestal a escala local (predio, propiedad); sin embargo a escala regional se necesita de otras herramientas de información que permitan evaluar estos parámetros de manera confiable. Un Sistema de Información Geográfica (*SIG*) - definido como un conjunto de herramientas con capacidades específicas para manejar, representar, analizar y modelar espacialmente información geográfica - puede apoyar esta tarea. Un *SIG* almacena información espacial que puede ser actualizada o manipulada con el mínimo esfuerzo además de que a través de él es posible generar modelos cartográficos (Johnston *et al.*, 2001; Vienneau, 2001). Por otro lado, con el advenimiento de los sensores remotos para evaluar la cobertura y el uso de suelo es posible la elaboración de estudios a nivel regional con una precisión considerable (Lillesand y Kiefer, 2001; Pérez, 2005; Richards y Jia, 1999).

El propósito de este trabajo es coadyuvar a la comprensión de cómo variables cartográficas amalgamadas en un SIG y variables espectrales capturadas con la plataforma SPOT 5 HRG pueden predecir la distribución y variaciones locales en cobertura arbórea (*COB*), índice de área foliar en sitio (*LAI5*) y alométrico (*LAI/AL*), área basal (*AB*) y volumen de madera (*VOL*). Esto con el fin de aportar herramientas que faciliten la administración racional de los recursos naturales forestales.

El reporte está organizado en cuatro capítulos, siendo los capítulos 2 y 3 los que recogen la contribución esencial del trabajo:

El Capítulo 1, "Introducción general" describe la importancia y justificación de realizar este tipo de estudios.

El Capítulo 2, "Modelación espacial del índice de área foliar y cobertura en bosques manejados de *Pinus patula* y *Pinus teocote* en el Ejido Atopixco, Hidalgo", muestra como se puede estimar la cobertura arbórea e índice de área foliar a través de la modelación espacial, utilizando regresión lineal múltiple.

El Capítulo 3, "Modelación espacial de área basal y volumen de madera en bosques manejados de *Pinus patula* y *Pinus teocote* en el Ejido Atopixco, Hidalgo", muestra como la modelación espacial, utilizando regresión lineal múltiple, puede ayudar a obtener inventarios forestales de área basal y volumen de madera.

Finalmente, en el Capítulo 4, "Discusión general y conclusiones", se da una conclusión general de los resultados obtenidos por esta investigación.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El objetivo de este trabajo es describir el estado actual de algunas variables dasométricas de un bosque manejado de *Pinus patula* y *Pinus teocote* en el Ejido Atopixco, Hidalgo; por medio de técnicas de modelado espacial.

1.2.2. Objetivos particulares

1. Modelar la distribución geográfica de la cobertura arbórea e índice de área foliar de las principales especies arbóreas comerciables.
2. Modelar la distribución geográfica del área basal y volumen de madera de las principales especies arbóreas comerciables.
3. Obtener un inventario forestal del área basal y volumen de madera a través de la modelación espacial.

1.3. Antecedentes

1.3.1. Los sistemas de información geográfica

Un Sistema de Información Geográfica (*SIG*) es 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. Lo cual permite contestar ¿Qué es?, ¿Cuánto es?, ¿Con qué se relaciona? y ¿donde está un objeto? (Eastman, 2001; Zeiler, 1999).

El *SIG* tiene la capacidad para transformar la información espacial original y responder a interrogantes diversas a través de la creación de modelos (Kennedy y Kopp, 2000; Tucker, 2000).

Las respuestas proporcionadas por un *SIG* pueden ser categorizadas en tres grupos (Eastman, 2001; Kennedy y Kopp, 2000):

- ☉ La presentación cruda de información de acuerdo a una base de datos; por ejemplo, un mapa de una zona urbana.
- ☉ Patrones de conducta de la información; por ejemplo, un mapa de expansión urbana, donde se ilustre las distintas épocas de desarrollo.
- ☉ Una predicción sobre el comportamiento de la información; por ejemplo, el cambio de uso de suelo y cobertura.

Con base en los tres tipos de respuestas referidas un SIG, deberá contar con (Eastman, 2001; Kennedy y Kopp, 2000):

- ☉ Funciones de captura y almacenamiento de datos.
- ☉ Posibilidad de seleccionar variables a través de la formulación de condiciones.
- ☉ Funciones para la creación de modelos o escenarios (modelado espacial).

Un *SIG* proporciona almacenamiento de la información espacial, que puede ser actualizada o manipulada con el mínimo esfuerzo, a través de él se obtienen modelos cartográficos. La mayor parte del SIG incluye las funciones lógicas de entrada de datos, extracción de información, análisis espacial y presentación de los resultados (Figura 1) (Johnston *et al.*, 2001; Vienneau, 2001):

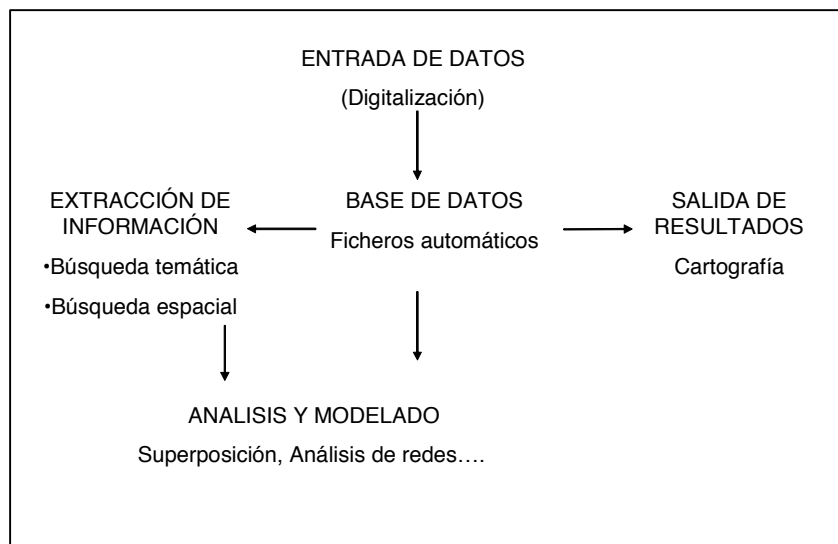


Figura 1. Funciones lógicas de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Un *SIG* está integrado por cinco componentes fundamentales que son: hardware, software, datos, personal y métodos o procedimientos (Eastman, 2001; Kennedy y Kopp, 2000; Zeiler, 1999)

Hardware. También llamado componente físico, el hardware es la computadora en la cual opera el *SIG*, para estos sistemas se requiere de equipos con alta capacidad de procesamiento y almacenamiento de datos digitales. También forman parte del hardware los periféricos de entrada y salida de información.

Software. También llamado componente lógico, el software para *SIG* provee las funciones y las herramientas necesarias para almacenar, analizar y visualizar información geográfica. Se debe disponer de herramientas para entrada y manipulación de la información geográfica.

Datos. El dato geográfico, es la unidad geográfica necesaria para representar la realidad a una escala y proyección determinada. Es la representación de un fenómeno en un espacio y tiempo determinados. Estas representaciones se expresan a través de puntos, líneas y áreas. Los datos son el componente más importante de un *SIG*. Los datos espaciales y tabulares relacionados pueden ser obtenidos directamente o a través de proveedores comerciales de datos.

Personal. En la actualidad esto ha constituido una limitante en tecnología de *SIG* pues no siempre se cuenta con el personal capacitado que administre el sistema y desarrolle planes y programas que puedan ser aplicados. El personal se clasifica en forma general en expertos, usuarios especialistas y usuarios finales. Los expertos son quienes diseñan y mantienen el sistema, los usuarios especialistas son quienes realizan las consultas y análisis e introducen los datos; los usuarios finales son quienes consultan la información y la visualizan.

1.3.2. La percepción remota y los sensores remotos

La percepción remota, teledetección o tele observación (PR) es la ciencia y el arte de obtener información útil (espacial, espectral y temporal) de un objeto, área o fenómeno a través del análisis e interpretación de datos de imágenes adquiridos por un equipo que no está en contacto físico con el objeto, área o fenómeno bajo investigación (Lillesand y Kiefer, 2001; Richards y Jia, 1999).

En general la PR presenta las siguientes ventajas (Lillesand y Kiefer, 2001; Pérez, 2005; Richards y Jia, 1999):

- ☉ Tiene una visión en conjunto del objeto de estudio y su entorno, lo que facilita su análisis por grupos multidisciplinarios y la realización de estudios 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 ir al campo.

Entre sus limitaciones tenemos que (Lillesand y Kiefer, 2001; Pérez, 2005; Richards y Jia, 1999):

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

La cobertura y el uso de suelo se manifiestan en las imágenes mediante atributos que son la base y fundamento de la interpretación. Estos atributos son el tono, la textura, patrón, forma y tamaño, sitio y posición geográfica. La manera en que estos atributos pueden ser clave de identificación de una cobertura, depende del tipo de firma espectral, escala y fecha de toma de la escena (Figura 2). En este sentido es muy importante la resolución a la cual se estudia determinado objeto (Lillesand y Kiefer, 2001; Pérez, 2005; Richards y Jia, 1999).

La resolución es la habilidad de un sistema de PR para producir una imagen nítida y definida. Es una medida de la capacidad que tienen los sensores para distinguir entre dos señales situadas espacialmente cerca y que son espectralmente similares. Un sistema sensor puede tener varios tipos de resolución, estos son (Lillesand y Kiefer, 2001; Pérez, 2005; Richards y Jia, 1999):

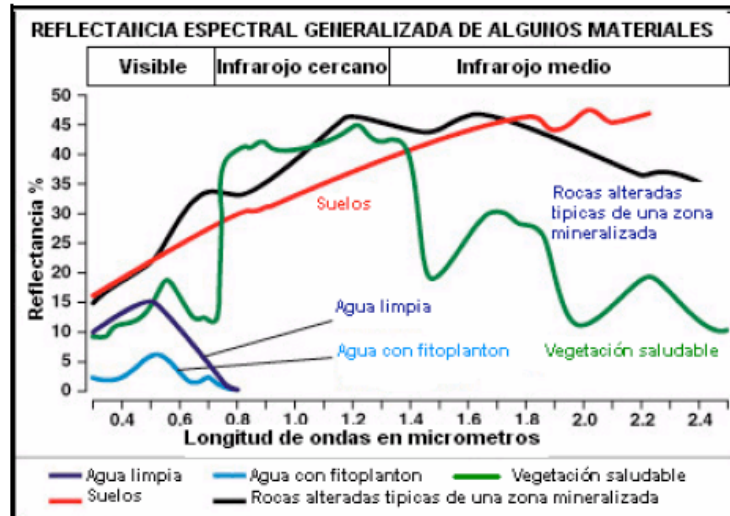


Figura 2. Ejemplo de la reflectancia para algunas coberturas (Pérez, 2005).

Resolución espacial: Es la mínima distancia entre dos objetos que puede registrar en el terreno un sensor y posteriormente identificado en la imagen. En un sistema fotográfico, suele medirse como la mínima separación a la cual los objetos aparecen distintos y separados en la fotografía. En el sensor óptico electrónico se utiliza el concepto de campo de visión instantáneo, éste es registrado por cada detector. Corresponde a una superficie determinada en el terreno y en la imagen constituye un elemento de escena o unidad de registro, denominada píxel. El tamaño del área de terreno que se registra en un píxel corresponde al valor de la resolución espacial de la imagen a la cual pertenece.

Resolución espectral: Indica el ancho de banda de un sensor o número de bandas, expresado en longitud de banda. Entre los sensores espaciales, la menor resolución espectral corresponde al sistema de detección y ordenamiento de radio, *RADAR* (Radio Detection and Ranging) ya que trabaja con un solo canal y los sistemas fotográficos que pueden ofrecer películas, pancromáticas, infrarrojo en blanco y negro, color natural o infrarrojo color. A diferencia de los sensores óptico - electrónicos que ofrecen un amplio rango de bandas, como es el caso del mapeador temático (TM) del programa *Landsat*.

Resolución radiométrica: Capacidad de un sensor para medir diferencias en radiación.

Resolución temporal: Intervalo de tiempo que un sensor (satélite) observa una misma área del terreno en determinado periodo. En el caso de Landsat *MSS*, Landsat *TM* y *SPOT* es de 18, 16 y 26 días. En el caso de *SPOT* se puede obtener una resolución temporal de hasta de 5 días.

Con base en la fuente de energía los sensores remotos pueden clasificarse en (Lillesand y Kiefer, 2001; Pérez, 2005; Richards y Jia, 1999):

- ☉ Pasivos: Cuando reciben energía proveniente de un foco exterior a ellos. Ejemplos de este tipo son los sensores de los programas *LANDSAT*, *SPOT*, *CBERS*, *IKONOS* y *QuickBird*.
- ☉ Activos: Cuando son capaces de emitir su propio haz de energía, de manera que emiten la energía electromagnética en dirección al objeto y luego detectan la energía reflejada. Es el caso del *RADAR* y ejemplos de estos son los programas *RADARSAT*, *JERS*, *ERS* y *SIR*.

1.3.3. El sensor remoto SPOT

El programa *SPOT* (Systeme Polivalent D' Observation de la Terre) ha tenido cinco generaciones, *SPOT 1*, *2*, *3*, *4* y *5*, los cuales fueron lanzados el 22 de febrero de 1986, el 22 de enero de 1990, el 26 de septiembre de 1993, marzo de 1998 y 4 de mayo de 2002. *SPOT 1* y *SPOT 3* salieron de servicio en 1990 y en 1996 (Lillesand y Kiefer, 2001; Pérez, 2005).

La plataforma ubicada a 832 km de altura y con una resolución temporal de 26 días, transporta dos sensores pasivos gemelos llamados *HRV1* Y *HVR2* (Alta Resolución Visible). Gracias a que el espejo receptor de la energía reflejada, no oscila, este puede orientarse directamente bajo la trayectoria (visión nadir) o a un lado de esta (observación oblicua) lo cual permite visitar una misma zona y de tener estereoscopia (Figura 3) (Lillesand y Kiefer, 2001; Pérez, 2005).

CANAL	BANDA ESPECTRAL (μm)	PRINCIPALES APLICACIONES
1	0,50 - 0,59	Reflectancia de vegetación verde sana Mapeo de aguas
2	0,61 - 0,68	Absorción de la clorofila Diferenciación de especies vegetales Diferenciación entre suelo y vegetación
3	0,79 - 0,89	Levantamiento de fitomasa Delineamiento de cuerpos de agua
Pancromática	0,48 - 0,73	Estudio de áreas urbanas

Figura 3. Las bandas espectrales del sensor HRV y sus aplicaciones generales (Pérez, 2005).

El *SPOT 5* posee dos sensores: el alta resolución del visible *HRG* (High Resolution Geometric) que ofrece la resolución de 2.5 m; y alta resolución estereoscópica *HRS* (High Resolution Stereoscopic) que mejoro su capacidad estereoscópica. Mejorando la precisión de localización < 15 m. a 90% y en altimétrica < 10 m. a 90%, sin punta de apoyo. Además junto a esos sensores, se encuentran a bordo otros instrumentos como el *VEGETATION - 2*, que ofrece imágenes de la vegetación global con un 1 km de resolución y el *DORIS*, un sistema de posicionamiento global (Lillesand y Kiefer, 2001; Pérez, 2005).

1.3.3.1. Características especiales del SPOT

Una imagen *SPOT* cubre 60 x 60 km y se puede adquirir completa, la mitad (40 x 40 km), un cuarto (30 x 30 km) o un octavo (20 x 20 km) (Figura 4). Tiene los siguientes niveles de procesamiento (Lillesand y Kiefer, 2001; Pérez, 2005):

Correcciones Radiométricas: Son ejecutadas a través de un proceso de calibración involucrando escenas completas adquiridas sobre regiones homogéneas. Estas correcciones son aplicadas a todos los niveles de preprocesamiento.

Correcciones Geométricas: Los Datos son remuestreados y proyectados a un plano de acuerdo a la precisión requerida: proyección básica, los datos son corregidos de acuerdo a la rotación y curvatura de la tierra, efectos panorámicas y altitud del satélite (distorsiones sistemáticas); proyección cartográfica, se realizan correcciones considerando los anteriores efectos más las variaciones altitudinales.

Niveles Resultantes de los Preprocesamientos:

- ☉ IA: Correcciones radiométricas únicamente.
- ☉ IB: Las mismas más procesamiento geométrico básicos.
- ☉ 2A: Las mismas del nivel 1A más procesamiento cartográfico sin el uso de puntos de control en el terreno (*PCT*).
- ☉ 2B: Las mismas del nivel 2A pero con el uso de *PCT*.
- ☉ 3: Las mismas correcciones del nivel 2B. Estos productos también son llamados orthoimágenes, son preprocesados usando un modelo digital de elevación (*MDE*) para corregir errores debido al relieve. Las correcciones se apoyan en modelos, *PCT* y *MDE*.

Productos Especiales

- ☉ *SPOT DEM*. Son adquiridas automáticamente al correlacionar imágenes estereopares tomadas por el instrumento HRS a bordo de SPOT 5.
- ☉ SPOTView Ortho.
- ☉ *P + XS*. Producto obtenido al mezclar una escena pancromática (*P*) y una multiespectral (*XS*) adquiridas simultáneamente. Las bandas *XS1* y *XS2* son las utilizadas para producir este tipo de producto.
- ☉ Mosaicos. De dos o cuatro escenas contiguas que fueron tomadas durante una misma pasada. Son disponibles únicamente al nivel 1B.0. Otros mosaicos son disponibles en el nivel 2A, y son conocidos como mapas imágenes.

En general *SPOT* presenta las siguientes ventajas (Lillesand y Kiefer, 2001; Pérez, 2005):

- ☉ Posibilidades de estereoscopía.
- ☉ Imágenes con ampliaciones a escalas 1: 100000 hasta 1: 25000.
- ☉ Frecuencia de observación en el terreno (resolución temporal) hasta de 5 días.
- ☉ Productos corregidos geoméricamente.
- ☉ Resolución espacial de hasta de 2.5 m.

Características del sistema SPOT 1, 2 y 3 , con sus modos.

Característica	Modo multiespectral (XS)	Modo pancromático
Resolución espacial ^{1/}	20 * 20 m	10 * 10 m
Ancho de barrido ^{1/}	60 Km.	60 Km.
Precisión de localización: < 350 m		
Resolución espectral:		
Banda 1	0.50 - 0.59 μ m (verde)	0.57 - 073 μ m
Banda 2	0.61 - 0.68 μ m (rojo)	
Banda 3	0.78 - 0.89 μ m (IR cercano)	

^{1/} Característica común para SPOT 5 y SPOT 4

^{2/} Característica común para SPOT 4

Características del sistema SPOT 4 y SPOT5 , con sus modos.

Característica	Modo multiespectral (XS)	Modo pancromático
Resolución espacial ^{1/}	10 m * 10 m	2.5 m * 2.5 m ó 5 * 5 m ^{2/}
Precisión de localización ^{3/} : < 35 m		
Resolución espectral :		
Banda 1	0.50 - 0.59 μ m (verde)	0.48 - 0.73 μ m ^{4/}
Banda 2	0.61 - 0.68 μ m (rojo)	
Banda 3	0.78 - 0.89 μ m (IR cercano)	
Banda 4	1.58 - 1.75 μ m (IR medio)	

^{1/} Para la banda 4 la resolución espacial es de 20 * 20 m.

^{2/} Para SPOT 4 el modo mono espectral tiene una resolución espacial de 10 * 10 m

^{3/} Para SPOT 4 la precisión de localización es < 350 m

^{4/} Para SPOT 4 la resolución espectral es 0.61 - 0.68 μ m

Figura 4. Características del sistema SPOT 1, 2, 3, 4 y 5, con sus modos (Pérez, 2005).

Capítulo 2. Modelación espacial del índice de área foliar y cobertura en bosques manejados de *Pinus patula* y *Pinus teocote* en el Ejido Atopixco, Hidalgo.

Resumen

Se modeló el índice de área foliar en sitio ($LAI5$) (m^2/m^2), alométrico ($LAIAL$) (m^2/m^2), y el porcentaje de cobertura arbórea (COB) utilizando variables cartográficas, datos obtenidos en campo y datos espectrales obtenidos de una imagen multiespectral del satélite SPOT 5. Se integró un Sistema de información Geográfica (SIG) constituido por diecisiete capas de información: Altitud, Pendiente, Exposición, Temperaturas, Precipitaciones, Bandas Espectrales, y dos grupos de índices de vegetación basados en a) la relación espectral de bandas ($NDVI - CTVI$) y b) la distancia espectral entre vegetación y suelo desnudo ($PVI - SAVI$). Con datos de campo y del SIG , se ajustaron modelos de regresión lineal múltiple. El porcentaje de cobertura arbórea destaca su relación con la Precipitación Media en Secas ($PMANA$) y su cuadrado ($PMANA2$), Precipitación Media Anual en Lluvias ($PMAMO$), Temperatura Máxima ($TMAX$) y su cuadrado ($TMAX2$), y la Banda 4 ($B4$) ($P < 0.001$, $R^2 = 0.66$). Para el índice de área foliar en sitio destaca su relación con la Precipitación Media en Secas ($PMANA$) y su cuadrado ($PMANA2$), Precipitación Media Anual en Lluvias ($PMAMO$), Temperatura Máxima ($TMAX$) y su cuadrado ($TMAX2$), y la Banda 4 ($B4$) ($P < 0.001$, $R^2 = 0.71$). Finalmente, para el índice de área foliar alométrico destaca su relación con Precipitación Media en Lluvias ($PMAMO$) y su cuadrado ($PMAMO2$), Precipitación Media Anual en Secas ($PMANA$), Temperatura Máxima ($TMAX$) y su cuadrado ($TMAX2$), y Pendiente del Suelo ($PENDIENTE$) ($P < 0.001$, $R^2 = 0.61$). La relación estadística entre los LAI y COB y las condiciones ambientales, sugieren que estas son muy sensibles a las condiciones ambientales físicas (precipitación y temperatura) que se pueden usar para inventariar recursos maderables.

Palabra clave: Modelado Espacial, Variables Cartográficas, SIG , Datos Espectrales, Inventario Forestal.

Chapter 2. Spatial modelling of leaf area index and tree cover in managed *Pinus patula* - *Pinus teocote* forests in the Ejido Atopixco, Hidalgo.

Abstract

Leaf area index either recorded in the field (*LAI5*) (m^2/m^2) or estimated from allometric relations (*LAIAL*) (m^2/m^2), and tree cover percentage (*COB*) were modelled based on GIS variables, field data and spectral data derived from a multispectral SPOT 5 image. A GIS including 17 data layers was set up: Elevation, Slope's angle and Aspect, Temperature, Precipitation, Spectral bands and two sets of Vegetation Indices based either on a) the ratio of spectral bands (*NDVI* and *CTVI*) or on b) the spectral distance between vegetation and bare soil (*PVI* and *SAVI*). Multiple linear regression models were built based on field and GIS data. The percentage of tree cover is related to mean precipitation during the dry season (*PMANA*), its quadratic component (*PMANA2*), mean precipitation during the rainy season (*PMAMO*), maximum temperature (*TMAX*), its quadratic component (*TMAX2*), and Band 4 reflectance (*B4*) ($P < 0.001$, $R^2 = 0.66$). Leaf area index recorded in the field is related to mean precipitation during the dry season (*PMANA*), its quadratic component (*PMANA2*), mean precipitation during the rainy season (*PMAMO*), maximum temperature (*TMAX*), its quadratic component (*TMAX2*), and Band 4 reflectance (*B4*) ($P < 0.001$, $R^2 = 0.71$). The leaf area index estimated with basis on allometric relations is related to mean precipitation during the rainy season (*PMAMO*), its quadratic component (*PMAMO2*), mean precipitation during the dry season (*PMANA*), maximum temperature (*TMAX*), its quadratic component (*TMAX2*), and Slope's angle (*PENDIENTE*) ($P < 0.001$, $R^2 = 0.61$). The statistical relationship found between *LAI* and *COB* and environmental conditions suggests that these variables are responsive to physical environmental conditions (precipitation and temperature) which can then be used for the inventorying of forest resources.

Key words: Spatial modelling, GIS variables, GIS, Spectral data, Forest inventory.

2.1. Introducción

Una forma de comprender la dinámica de un bosque es a través del estudio de variables biofísicas, tales como cobertura arbórea (*COB*) e índice de área foliar (*LAI*). Siendo la *COB* una expresión del índice de área foliar, ésta es una variable que tiene influencia sobre procesos fisiológicos importantes como la fotosíntesis, la transpiración, la fotorespiración, entre otras (Begon y Townsend, 1990; Brown *et al.*, 2000). El *LAI* es un buen descriptor de la estructura y funcionamiento de un ecosistema, pues no sólo brinda información sobre procesos fisiológicos sino también juega un papel dominante en la absorción y reflectancia de la luz solar (Chen *et al.*, 2004).

Existen metodologías directas e indirectas para estimar la *COB* y el *LAI*. Ejemplos del primer tipo son la captura de hojas en canastas, aplicación de ecuaciones alométricas y la medición de la cantidad de luz transmitida a través de la copas (hojas y ramas). Aunque exactas, las mediciones en sitio son costosas en tiempo (Frazer *et al.*, 1999; Wang *et al.*, 2005). En consecuencia, se han encaminado los esfuerzos a la búsqueda de métodos de percepción remota que aprovechen las propiedades de absorción y reflectancia de las hojas para estimar *COB* y *LAI*. Cabe recordar que las estructuras foliares guardan una alta correlación con la radiación roja e infrarroja del espectro electromagnético, por virtud de las clorofilas, carotenos y demás estructuras de las hojas (Lee y Hong, 2006; Tian *et al.*, 2002; Valdez *et al.*, 2006).

La estimación de la *COB* y el *LAI* a través de la percepción remota es una realidad, siendo el paso siguiente el modelar espacialmente sus variaciones. El proceso para elegir un modelo que permita describir con sencillez la distribución de una variable de interés (*COB*, *LAI*, biomasa, área basal, volumen de madera, etc.) inicia con el cumplimiento de los siguientes supuestos: a) El patrón se puede representar mediante la riqueza, la abundancia, entre otras; b) Se parte de una naturaleza estática, es decir hay un pseudo equilibrio entre el medio ambiente y el patrón observado; y c) todo modelo para el estudio de la naturaleza tiene tres propiedades: generalización, realidad y precisión (Buongiorno y Gilles, 1987; Nogués, 2003; Ter Brack, 1998). Es difícil que un modelo pueda integrar las tres. En la mayoría de los casos, los resultados deben

interpretarse en función de las limitaciones de la información disponible (Aguirre, 2006; Guisan y Zimmermann, 2000; Scott *et al.*, 2001).

Existen una serie de metodologías numéricas para el estudio de los patrones de distribución de la masa forestal (en sus componentes estructurales y funcionales) como la correlación canónica, los análisis de correspondencia (Manel *et al.*, 1999), la estadística bayesiana (Aspinall, 1992), las redes neuronales y los modelos de regresión (Guisan *et al.*, 1999). Estos últimos los de mayor tradición en ecología y geografía, relacionan una o más variables respuesta con una serie de variables ambientales denominadas variables predictoras. Los modelos de regresión pueden agruparse en lineales, modelos lineales generalizables (*MLG*) y modelos generalizables aditivos (*MGA*) (Dykstra, 1984; Ter Brack, 1998).

Sí bien la estadística multivariada en conjunción con la tecnología en geomática está más allá del estado de prueba, hay aun pocos ejemplos que apuntalen sus aplicaciones cartográficas, a escala regional para un país. Particularmente en países en vías de desarrollo, donde la cartografía de la cobertura vegetal es escasa y sus datos difícilmente extrapolables a otros países. El análisis de imágenes de percepción remota y la aplicación de *SIG* ofrecen varias ventajas sobre los métodos tradicionales de cartografía (Camarero y Gutiérrez, 1999; Coelho, 2001; Maliha y Chaloud, 2002; Sorani *et al.*, 1995; Sorani y Álvarez, 1996).

En este sentido, el objetivo de este trabajo es describir las variables biofísicas de *COB* e *LAI* del Ejido Atopixco, por medio de técnicas de modelado espacial. Con el fin de aportar herramientas que faciliten la administración racional de los recursos naturales del bosque.

2.2. Materiales y Métodos

2.2.1. Área de estudio

El Ejido Atopixco tiene una superficie de 1170.97 ha. Se ubica dentro del municipio de Zacualtipán, entre las coordenadas 20°37' 26" N y 98°37' 48" W, y 20°35' 20" N y 98° 35' 23" W. Este municipio colinda al norte con Tianguistengo, al sur con Metzquititlán, al este con Veracruz, y al oeste con Metztitlán y Xochicoatlán (Figura 1). Su fisiografía comprende la Sierra Madre Oriental, conocida como Sierra Alta Hidalguense y una parte del Eje Neovolcánico, subprovincia Carso Huasteco. Está conformado por pendientes, mesetas y cañones. La altitud media es de 2100 m (EMM, 2000).

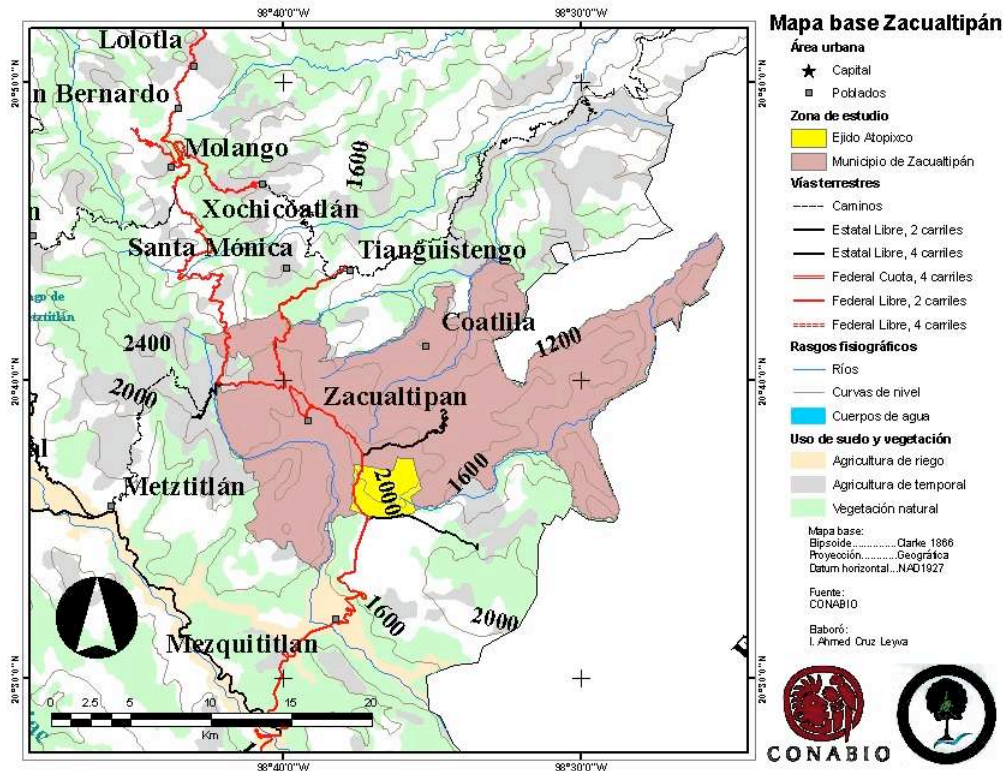


Figura 1. Ubicación de Ejido Atopixco, municipio de Zacualtipán de Ángeles.

El municipio de Zacualtipán cuenta con tres ríos principales: El Pánuco, El Zoyatla y El Miniahuaco, además de la laguna Chapultepec. Su sustrato geológico data del periodo Cenozoico (terciario superior) y está conformado por rocas ígneas extrusivas del tipo toba ácida (Ts - Ta, al norte) y basalto (Ts - B, al sur). El sustrato edáfico está

representado por suelos acrisol órtico (Ao), luvisol crómico (Lc) y feozem háplico (Hh). Se puede observar, en la parte norte del ejido que el suelo es rico en nutrientes; caso contrario es la parte sur donde el suelo es delgado y pedregoso (EMM, 2000).

En el área de estudio predomina el clima templado húmedo (C(m)) y templado subhúmedo (C(w2)) con temperatura media anual entre 12 y 18 °C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18 °C y temperatura del mes más caliente bajo 22 °C. La precipitación media anual oscila (temporalmente) entre 700 y 2050 mm, precipitación del mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual (2050 milímetros). El periodo de lluvias es de junio a septiembre (EMM, 2000).

El 30 de abril de 1991, el Ejido Atopixco recibió el Premio Nacional al Mérito Forestal por parte de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) como reconocimiento al buen manejo y aprovechamiento de sus recursos forestales. Para esto ha creado, bajo el método de desarrollo silvícola, conjuntos de rodales monoespecíficos, coetáneos de edades que van de 0 a 26 años (Figura 2). En los rodales intervenidos encontramos especies como: *Pinus patula*, *Pinus teocote* y en menor abundancia *Pinus greggii* y *Pinus montezumae*. En las áreas de vegetación natural hallamos especies tales como: *Quercus crassipes*, *Q. laurina*, *Q. excelsa*, *Q. castanea*, *Q. rugosa*, *Cornus disciflora*, *Viburnum sp*, *Cleyera theaeoides*, *Alnus sp*, *Arbutus xalapensis*, *Prunus serotina*, *Symplocus sp*, *Ternstroemia sp*, *Vaccinium leucanthum*, *Fagus grandifolia* subsp. mexicana, entre otras (Ángeles, 1995).

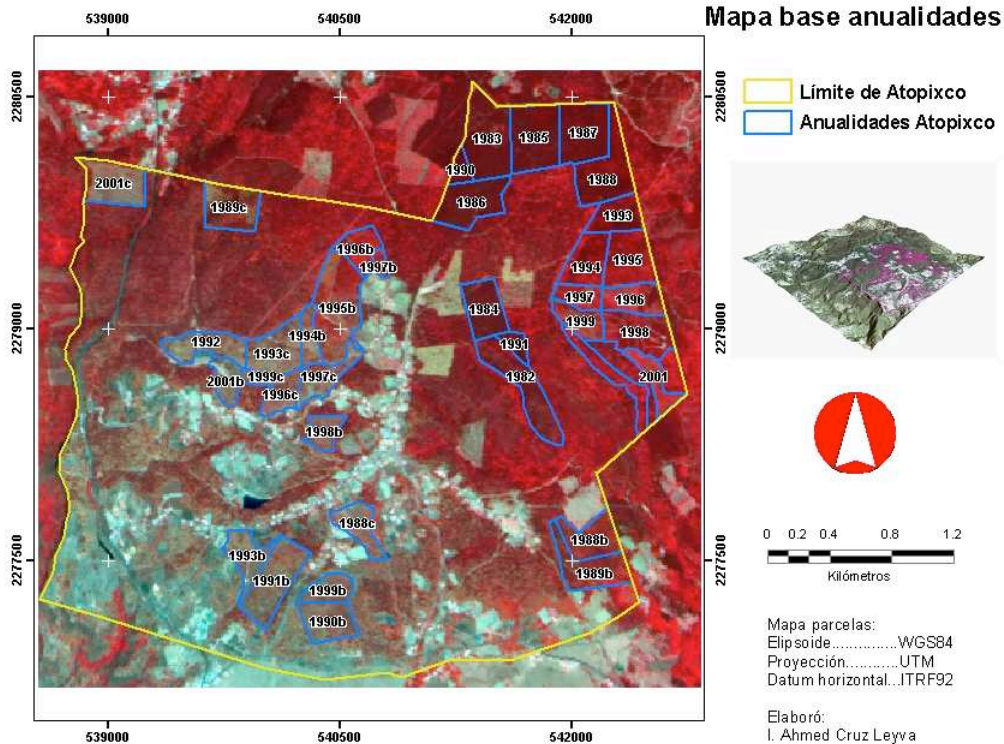


Figura 2. Ubicación de rodales bajo manejo forestal, Ejido Atopixco. Composición RGB (432) con los rodales sobrepuestos, imágenes año 2006. Los números indican el año de cosecha. La edad del rodal se calcula restando al año actual la edad de cosecha.

2.2.2. Adquisición y procesamiento en gabinete de datos de campo

Para establecer los límites geográficos del área de estudio se consultó “El plan general de manejo forestal del Ejido Atopixco”. Con esta información y con el auxilio de un modelo digital de elevación (resolución de 30 m INEGI) se delimitó la poligonal del Ejido y de los diferentes rodales coetáneos que lo integran.

Se definieron 21 anualidades que corresponden a rodales coetáneos de edades entre 0 a 26 años. Dentro de cada anualidad se ubicaron al azar tres sitios circulares de muestreo, cada uno de 400 m² de superficie. Se marcó el norte y el árbol central (en cada sitio) y se procedió a medir el diámetro a la altura del pecho (*DAP*) de todos los árboles al tiempo que se etiquetaban. También se midió la altura total de al menos 5 árboles de *DAP* variable. Los sitios de muestreo fueron divididos en cuatro cuadrantes; con una cámara digital Nikon Coolpix equipada con un lente “ojo de pez” (Figura 3) se tomó una foto hemisférica por cuadrante. Finalmente, con un GPS Trimble

Geoexplorer III se georeferenció cada uno de los 114 sitios muestreados (Matteucci y Miranda, 1982; FAO, 2004).

En gabinete se estimó el área basal (m^2) de los árboles medidos, para esto se utilizó la siguiente ecuación (Husch *et al.*, 2003):

$$AB = (\pi / 40000) \times DAP^2$$

Donde:

AB = Área basal (m^2).

DAP = Diámetro a la altura del pecho (cm).

Para analizar la estructura por tamaños se construyeron histogramas de frecuencias, con base en el *DAP* y la densidad de todas las especies. También se determinó el índice de valor de importancia relativa (*IVIR*):

$$IVIR = \frac{(\text{Densidad relativa} + \text{Área basal relativa} + \text{Frecuencia relativa})}{3}$$

2.2.2.1. Estimación del índice de área foliar (en sitio y alométrico) y cobertura arbórea

Las fotos obtenidas con la cámara digital Nikon Coolpix, fueron procesadas con el paquete Gap Light Analyzer (GLA). Este software permite estimar la cobertura arbórea, el porcentaje de cielo despejado bajo dosel, índices de área foliar, total de radiación solar, entre otras variables. Para ello descompone la imagen (fotografía) en píxeles oscuros (objetos) y blancos (cielo abierto), estandariza los mismos (control de brillo, contraste, umbral de cuerpos, etc.) si existen inconsistencias (nubosidad, exceso de brillo solar, pendiente de suelo, etc.) y finalmente realiza operaciones matemáticas para estimar la estructura del dosel y transmisión de luz en el claro (Frazer *et al.*, 1999; Silbernagel y Moeur, 2001).

Las variables de interés a obtener con el GLA, fueron el índice de área foliar en sitio (*LAI5*) y la cobertura arbórea (*COB*). Por cada sitio muestreado (114 en total) se

tomaron cuatro fotos hemisféricas (Figura 3). De cada foto se estimó el LAI_5 y la COB (de forma automatizada), se promediaron sus valores y se obtuvo un valor por sitio.

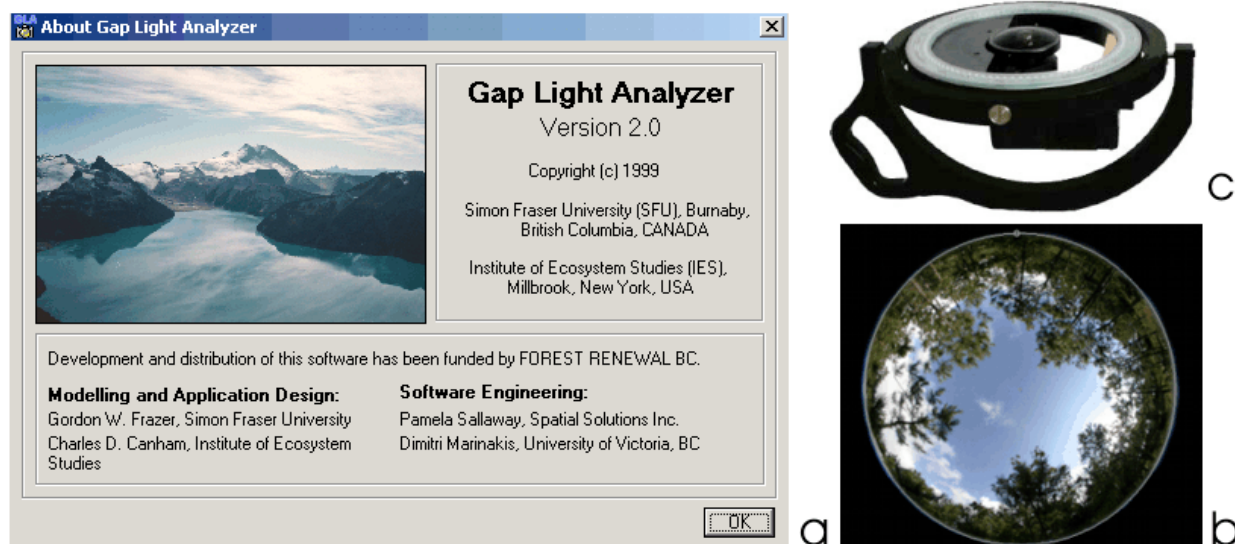


Figura 3. Paquete Gap Light Analyzer (a), ejemplo de fotografía hemisférica (b) y lente hemisférico montado en soporte magnético (c).

También se estimó el índice de área foliar alométrico (LAI_{AL}). Éste depende de la biomasa seca y está directamente relacionado con el área basal (Aguirre, 2007):

$$LAI_{AL} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{AFS}{2} \right)_i \right)}{A}$$

Donde:

LAI_{AL} = Índice de área foliar alométrico (m^2/m^2).

AFS = Área foliar superficial por individuo (m^2).

A = Área del sitio muestreado ($400 m^2$).

El área foliar superficial (AFS) es el producto del área foliar específica (AFE) por la biomasa seca del follaje (BSF), esto es:

$$AFS = AFE \times BSF$$

Donde:

AFS = Área foliar superficial por individuo (m^2).

AFE = Área foliar específica (m^2/kg).

BSF = Biomasa seca del follaje (kg).

El AFE se determina a través de la ecuación de Cano *et al.* (1996):

$$AFE = 2.64 \times (9.5336 - 0.0758 \times DAP)$$

Donde:

AFE = Área foliar específica (m²/kg).

DAP = Diámetro a la altura del pecho (cm).

La BSF se estimó con la ecuación ajustada por Figueroa (2008):

$$BFS = (29440.89 \times \exp^{(-26.51909/DAP)})/1000$$

Donde:

BSF = Biomasa seca del follaje (kg).

DAP = Diámetro a la altura del pecho (cm).

A partir del análisis de las fotos hemisféricas se obtuvieron las variables LAI5 y COB, de la biomasa seca del follaje y el área foliar específica se obtuvo la variable LAIAL.

2.2.2.2. Procesamiento de información espectral (SPOT5 HRG)

Se adquirió una imagen SPOT 5, a través del Colegio de Postgraduados. La escena fue tomada el 18 de abril de 2006, sus características más importantes se reportan en el Cuadro 1:

Cuadro1. Parámetros de la escena SPOT 5

Fecha	2006 – 04 – 18		17:05:10.5	
Instrumento	HRG 2			
Número de bandas	4			
Indicador de banda espectral	HI1: Verde	HI2: Rojo	HI3: IR Cercano	HI4: IR Medio
Longitud de onda (µm)	0.50 – 0.59	0.61 – 0.68	0.78 – 0.89	1.58 – 1.75
Número de ganancia	7	7	5	4
Calibración absoluta de ganancias (W/m ² /sr/µm)	2.139452	2.853960	1.738550	8.225268
Ángulo de orientación	12.264436 grados			
Ángulo de incidencia	20.187256 grados			
Ángulos del sol	Azimut: 111.469109		Elevación: 66.197548	
Filas	7302			
Columnas	7784			

Fue necesario realizar una corrección geométrica y radiométrica de la escena SPOT 5. La corrección geométrica se llevó a cabo en dos pasos:

- a) Se tomaron 33 puntos de control, con éstos se generó un archivo de control dispuesto en cuatro columnas, según la ecuación de Lillesand y Kiefer (2001):

$$\begin{aligned}x &= f_1(X, Y) \\ y &= f_2(X, Y)\end{aligned}$$

Donde:

(x, y) = Coordenadas de la imagen a corregir.

(X, Y) = Coordenadas correctas (mapa de referencia).

f_1, f_2 = Funciones de transformación.

- b) Con los datos del archivo de control, se procedió a correr una función lineal múltiple; de esta manera se creó una base ráster en blanco. Para rescatar los valores originales de los números digitales (*DN*) se aplicó el algoritmo llamado “remuestreo por vecino más cercano”.

La corrección geométrica permitió asignar a la escena un sistema de coordenadas geográficas en UTM – 14N con Datum WGS84, al mismo tiempo permitió remuestrear los píxeles de resolución 10 m a resolución 30 m; esto para homogeneizar las bases de datos a la resolución del *MDE* empleado. Para la aplicación del índice de vegetación ajustado al suelo (*SAVI*) fue necesario convertir los valores digitales originales (*DN*) a radianza. Para esto se realizó (de forma automatizada) una corrección radiométrica de la imagen de satélite, en base a la ecuación de Lillesand y Kiefer (2001):

$$L = \frac{d^2 \times \Phi}{d \times A \times d \times \Omega \times \cos \theta} \approx \frac{\Phi}{\Omega \times A \times \cos \theta}$$

Donde:

L = Radianza ($W/m^2/sr$).

Φ = Flujo de la radiación o poder radiante (W).

θ = Ángulo entre la superficie normal y la dirección especificada.

Ω = Ángulo sólido (sr).

A = Área de la superficie (m^2).

d = Índice de refracción. En sistemas ópticos pasivos, la radianza de salida es casi igual a la de entrada, a no ser que el índice de refracción cambie.

La radianza fue calculada con el módulo ATMOSC del software IDRISI KILIMANJARO, mismo que remueve el ruido producido por las condiciones atmosféricas del planeta (Chávez, 1996; Eastman, 2001).

Una vez corregida la geometría y la radiación de la escena, el siguiente paso fue calcular dos tipos de índices de vegetación (*IVs*). El primer tipo es conocido como “basados en la pendiente” (Slope – Based *IVs*) se refiere a la combinación de las bandas rojo e infrarrojo cercano. Bajo esta categoría se obtuvieron los siguientes índices:

NDVI. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada:

$$NDVI = (NIR - RED) / (RED + NIR)$$

Donde:

NDVI = Índice de vegetación de diferencia normalizada para un píxel dado.

RED = Reflectancia en la banda roja.

NIR = Reflectancia en la banda del infrarrojo cercano.

CTVI. Índice de vegetación transformado (corregido)

$$CTVI = \frac{NDVI + 0.5}{ABS(NDVI + 0.5)} + \sqrt{ABS(NDVI + 0.5)}$$

Donde:

CTVI = Índice de vegetación transformado (corregido) para un píxel dado.

NDVI = Índice de vegetación de diferencia normalizada para un píxel dado.

ABS = Valor absoluto.

El segundo tipo de índices de vegetación son los llamados “basados en la distancia”(Distance – Based *IVs*). En ambientes donde la vegetación no es tan densa se hace necesario separar la reflectancia (por ejemplo) del suelo de la reflectancia propia de la vegetación. Para esto se hace una correlación entre las bandas roja e infrarroja, utilizando como factor de corrección en pendiente (β_0) a las zonas de suelo desnudo (*PVI*) o en su caso transformando las bandas roja e infrarrojo en radianza

absoluta (*SAVI*) (Eastman, 2001). Bajo esta categoría se obtuvieron dos tipos de índices:

PVI. Índice Perpendicular de Vegetación:

$$PVI = \frac{(b \times NIR - RED + a)}{\sqrt{b^2 + 1}}$$

Donde:

PVI = Índice perpendicular de vegetación para un píxel dado.

RED = Reflectancia en la banda roja.

NIR = Reflectancia en la banda del infrarrojo cercano.

a = Intercepto de la línea del suelo.

b = Pendiente de la línea del suelo.

SAVI. Índice de Vegetación Ajustado a la Pendiente Suelo:

$$SAVI = \frac{(pNIR - pRED)}{(pNIR + pRED + L)} \times (1 + L)$$

Donde:

SAVI = Índice de vegetación ajustado a la pendiente suelo para un píxel dado.

pRED = Radianza en la banda roja.

pNIR = Radianza en la banda del infrarrojo cercano.

L = Factor de corrección.

Huete *et al.* (1988) provee una gráfica (Figura 4) de la cual se pueden extraer los valores de *L*, los cuales dependen de la densidad de la vegetación. Se sugiere un *L* = 1 para baja densidad, 0.5 para intermedia y 0.25 para alta densidad.

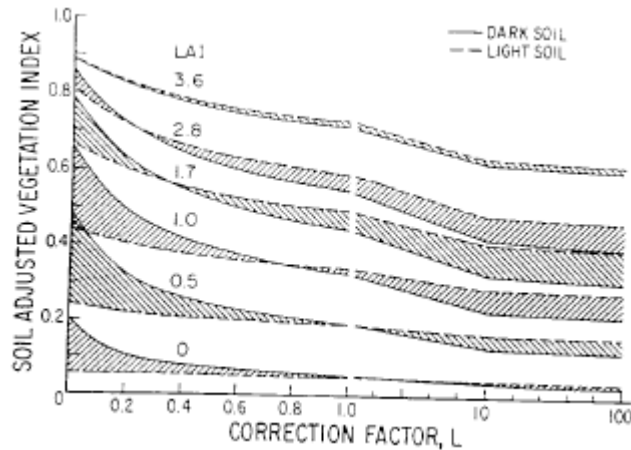


Figura 4. Curvas patrón para obtener el factor de corrección L (Huete *et al.*, 1988).

2.2.2.3. Generación del sistema de información geográfica

Para caracterizar las condiciones ambientales del área de estudio, se generó (en el paquete IDRISI KILIMANJARO) un Sistema de Información Geográfica (*SIG*) a partir del modelo digital de elevación (MDE) de resolución espacial de 30 m y de las cartas Edafológica y Geológica (escala 1:50,000) y de Efectos climáticos (escala 1:250,000) para los periodos de lluvias (mayo – octubre) y secas (noviembre – abril) de *INEGI*. La información contenida en las cartas se digitalizó por medio de una tableta y del paquete ArcGis 9.0, bajo el modelo de datos vectorial. Las cartas digitales así obtenidas fueron transformadas a formato ráster con una resolución semejante a la del MDE. A partir del MDE se obtuvo la capa de elevación sobre el nivel medio del mar (*ALTITUD*) y se construyeron las capas de pendiente (*PENDIENTE*) y exposición (*EXPOSICIÓN*) del terreno. Las cartas de isólinas climáticas (isotermas e isoyetas) se interpolaron mediante el módulo INTERCON del paquete IDRISI KILIMANJARO. Este módulo calcula la ubicación y valor de un píxel a ser interpolado con base al valor de las isólinas, su tendencia (cambio del atributo a partir de un final de la línea al otro, dividido por la longitud de la línea) y su posición “X, Y” (Eastman, 2001). De esta manera se obtuvieron las cartas de temperatura media anual (*TMA*), temperatura máxima (*TMAX*), temperatura mínima (*TMIN*), precipitación media anual (*PMA*), precipitación en lluvias (*PMAMO*) y precipitación en secas (*PMANA*).

2.2.2.4. Análisis de correlación y regresión stepwise

Los datos de campos se empataron con las variables cartográficas del medio físico, con los datos espectrales obtenidos de la escena SPOT 5 (Bandas 1 – 4) y con los datos espectrales transformados en *IVs* (*NDVI*, *CTVI*, *PVI* y *SAVI*). Para ello se ubicaron las parcelas muestreadas sobre las capas ráster. Para cada parcela se extrajeron los datos referentes a las nueve capas de información ambiental, los valores de cada banda espectral y los valores correspondientes a los índices de vegetación calculados.

Inicialmente se realizaron análisis de correlación Pearson (Belsley *et al.*, 2005; Crawley, 1993) para identificar las variables explicativas mayormente relacionadas con *COB*, *LAI5* y *LAIAL*.

Posteriormente se ajustaron, por separado, para *COB*, *LAI5* y *LAIAL* modelos de regresión lineal múltiple de la forma general:

$$\begin{aligned} \text{COB, LAI5, LAIAL} &= \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_9 X_9 + \beta_{10} B_1 + \dots + \beta_{13} B_4 + \beta_i \text{IV} + \varepsilon_i \\ \text{COB, LAI5, LAIAL} &= \beta_0 + \beta_1 AB + \beta_2 X_1 + \beta_3 X_2 + \dots + \beta_{10} X_9 + \beta_{11} B_1 + \dots + \beta_{14} B_4 + \beta_i \text{IV} + \varepsilon_i \end{aligned}$$

El modelo predice, para cada variable por separado, el valor promedio de *COB*, *LAI5* y *LAIAL* que se esperaría alcance un sitio (píxel) donde las condiciones ambientales sean X_1, X_2, \dots, X_9 y cuyas propiedades espectrales sean B_1, B_2, \dots, B_4 e *IV* (índices de vegetación). Para elegir a las variables a incluir en el modelo se aplicó una estrategia de selección de variables STEPWISE (Crawley, 1993; Pindyck y Rubinfeld; 1981). Los modelos obtenidos se aplicaron posteriormente a cada uno de los píxeles del mapa base para modelar las variaciones en cobertura e índices de área foliar de las especies a través del área de estudio.

Cabe mencionar que se probaron modelos de regresión no lineales (*RNL*) (Aguirre, 2007; García *et al.*, 2006). Sin embargo, en sucesivas pruebas, los coeficientes de determinación por *RNL* siempre fueron menores a los obtenidos con regresión lineal múltiple (*RLM*). Razón por la cual se eligió como método estadístico a la *RLM* (Belsley *et al.*, 2005).

2.2.2.5. Observaciones aberrantes y puntos de influencia

Con el fin de identificar y corregir inconsistencias estadísticas en los modelos, a parte de las pruebas de varianza, significancia ($P < 0.05$) y factor de inflación de varianza ($VIF < 1$ o 5); se buscaron observaciones aberrantes (OA) con relación al conjunto de datos a predecir (Y_i) y del conjunto de variables predictoras (X_i), esto es (Belsley *et al.*, 2005):

Un elemento Y_i (cobertura arbórea (COB), índice de área foliar en sitio (LAI5) o índice de área foliar alométrico (LAIAL) es una OA, sí de acuerdo al criterio de residuales de Student (t_i):

$$|t_i| > t(n - p - 1, 1 - \frac{\alpha}{2n}) \dots \left(\frac{t_i}{R_{student}} \right)$$

Donde:

t_i = Valor absoluto de residual studentizado.

n = Número de observaciones (114 sitios, 114 observaciones).

p = Número de parámetros β_i del modelo lineal.

α = Aproximado a 0.10.

Un elemento X_i (variables del SIG y espectrales) es una OA, sí de acuerdo al criterio del valor estimado de la diagonal H_{ii} :

$$h_{ii} > 2h' \dots \left(\frac{H_{ii}}{HatDiag \dots H} \right)$$

$$h' = \frac{p}{n}$$

Donde:

H_{ii} = Valor estimado de diagonal.

n = Número de observaciones (114 sitios, 114 observaciones).

p = Número de parámetros β_i del modelo lineal.

h' = Parámetro a determinar.

También se buscaron puntos de influencia sobre la regresión lineal (PI_R) y sobre los coeficientes β_i (PI_β). En el primer caso se observa el comportamiento de toda la regresión con y sin la inclusión del elemento Y_i . Por su parte los PI_β denotan el cambio

sobre los coeficientes β_i (de la regresión) con y sin la inclusión del caso Y_i , esto es (Belsley *et al.*, 2005):

Un elemento Y_i (COB, LAI5 o LAIAL) es un PI_R, sí de acuerdo al criterio de *DFFITs* (Difference between Fitted Values):

$$DFFITs > 1, \text{ sí } n < 30$$
$$DFFITs > 2\sqrt{\frac{p}{n}}, \text{ sí } n \geq 30$$

Donde:

DFFITs = Diferencia entre valores ajustados.

n = Número de observaciones (114 sitios, 114 observaciones).

p = Número de parámetros β_i del modelo lineal.

Un elemento Y_i (COB, LAI5 o LAIAL) es un PI_R, sí de acuerdo al criterio Distancia de Cook:

$$\left(\frac{\text{Cook's } D}{D_i}\right)$$
$$D_i > 1$$

Donde:

D_i = Valor de Cook.

Un el elemento Y_i (COB, LAI5 o LAIAL) es un PI _{β} , sí de acuerdo al criterio de *DFBETAS* (Influence on the Regression Coefficients):

$$|DFBETAS| > 1, n \leq 30$$
$$|DFBETAS| > \frac{2}{\sqrt{n}}$$

Donde:

DFBETAS = Valor absoluto, influencia sobre los coeficientes de regresión.

n = Número de observaciones (114 sitios, 114 observaciones).

2.3. Resultados y Discusión

2.3.1. Descripción ecológica del índice de área foliar y la cobertura arbórea

Se obtuvo una densidad promedio de 1832 individuos por hectárea, de los cuales la mayor proporción corresponden a la especie *Pinus patula* (65.5%) seguida de *Pinus teocote* (15%) y *Quercus laurina* (9.3%). Las especies menos frecuentes son *Clethra sp.* (0.57%), *Ternstroemia sp.* (0.57%) y *Vaccinium sp.* (0.57%) (Cuadro 2).

Cuadro 2.- Valores estructurales promedio e Índice de Valor de Importancia (IVIR) para las especies arbóreas del bosque manejado en el Ejido de Atopixco, Hidalgo.

ESPECIES	DENSIDAD (ha)		ÁREA BASAL (m ²)		FRECUENCIA		IVIR
	ha	%	ha	%	SITIOS	%	
<i>Pinus patula</i>	1200	65.49	16.3031	81.74	36	20.57	55.93
<i>Pinus teocote</i>	270	14.73	1.6631	8.34	14	8	10.36
<i>Quercus laurina</i>	171	9.32	1.1044	5.54	29	16.57	10.48
<i>Quercus rugosa</i>	70	3.79	0.383	1.92	30	17.14	7.62
<i>Alnus sp.</i>	40	2.18	0.2228	1.12	18	10.29	4.53
<i>Pinus montezumae</i>	29	1.56	0.0583	0.29	4	2.29	1.38
Otras	24	1.32	0.0765	0.38	17	9.71	3.8
<i>Arbutus xalapensis</i>	12	0.66	0.044	0.22	14	8	2.96
<i>Quercus crassipes</i>	6	0.34	0.0544	0.27	4	2.29	0.96
<i>Vaccinium sp.</i>	6	0.31	0.0042	0.02	2	1.14	0.49
<i>Cupressus sp.</i>	2	0.12	0.0117	0.06	2	1.14	0.44
<i>Quercus excelsa</i>	1	0.07	0.0062	0.03	2	1.14	0.42
<i>Quercus sp.</i>	1	0.07	0.0098	0.05	1	0.57	0.23
<i>Ternstroemia sp.</i>	1	0.04	0.0004	0	1	0.57	0.2
<i>Clethra sp.</i>	0.2	0.01	0.0024	0.01	1	0.57	0.2
Total general	1832	100	19.9443	100	175	100	100

De acuerdo al Cuadro 2, las especies más importantes (IVIR) en virtud de su área basal, densidad y presencia son: *Pinus patula* (55.9), *Pinus teocote* (10.4), *Quercus laurina* (10.5) y *Quercus rugosa* (7.6).

El área de estudio comprende rodales puros coetáneos, dominados por las especies de *Pinus patula* (al norte) y *Pinus teocote* (sur – suroeste). La presencia de especies latifoliadas como *Ternstroemia sp.* y *Vaccinium sp.* son un indicador de la falta de tratamientos intermedios. Esto se corrobora con la Figura 5, en ella se aprecia una tendencia hacia rodales coetáneos puros; sin embargo la mayor cantidad de individuos

(40% de la densidad total) se agrupan hacia las clases diamétricas de 0 a 7 cm. Lo cual muestra que algunos rodales no han recibido el debido aclareo y / o poda. El aclareo ayudaría a reducir la competencia, concentraría el crecimiento y mejoraría la forma de los árboles restantes; mientras que la poda contribuiría a producir madera más sana a la vez que libera espacio y se impide la propagación de incendios (Mendoza, 1993).

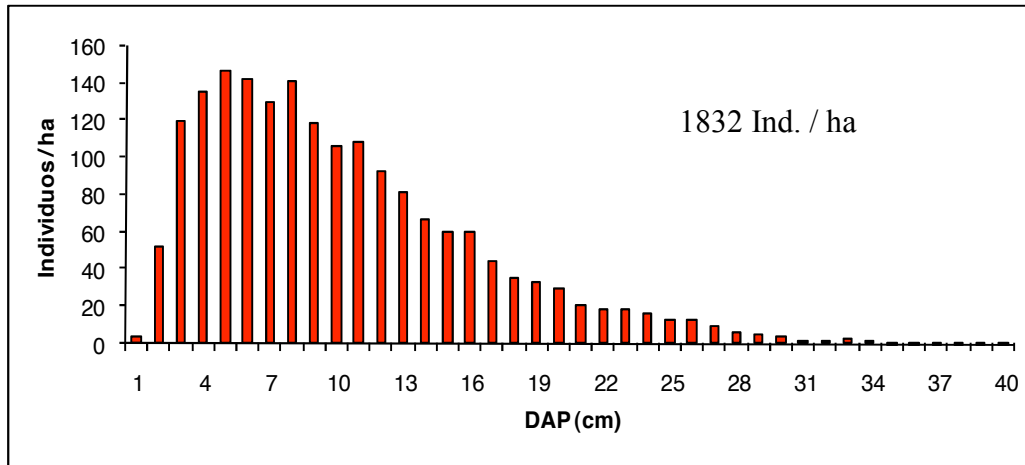


Figura 5.- Distribución por clases de *DAP* de 1 cm de amplitud de los individuos del estrato arbóreo, Ejido Atopixco.

La cobertura y los índices de área foliar presentaron el siguiente comportamiento (Cuadro 3). El menor porcentaje de cobertura forestal (35.66%) corresponde al rodal intervenido hace seis años (2001). Este rodal o anualidad 2001 es muy joven, de hecho el *DAP* máximo de 36.20 cm representa a los árboles padres dejados para la regeneración (método de monte alto). Por el contrario, la anualidad 1993 presenta el mayor porcentaje de cobertura arbórea (84.6%) y de índice de área foliar en sitio ($2.28 \text{ m}^2/\text{m}^2$). Es de notar que sea la anualidad 1993 (14 años de edad) y no las anualidades 1981 – 1984 (de hace 26 – 23 años), la que tenga los valores más altos de cobertura y área foliar. Aunado a esto, la anualidad 1993 tiene un índice de área foliar alométrico de $6.56 \text{ m}^2/\text{m}^2$, propio de sistemas muy productivos. Esto es un indicador de que los bosques de *Pinus spp.*, a una edad temprana alcanzan valores de $6 \text{ m}^2/\text{m}^2$ (Bolstad *et al.*, 2001; Leblanc *et al.*, 2005; Sampson *et al.*, 2001).

Sí los valores de área foliar en sitio (*LAI5*) y alométrico (*LAIAL*) son relacionados con el *DAP* promedio, se nota que los rodales 1993 - 1994 estarían entre los sitios con

densidad alta (Cuadro 3). En consecuencia, los valores $LAI5$ y $LAIAL$ de $2.28 \text{ (m}^2/\text{m}^2)$ - $6.26 \text{ m}^2/\text{m}^2$ estarían denotando rodales densos pero árboles delgados. No obstante se observa una tendencia lineal positiva entre los índices de área foliar ($LAI5$ y $LAIAL$) y el área basal (AB), es decir, a medida que aumenta el AB aumenta el índice de área foliar (Figura 9 y 12). Este es el caso de las anualidades 1982 – 1983, cuyos valores $LAIAL$ están entre los más altos ($8.7 - 6.7 \text{ m}^2/\text{m}^2$); además de poseer un área basal grande (Cuadro 3).

Cuadro 3.- Valores estructurales promedio e índices de área foliar en sitio ($LAI5$), alométrico ($LAIAL$) y cobertura del dosel arbóreo (COB).

ANUALIDAD	EDAD DE RODAL	DAP (cm)			Área Basal (m ² /ha)	LAI5	LAIAL	% COB
		MÍNIMO	PROMEDIO	MÁXIMO				
1981	26	2.50	10.29	23.80	16.64	1.86	5.67	81.18
1982	25	2.00	13.95	32.00	26.71	2.26	7.65	84.20
1983	24	2.10	18.76	38.20	32.99	2.05	8.70	83.14
1984	23	2.10	13.31	30.10	22.32	1.58	6.70	78.87
1985	22	2.00	17.16	34.50	28.62	1.84	7.38	79.77
1986	21	2.70	17.39	29.20	31.13	2.00	9.36	82.33
1987	20	3.00	18.12	32.80	29.04	2.22	8.20	83.59
1988	19	1.70	13.08	41.10	16.81	1.78	4.67	72.24
1989	18	2.40	12.04	26.10	13.95	1.23	4.97	68.13
1990	17	1.60	11.30	26.90	21.90	1.52	7.65	75.63
1991	16	1.50	12.65	31.00	15.98	1.86	5.20	81.11
1992	15	2.30	8.37	29.30	11.04	1.09	3.51	67.45
1993	14	1.50	9.56	37.00	19.95	2.28	6.56	84.60
1994	13	2.00	11.20	29.00	18.47	1.33	6.26	67.61
1995	12	1.80	10.32	28.50	16.27	1.42	5.53	72.66
1996	11	1.20	9.23	25.30	14.60	1.27	5.07	68.26
1997	10	1.00	8.65	31.00	11.22	1.06	3.55	62.69
1998	9	1.50	6.40	30.80	8.28	0.93	2.16	57.66
1999	8	0.50	6.45	19.50	5.94	0.64	1.85	47.90
2001	6	1.00	4.67	36.20	3.19	0.33	0.62	35.66
MEDIA		1.82	11.65	30.62	22.54	1.53	5.56	71.73

De lo anterior, también se observa una relación positiva entre la cobertura arbórea (COB) y el AB . Esta relación es más del tipo logarítmica que lineal, de hecho al graficar AB vs. COB se observa una asíntota (Figura 6) por debajo de 85% de cubierta forestal (Cuadro 3); esto indica que a cierto nivel de COB el incremento de AB tiende a reducirse. Tal implicación ecológica puede deberse a que el arreglo y forma de la copa

define el microclima del árbol, es decir, controla la cantidad de radiación solar, temperatura, humedad y desplazamiento del aire. Esto ejerce un efecto sobre el proceso fotosintético. Al sufrir dispersión y reflexión la luz solar - por virtud del dosel - la actividad fotosintética puede disminuir en estratos bajos provocando menor acumulación de biomasa en ellos, desviándola hacia los árboles más robustos. Este fenómeno natural puede ser perjudicial en rodales jóvenes bajo manejo, pues si bien su alta densidad puede acumular mucha área basal (Cuadro 3), ésta no es comercial. Ante la ausencia de tratamiento silvícola el rodal joven se comportaría como un bosque natural (Claveau *et al.*, 2005; Collet *et al.*, 2001; Long *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2005).

2.3.2. Relación de la cobertura (COB) vs. variables cartográficas y espectrales

Mediante el análisis de correlación de Pearson se identificaron las variables relevantes correlacionadas con la COB; en orden de importancia, el área basal (AB), precipitación media para lluvias (PMAMO) y secas (PMANA), temperatura máxima (TMAX), la reflectancia en la banda cuatro SPOT 5 (B4) y la exposición de la pendiente (EXPOSICIÓN) (Cuadro 4).

Cuadro 4. Correlación de Pearson para los pares de variables respuesta y predictoras.

	AB	PMANA	PMANA2	PMAMO	PMAMO2	TMAX	TMAX2	EXPOSICIÓN	B4	COB
AB	1	0.57	0.58	0.63	0.64	-0.45	-0.45	0.05	-0.30	0.81
PMANA	0.57	1	1.00	0.97	0.96	-0.64	-0.64	0.21	-0.08	0.49
PMANA2	0.58	1.00	1	0.97	0.97	-0.63	-0.63	0.20	-0.09	0.51
PMAMO	0.63	0.97	0.97	1	1.00	-0.60	-0.60	0.16	-0.11	0.55
PMAMO2	0.64	0.96	0.97	1.00	1	-0.58	-0.59	0.16	-0.12	0.56
TMAX	-0.45	-0.64	-0.63	-0.60	-0.58	1	1.00	-0.19	0.01	-0.41
TMAX2	-0.45	-0.64	-0.63	-0.60	-0.59	1.00	1	-0.19	0.01	-0.41
EXPOSICIÓN	0.05	0.21	0.20	0.16	0.16	-0.19	-0.19	1	0.06	0.21
B4	-0.30	-0.08	-0.09	-0.11	-0.12	0.01	0.01	0.06	1	-0.36
COB	0.81	0.49	0.51	0.55	0.56	-0.41	-0.41	0.21	-0.36	1

AB = Área Basal, PMANA = Precipitación Media Anual Noviembre-Abril, PMAMO = Precipitación Media Anual Mayo-Octubre, TMAX = Temperatura Máxima, EXPOSICIÓN = Exposición del terreno, B4 = Banda 4, COB = Cobertura arbórea.

El área basal (AB) de un rodal es un parámetro de gran importancia, se define como la suma por unidad de superficie de todas las proyecciones geométricas de los fustes a nivel del diámetro a la altura del pecho (DAP). Es una medida directa de la densidad para un sitio y edad determinados (Cuadro 3). Por esta razón, en el análisis de

funciones lineales, el área basal fue tomada como una variable más (Corvalán y Palma, 2006; Mendoza, 1993). Para más detalles ver Capítulo III de este reporte.

Se procedió a realizar una regresión múltiple lineal bajo el método *Stepwise*. Para cada variable se tomó como restricción o selección de entrada (*SLE*) y estancia (*SLS*) en el modelo una $P < 0.05$ (Cuadro 5).

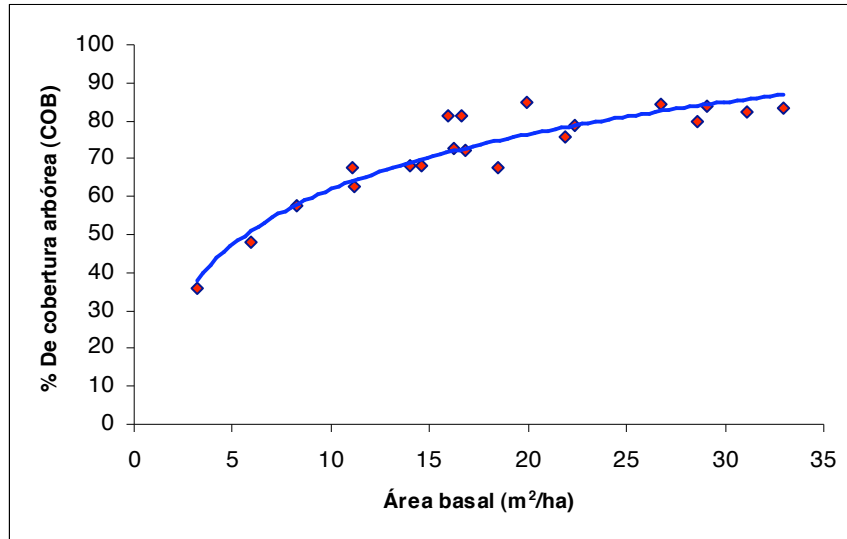


Figura 6.- Correlación de la cobertura arbórea (COB) vs. área basal del estrato arbóreo.

Cuadro 5. Significancia ($P < 0.001$) del análisis de varianza (ANOVA) y estimadores de los parámetros β_i .

	Modelo 1				Modelo 2			
R-cuadrada	0.7				0.7329			
R-ajustada	0.6883				0.7193			
	Estimador parámetro β_i	Pr > t	Corr., tipo I semiparcial cuadrado	FIV	Estimador parámetro β_i	Pr > t	Corr., tipo I semiparcial cuadrado	FIV
Intercepto	53.523	0.0001		0	3415.42	0.0001		0
AB	26.543	0.0001	0.649	1.105	22.59	0.0001	0.649	2.14
PMANA					-43.46	0.0001	0.0017	> 5
PMANA2					0.093	0.0001	0.016	> 5
PMAMO					1.81	0.0002	0.016	> 5
PMAMO2					-0.0005	0.0001	0.049	> 5
TMAX								
TMAX2								
EXPOSICIÓN	0.0301	0.0018	0.027	1.009				
B4	-0.271	0.0114	0.02	1.106				
	Modelo 3							
R-cuadrada	0.6647							
R-ajustada	0.6439							
	Estimador parámetro β_i	Pr > t	Corr., tipo I semiparcial cuadrado	FIV				
Intercepto	24994	0.0001		0				
AB								
PMANA	-35.01	0.0001	0.242	> 5				
PMANA2	0.08	0.0001	0.195	> 5				
PMAMO	-0.3	0.0001	0.055	> 5				
PMAMO2								
TMAX	-2329.12	0.0001	0.062	> 5				
TMAX2	66.1	0.0001	0.084	> 5				
EXPOSICIÓN								
B4	-0.31	0.0066	0.027	1.12				

AB = Área Basal, PMANA = Precipitación Media Anual Noviembre-Abril, PMAMO = Precipitación Media Anual Mayo-Octubre, TMAX = Temperatura Máxima, EXPOSICION = Exposición del terreno, B4 = Banda 4.

El primer modelo obtenido se escribe como:

$$COB = \beta_0 + \beta_1 AB + \beta_2 EXPOSICIÓN + \beta_3 B4 + \varepsilon_i \quad 1)$$

La R^2 ajustada (por grados de libertad) muestra que el modelo explica el 68.83% de la variabilidad en COB , con dos de sus parámetros estimados como altamente significativos ($\alpha \leq 0.01$) y uno significativo ($\alpha \leq 0.05$).

La R^2 semiparcial muestra que AB aporta 0.649 unidades a la R^2 no ajustada. Le siguen en importancia $EXPOSICIÓN$ y $B4$ que aporta 0.027 y 0.020 unidades a la R^2 no ajustada. El factor de inflación de la varianza (VIF) para AB , $EXPOSICIÓN$ y $B4$ es menor de 5 y mayor de 1, no se considera la existencia de multicolinealidad (Cuadro 5). Un segundo modelo ajustado (Cuadro 5) contempla como variables explicativas a AB , precipitación media para secas ($PMANA$) y su cuadrado ($PMANA2$), precipitación media para lluvias ($PMAMO$) y su cuadrado ($PMAMO2$).

El modelo dos se define como:

$$COB = \beta_0 + \beta_1 AB + \beta_2 PMANA + \beta_3 PMANA2 + \beta_4 PMAMO + \beta_5 PMAMO2 + \varepsilon_i \quad 2)$$

La R^2 ajustada muestra que el modelo explica el 71.93% de la variabilidad en cobertura arbórea (COB). Todos sus parámetros estimados son altamente significativos ($\alpha \leq 0.01$).

La R^2 semiparcial muestra que AB aporta 0.649 unidades a la R^2 no ajustada. Le siguen en importancia $PMAMO$ y $PMANA$ que aporta 0.02 unidades a la R^2 no ajustada. El factor de inflación de la varianza (VIF) para $PMANA$, $PMAMO$ y sus cuadrados es mayor de 5, se considera la existencia de multicolinealidad (Cuadro 5).

En un tercer modelo (Cuadro 5) se consideraron como variables explicativas únicamente a variables cartográficas y espectrales, dejándose fuera las variables de campo, específicamente el AB . Se considero a la precipitación media para secas ($PMANA$) y su cuadrado ($PMANA2$), precipitación media para lluvias ($PMAMO$) y su cuadrado ($PMAMO2$), y la banda 4 ($B4$).

La más alta relación está dada por el par $COB - PMAMO$, es una relación positiva de 0.55 unidades. A ésta le sigue el par $COB - PMANA$, que también es positiva con un valor de 0.49 unidades (Cuadro 4). El modelo tres se escribe como:

$$COB = \beta_0 + \beta_1 PMANA + \beta_2 PMANA2 + \beta_3 PMAMO + \beta_4 TMAX + \beta_5 TMAX2 + \beta_6 B4 + \varepsilon_i \quad 3)$$

La R^2 ajustada muestra que el modelo explica el 64.4% de la variabilidad en *COB*. Todos sus parámetros estimados son altamente significativos ($\alpha \leq 0.01$).

La R^2 semiparcial muestra que *PMANA* aporta 0.24 unidades a la R^2 no ajustada. Le siguen en importancia *TMAX* y *PMAMO* que aportan 0.06 y 0.05 unidades a la R^2 no ajustada. El factor de inflación de la varianza (*VIF*) para *PMANA*, *PMAMO*, *TMAX* y sus cuadrados es mayor de 5, se considera la existencia de multicolinealidad (Cuadro 5). Es importante resaltar que el dejar fuera la variable *AB* repercute en una disminución de la capacidad predictiva del modelo.

2.3.2.1. Modelado espacial de la cobertura

La R^2 de los modelos propuestos para estimar cobertura arbórea (*COB*) es moderadamente alta, sus valores van del 66.4 al 73.3% de la variabilidad explicada (Cuadro 5), siendo el área basal la variable independiente que más contribuyó al coeficiente de determinación parcial (R^2 ajustada). Esto es entendible dado que hay una relación ecológica directa entre la cantidad de *COB* y el espacio ocupado por los troncos (*AB*) (Hardy y Sonké, 2004; Lindenmayer *et al.*, 1999 Van Eysenrode *et al.*, 2002).

Del primer (1) y segundo modelo (2), para *COB*, es interesante la relación entre esa variable dependiente y las variables independientes exposición de la pendiente (*EXPOSICIÓN*) y reflectancia en la banda cuatro (*B4*) (Figura 7).

En el caso de la *EXPOSICIÓN* la relación es positiva, esto significa que la cantidad de *AB* incrementa con el cambio de exposición de suroeste a noreste del ejido. Esto concuerda con un estudio realizado por Bai *et al.*, (2004), quienes observaron que el pastizal abierto (en una zona templada) se presentaba con mayor frecuencia en exposición sur, en contraste, el bosque cerrado era más frecuentemente en las pendientes con exposición norte. Además el cambio de bosque abierto a bosque cerrado también ocurría con mayor probabilidad en esa zona. (Camarero y Gutiérrez. 1999; Lindenmayer *et al.*, 1999; Sánchez y López, 2003).

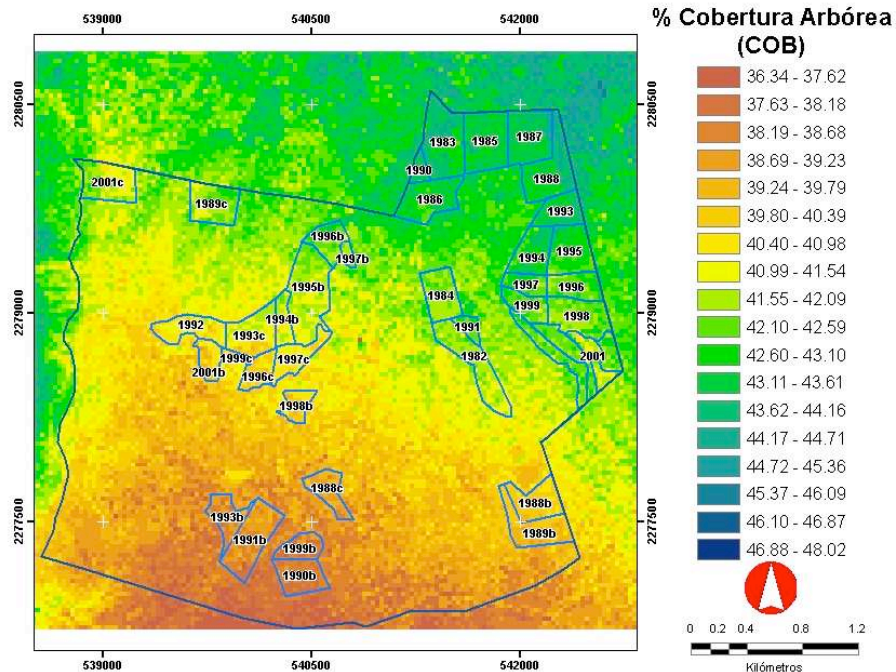


Figura 7. Distribución del porcentaje de cobertura arbórea en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 1 para cobertura (COB).

Por su parte, resulta muy revelador que la variable $B4$ presente un coeficiente negativo. De acuerdo a Sorani *et al.*, (1996) el porcentaje de cobertura vegetal puede medirse a partir del fuerte contraste que existe entre la reflectancia de la plantas en el rojo ($B2$) y el infrarrojo ($B3 - B4$). En plantas con actividad fotosintética los cloroplastos absorben la luz roja, mientras que las demás estructuras de la hoja (las turgentes) reflejan la mayor parte de la radiación infrarroja que reciben. La reflectancia en el infrarrojo ($B4$) disminuye con el estrés hídrico, al mismo tiempo que disminuye la absorción en rojo debido a la menor actividad fotosintética. Esto indica que a medida que la cobertura arbórea aumenta disminuye la cantidad de radiación reflejada en infrarrojo, en virtud de que esa radiación es absorbida por el agua de las hojas (Chen *et al.*, 2004).

En el modelo 2, el que las variables más significativas hayan sido precipitación media en época de secas ($PMANA$) y lluvias ($PMAMO$) apoya lo descrito arriba. Los coeficientes positivos de $PMANA$ y $PMAMO$ reflejan que la COB se hace más densa gracias a la disponibilidad de humedad (Figura 8). En el ejido Atopixco, por su topografía, se observa que la mayor cantidad de precipitación cae en la parte noreste del mismo, ocurriendo lo contrario en la parte suroeste. Ésta colinda con el valle de

Metztitlán, Hidalgo; una zona dominada por el matorral xerófilo crasicauale. Una vez más se hace patente que el agua es una condición y un recurso de gran valor para la vegetación arbórea (Ceccatoa *et al.*, 2001; Begon *et al.*, 1990).

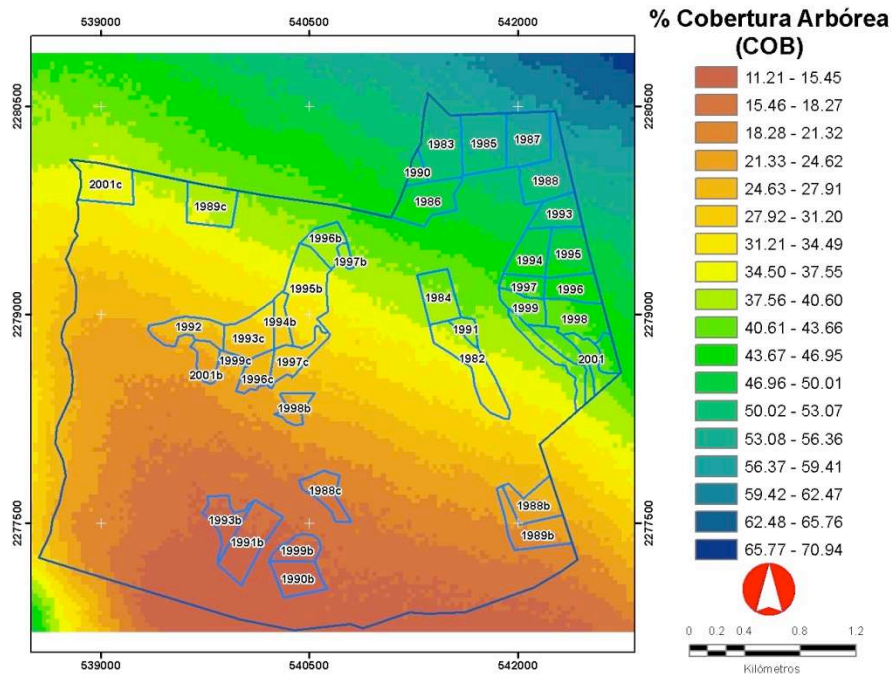


Figura 8. Distribución del porcentaje de cobertura arbórea en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 3 para cobertura (COB).

Los modelos 2 y 3 incluyen variables transformadas (elevadas al cuadrado), mismas que elevan la cantidad de varianza explicada (*VIF*). Este fenómeno es conocido como colinealidad. Sí en un modelo de regresión múltiple (*RLM*) alguna variable independiente es combinación lineal exacta de otra (s), el modelo es irresoluble debido a que la matriz $X'X$ es singular, es decir, su determinante es cero y no se puede invertir. En la práctica la colinealidad exacta raras veces ocurre. Es más frecuente la llamada casi-colinealidad, en otras palabras, alguna variable es "casi" combinación lineal de otra u otras, en tal caso, los coeficientes de correlación simple o múltiple entre las variables independientes es cercano a 1, aunque no llegan a dicho valor (Belsley *et al.*, 2005).

El fenómeno de colinealidad fue tomado en cuenta al momento de construir los modelos de *RLM*. De acuerdo a Guisan *et al.* (1999 y 2000) la introducción de variables independientes transformadas a un modelo lineal general (*GLM*), contribuye a mejorar la predicción del fenómeno observado. En este caso, se recomienda que la variable

transformada siempre vaya acompañada de su variable original, pues se da el caso de que aquella (por sí sola) no tendría interpretación ecológica. Partiendo de esta explicación, se tomó la libertad de dejar de lado los valores altos del *VIF* y tomar por buenos a los modelos construidos.

Por otro lado, en la Figura 8 se hace evidente la influencia de las isóneas de precipitación, en consecuencia la predicción en distribución de *COB* puede mejorarse si se contará con información geográfica de mayor calidad.

2.3.3. Relación del índice de área foliar en sitio (*LAI5*) vs. variables cartográficas y espectrales

Se identificaron, mediante correlación de Pearson, como variables correlacionadas con el índice de área foliar en sitio (*LAI5*) a el área basal (*AB*), precipitación media para lluvias (*PMAMO*), secas (*PMANA*) y su cuadrado (*PMANA2*), temperatura máxima (*TMAX*) y su cuadrado (*TMAX2*), altitud sobre el nivel del mar (*ALTITUD*), pendiente del terreno (*PENDIENTE*) y banda cuatro SPOT 5 (*B4*) (Cuadro 6).

Cuadro 6. Correlación de Pearson para los pares de variables respuesta y predictoras.

	AB	PMANA	PMANA2	PMAMO	TMAX	TMAX2	ALTITUD	PENDIENTE	B4	LAI5
AB	1	0.57	0.58	0.63	-0.45	-0.45	0.43	0.12	-0.30	0.83
PMANA	0.57	1	1.00	0.97	-0.64	-0.64	0.68	0.28	-0.08	0.49
PMANA2	0.58	1.00	1	0.97	-0.63	-0.63	0.67	0.29	-0.09	0.51
PMAMO	0.63	0.97	0.97	1	-0.60	-0.60	0.66	0.29	-0.11	0.57
TMAX	-0.45	-0.64	-0.63	-0.60	1	1.00	-0.73	-0.26	0.01	-0.33
TMAX2	-0.45	-0.64	-0.63	-0.60	1.00	1	-0.73	-0.26	0.01	-0.33
ALTITUD	0.43	0.68	0.67	0.66	-0.73	-0.73	1	0.02	0.01	0.30
PENDIENTE	0.12	0.28	0.29	0.29	-0.26	-0.26	0.02	1	-0.05	0.25
B4	-0.30	-0.08	-0.09	-0.11	0.01	0.01	0.01	-0.05	1	-0.37
LAI5	0.83	0.49	0.51	0.57	-0.33	-0.33	0.30	0.25	-0.37	1

AB = Área Basal, PMANA = Precipitación Media Anual Noviembre-Abril, PMAMO = Precipitación Media Anual Mayo-October, TMAX = Temperatura Máxima, ALTITUD = Altitud sobre el nivel medio del mar, PENDIENTE = Pendiente del terreno, B4 = Banda 4, LAI5 = Índice de Área Foliar en Sitio.

Como se aprecia en el Cuadro 6, la más alta correlación sucede entre el índice de área foliar en sitio (*LAI5*) y el área basal (*AB*). Es una relación lineal positiva (Figura 9). Se procedió a realizar una regresión múltiple lineal bajo el método *Stepwise* (Cuadro 7).

Cuadro 7. Significancia ($P < 0.001$) del análisis de varianza (ANOVA) y estimadores de los parámetros β_i .

Modelo 4					Modelo 5				
R-cuadrada	0.8094				0.7243				
R-ajustada	0.7955				0.7161				
	Estimador parámetro β_i	Pr > t	Corr., tipo I semiparcial cuadrado	FIV	Estimador parámetro β_i	Pr > t	Corr., tipo I semiparcial cuadrado	FIV	
Intercepto	1010.18	0.0001		0	0.79	0.0007		0	
AB	0.75	0.0001	0.68	2.5	1.145	0.0001	0.68	1.111	
PMANA	-0.903	0.0001	0.0007	> 5					
PMANA2	0.002	0.0001	0.044	> 5					
PMAMO	-0.007	0.0017	0.022	> 5					
TMAX	-101.355	0.0001	0.0002	> 5					
TMAX2	2.89	0.0001	0.05	> 5					
ALTITUD	-0.005	0.0206	0.011	2.6					
PENDIENTE					0.028	0.0034	0.025	1.014	
B4					-0.011	0.014	0.017	1.099	

Modelo 6				
R-cuadrada	0.7173			
R-ajustada	0.6998			
	Estimador parámetro β_i	Pr > t	Corr., tipo I semiparcial cuadrado	FIV
Intercepto	1153.092	0.0001		0
AB				
PMANA	-1.534	0.0001	0.24	> 5
PMANA2	0.003	0.0001	0.28	> 5
PMAMO	-0.012	0.0001	0.066	> 5
TMAX	-109.411	0.0001	0.012	> 5
TMAX2	3.118	0.0001	0.1	> 5
ALTITUD				
PENDIENTE				
B4	-0.012	0.0061	0.023	1.12

AB = Área Basal, PMANA = Precipitación Media Anual Noviembre-Abril, PMAMO = Precipitación Media Anual Mayo-Octubre, TMAX = Temperatura Máxima, ALTITUD = Altitud sobre el nivel medio del mar, PENDIENTE = Pendiente del terreno, B4 = Banda 4.

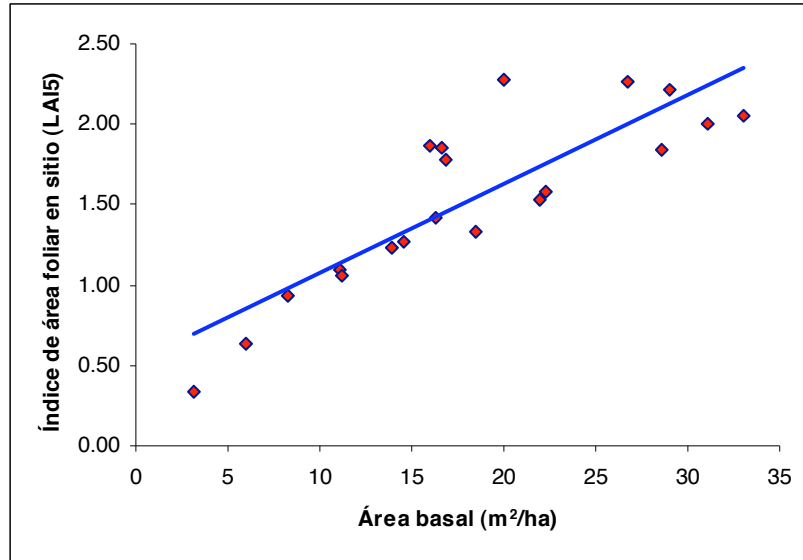


Figura 9.- Correlación del índice de área foliar en sitio (*LAI5*) vs. área basal del estrato arbóreo.

El modelo cuatro ajustado se define como:

$$LAI5 = \beta_0 + \beta_1 AB + \beta_2 PMANA + \beta_3 PMANA2 + \beta_4 TMAX + \beta_5 TMAX2 + \beta_6 PMAMO + \beta_7 ALTITUD + \varepsilon_i \quad 4)$$

La R^2 ajustada (por grados de libertad) muestra que el modelo explica el 79.55% de la variabilidad en índice de *LAI5* con todos sus parámetros estimados altamente significativos ($\alpha \leq 0.01$) y uno significativo ($\alpha \leq 0.05$).

La R^2 semiparcial muestra que *AB* aporta 0.68 unidades a la R^2 no ajustada. Le sigue en importancia *PMAMO* que aporta 0.022 unidades a la R^2 no ajustada. El factor de inflación de la varianza (*VIF*) para *AB* y *ALTITUD* es menor de 5 y mayor de 1, para el resto de las variables es mayor de 5; por tanto se considera la existencia de multicolinealidad (Cuadro 7).

Un quinto modelo (Cuadro 7) contempla como variables explicativas a *AB*, pendiente del terreno (*PENDIENTE*) y reflectancia en la banda cuatro SPOT5 (*B4*).

El modelo cinco se define como:

$$LAI5 = \beta_0 + \beta_1 AB + \beta_2 PENDIENTE + \beta_3 B4 + \varepsilon_i \quad 5)$$

La R^2 ajustada muestra que el modelo explica el 71.61% de la variabilidad en $LAI5$ con dos de sus parámetros estimados altamente significativos ($\alpha \leq 0.01$) y uno significativo ($\alpha \leq 0.05$).

La R^2 semiparcial muestra que AB aporta 0.68 unidades a la R^2 no ajustada. Le sigue en importancia $PENDIENTE$ que aporta 0.025 unidades a la R^2 no ajustada. El factor de inflación de la varianza (VIF) para todas las variables es menor de 5 y mayor de 1, no se considera la existencia de multicolinealidad (Cuadro 7).

En el sexto modelo (Cuadro 7) se consideraron como variables explicativas sólo a variables cartográficas y espectrales. Se considero a la precipitación media en secas ($PMANA$) y su cuadrado ($PMANA2$), temperatura máxima promedio ($TMAX$) y su cuadrado ($TMAX2$), precipitación media en lluvias ($PMAMO$) y reflectancia en la banda cuatro SPOT5 ($B4$).

La más alta relación está dada por el par $LAI5 - PMAMO$, es una relación positiva de 0.57 unidades. A ésta le sigue el par $LAI5 - PMANA$, que también es positiva con un valor de 0.49 unidades. Destaca la relación negativa (-0.33 y -0.37 unidades) de los pares $LAI5 - TMAX$ y $B4$ (Cuadro 6). El modelo seis se escribe como:

$$LAI5 = \beta_0 + \beta_1 PMANA + \beta_2 PMANA2 + \beta_3 TMAX + \beta_4 TMAX2 + \beta_5 PMAMO + \beta_6 B4 + \varepsilon_i \quad 6)$$

La R^2 ajustada muestra que el modelo explica el 69.98% de la variabilidad en $LAI5$. Todos sus parámetros estimados son altamente significativos ($\alpha \leq 0.01$).

La R^2 semiparcial muestra que $PMANA$ aporta 0.24 unidades a la R^2 no ajustada. Le sigue en importancia $PMAMO$ que aporta 0.066 unidades a la R^2 no ajustada. El factor de inflación de la varianza (VIF) para todas las variables (excepto $B4$) es mayor de 5, se considera la existencia de multicolinealidad (Cuadro 7).

2.3.3.1. Modelado del índice de área foliar en sitio

Al igual que en los modelos de cobertura arbórea (*COB*), la R^2 parcial es moderadamente alta para el índice de área foliar en sitio (*LAI5*). Como se muestra en el Cuadro 3, los valores de *LAI5* van de 0.33 a 2.28 (m^2/m^2). De acuerdo al procedimiento estadístico, los modelos propuestos para *LAI5* explican del 70.0 a 80.0% de la variabilidad total (Cuadro 7). Una vez más el *AB* es la variable independiente que más contribuye al coeficiente de determinación parcial (R^2 ajustada) (Figura 9 y 10).

La relación entre el índice de *LAI5* y el *AB*, en todos los modelos, es positiva. No obstante la cantidad de *AB* puede verse afectada por la arquitectura de las copas; razón por la cual, rodales de 14 a 16 años presentan altos valores de *LAI5* (Cuadro 3). Esto concuerda con lo mostrado por Ferrando *et al.* (2001), quien observó (en un bosque de *Austrocedrus chilensis*) que tres rodales bajo estudio no presentaban diferencias significativas en la cantidad de biomasa total ni en sus componentes; pero sí resultaron diferentes en términos de densidad y distribución de tamaño. Las diferencias estructurales en densidad, área basal y altura dominante no se expresaron en términos de productividad (hojarasca e incremento de biomasa); sin embargo, se detectaron diferencias significativas en el rendimiento de los productos maderables (cuyo valor se mide en función a las dimensiones de los troncos) con 80 y 38% menos de volumen de madera. Tal fenómeno podría explicarse en función a las condiciones ambientales (factor abiótico bajo el cual los organismos tienen diferentes respuestas, en virtud a su variación en el espacio y el tiempo) sobre todo al fenómeno de tolerancia a la sombra (Saldaña y Lusk, 2003).

Del cuarto y sexto modelo (Figura 11), para el *LAI5*, destaca su relación con las variables independientes precipitación media en lluvias (*PMAMO*), en secas (*PMANA*) y temperatura máxima (*TMAX*) así como pendiente del terreno (*PENDIENTE*) y reflectancia en la banda cuatro (*B4*) (Cuadro 6). En los dos primeros casos la correlación es positiva, esto significa que la cantidad del *LAI5* incrementa directamente con la abundancia de precipitaciones en época de lluvias y secas. El incremento en área foliar (y en consecuencia en área basal) no sólo se debe a la mayor cantidad en

precipitaciones, es también una respuesta al arreglo espacial de los individuos (Huber y Trecaman, 2002).

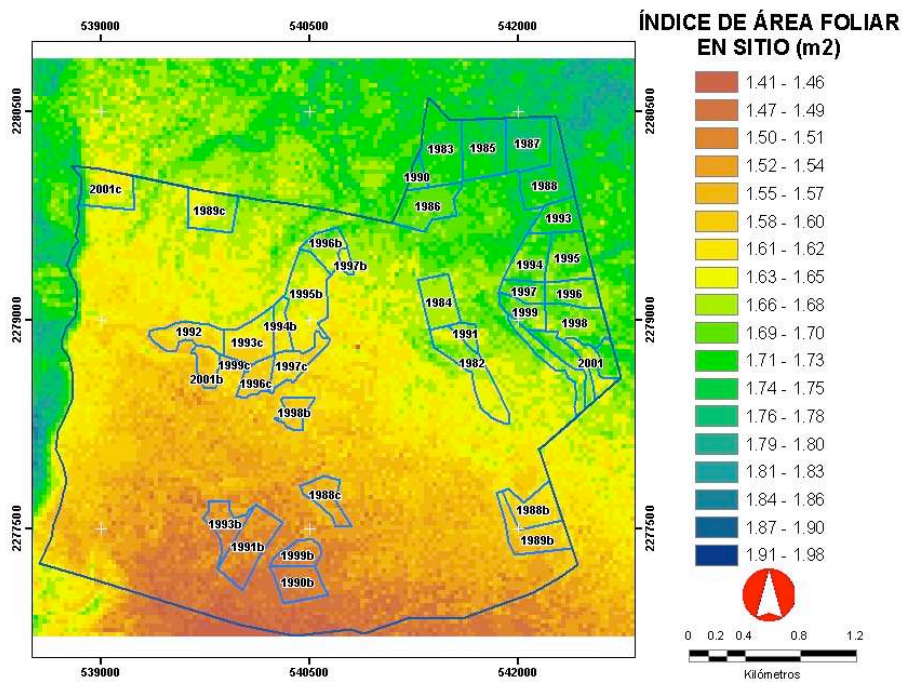


Figura 10. Distribución del índice de área foliar en sitio en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 5 para área foliar (*LAI5*).

La relación entre *LAI5* y la temperatura máxima promedio (*TMAX*) fue negativa (Cuadro 7). Por su parte, la relación entre *LAI5* y la pendiente del terreno (*PENDIENTE*) fue positiva (Cuadro 6). La explicación ecológica de que el incremento en temperatura tenga un efecto contrario en el *LAI5*, puede originarse en la relación (también negativa) entre temperatura y precipitación media (Cuadro 6). En la modelación de *LAI5* (Figura 11) se observa con claridad el efecto positivo de la precipitación en la distribución de tal índice. Lo contrario ocurre con la *TMAX*, esto se debe a que el Ejido Atopixco se halla en una zona de transición entre la vegetación de matorral sarcocaulé (suroeste) y el bosque templado de *Pinus* y *Fagus* (noreste). Por lo tanto, el aumento en temperatura esta denotando una menor cantidad de lluvias y la cercanía a comunidades de vegetación xerófila. En el caso de la pendiente, se esperaría que una menor inclinación del terreno beneficiaría al establecimiento de los árboles; sin embargo el coeficiente del modelo cinco (Cuadro 7) denota una relación positiva entre *LAI5* y *PENDIENTE*. En una inspección más detallada del área de estudio se tiene que un 55% de la superficie

total presenta una pendiente menor a 5°, 31% tiene una inclinación de 5 a 10° y solo un 14% es mayor a los 10°, es decir, la mayor parte del ejido es casi plano y las zonas más agrestes vendrían a ser los parte aguas. La combinación entre una pendiente moderada, suelo rico en nutrientes y un clima húmedo es garantía de buenas plantaciones (Noda y Hayashi, 2004; Panta, 2003; Romo, 2005; Rouvinen y Kuuluvainen, 2005).

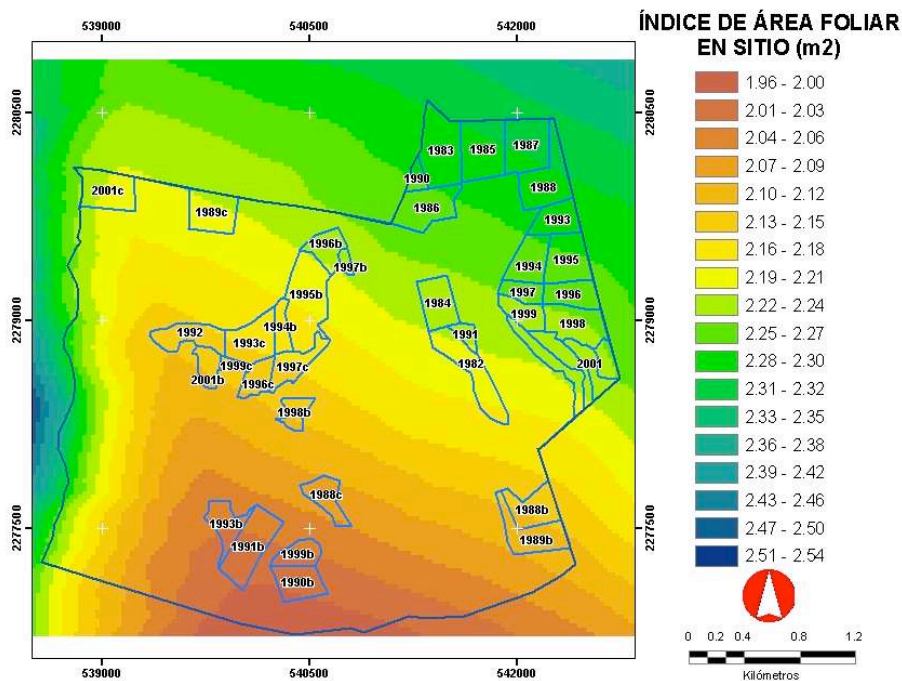


Figura 11. Distribución del índice de área foliar en sitio en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 6 para área foliar (LAI_5).

Por su parte, en los modelos cinco y seis, la relación entre el LAI_5 y la reflectancia en la banda cuatro (B_4) presentó un comportamiento similar al observado con la cobertura arbórea (COB). El coeficiente, para ambos modelos, fue negativo. El agua en las hojas fue la responsable de tal comportamiento, pues ésta absorbe la mayor cantidad de la radiación infrarroja al mismo tiempo que refleja el rojo (Brown *et al.*, 2000; Chen *et al.*, 2004; Gilabert *et al.*, 2002).

2.3.4. Relación del índice de área foliar alométrico (*LAIAL*) vs. variables cartográficas y espectrales

A través del análisis de correlación de Pearson se identificaron las variables correlacionadas con el índice de área foliar alométrico (*LAIAL*). En orden de importancia, el área basal (*AB*), precipitación media en lluvias (*PMAMO*), precipitación media en lluvias (*PMAMO*), temperatura máxima promedio (*TMAX*), índice de vegetación ajustado a la reflectancia del suelo (*SAVI*) y pendiente del terreno (*PENDIENTE*) (Cuadro 8).

Cuadro 8. Correlación de Pearson para los pares de variables respuesta y predictoras.

	AB	PMANA	PMANA2	PMAMO	PMAMO2	TMAX	TMAX2	PENDIENTE	SAVI	LAIAL
AB	1	0.57	0.58	0.63	0.64	-0.45	-0.45	0.12	0.32	0.97
PMANA	0.57	1	1.00	0.97	0.96	-0.64	-0.64	0.28	0.33	0.52
PMANA2	0.58	1.00	1	0.97	0.97	-0.63	-0.63	0.29	0.33	0.53
PMAMO	0.63	0.97	0.97	1	1.00	-0.60	-0.60	0.29	0.35	0.57
PMAMO2	0.64	0.96	0.97	1.00	1	-0.58	-0.59	0.29	0.35	0.58
TMAX	-0.45	-0.64	-0.63	-0.60	-0.58	1	1.00	-0.26	-0.26	-0.48
TMAX2	-0.45	-0.64	-0.63	-0.60	-0.59	1.00	1	-0.26	-0.26	-0.48
PENDIENTE	0.12	0.28	0.29	0.29	0.29	-0.26	-0.26	1	0.09	0.11
SAVI	0.32	0.33	0.33	0.35	0.35	-0.26	-0.26	0.09	1	0.26
LAIAL	0.97	0.52	0.53	0.57	0.58	-0.48	-0.48	0.11	0.26	1

AB = Área Basal, PMANA = Precipitación Media Anual Noviembre-Abril, PMAMO = Precipitación Media Anual Mayo-Octubre, TMAX = Temperatura Máxima, PENDIENTE = Pendiente del terreno, SAVI = Índice de Vegetación Ajustado a la Reflectancia del Suelo, LAIAL = Índice de Área Foliar Alométrico.

Al igual que para el índice de área foliar en sitio (*LAI5*), la correlación entre *LAIAL* y *AB* es lineal positiva (Figura 12). De las tres variables tomadas en campo (*COB*, *LAI5* y *LAIAL*), *LAIAL* es la que muestra mayor correlación con *AB*. Los modelos de regresión lineal múltiple ajustados se muestran en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Significancia ($P < 0.001$) del análisis de varianza (ANOVA) y estimadores de los parámetros β_i .

	Modelo 7				Modelo 8			
	Estimador parámetro β_i	Pr > t	Corr., tipo I semiparcial cuadrado	FIV	Estimador parámetro β_i	Pr > t	Corr., tipo I semiparcial cuadrado	FIV
R-cuadrada	0.9577				0.6198			
R-ajustada	0.956				0.5962			
Intercepto	24.956	0.0001		0	4024.45	0.0001		0
AB	6.247	0.0001	0.947	1.72				
PMANA					0.57	0.0001	0.01	> 5
PMANA2								
PMAMO	-0.002	0.001	0.006	2.15	-0.55	0.0001	0.33	> 5
PMAMO2					0.00012	0.0001	0.05	> 5
TMAX	-1.116	0.0002	0.002	1.59	-399.14	0.0002	0.17	> 5
TMAX2					11.21	0.0002	0.06	> 5
PENDIENTE					-0.1	0.0398	0.004	1.12
SAVI	-1.567	0.017	0.003	1.16				

AB = Área Basal, PMANA = Precipitación Media Anual Noviembre-Abril, PMAMO = Precipitación Media Anual Mayo-Octubre, TMAX = Temperatura Máxima, PENDIENTE = Pendiente del terreno, SAVI = Índice de Vegetación Ajustado a la Reflectancia del Suelo.

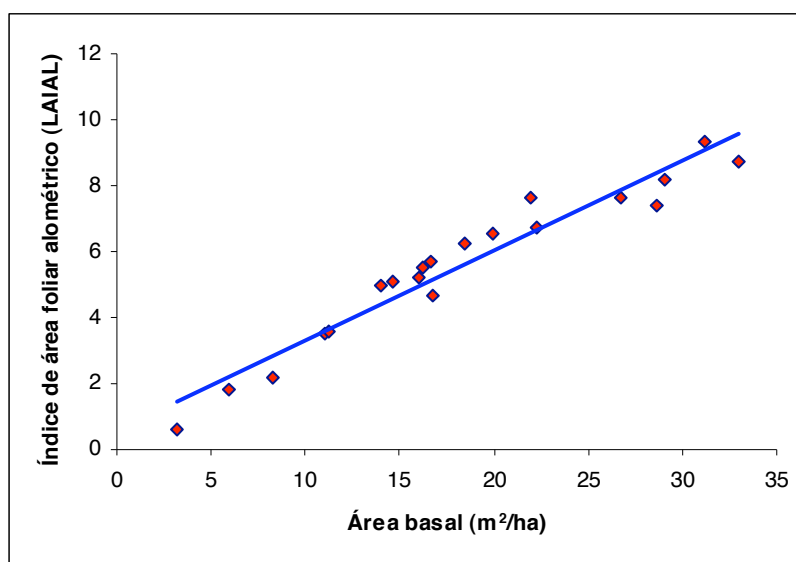


Figura 12.- Correlación del índice de área foliar alométrico (LAIAL) vs. área basal del estrato arbóreo.

El modelo siete ajustado se define como:

$$LAIAL = \beta_0 + \beta_1 AB + \beta_2 TMAX + \beta_3 PMAMO + \beta_4 SAVI + \varepsilon_i \quad 7)$$

La R^2 ajustada (por grados de libertad) muestra que el modelo explica el 95.6% de la variabilidad en *LAIAL* con tres de sus parámetros estimados como altamente significativos ($\alpha \leq 0.01$) y uno significativo ($\alpha \leq 0.05$).

La R^2 semiparcial muestra que *AB* aporta 0.95 unidades a la R^2 no ajustada. Le sigue en importancia *PMAMO* que aporta 0.006 unidades a la R^2 no ajustada. El factor de inflación de la varianza (*VIF*) para todas las variables es menor de 5 y mayor de 1, no se considera la existencia de multicolinealidad (Cuadro 9).

En el octavo modelo ajustado (Cuadro 9) se consideraron como variables explicativas sólo variables cartográficas y espectrales. Se tomó a la precipitación media en lluvias (*PMAMO*) y su cuadrado (*PMAMO*), precipitación media en secas (*PMANA*), pendiente del terreno (*PENDIENTE*), temperatura máxima promedio (*TMAX*) y su cuadrado (*TMAX2*).

La más alta relación está dada por el par *LAIAL* - *PMAMO*, es una relación positiva de 0.57 unidades. A ésta le sigue el par *LAIAL* - *PMANA*, que es positiva con un valor de 0.52 unidades. La relación *LAIAL* - *TMAX* es moderadamente baja, negativa de -0.48 unidades (Cuadro 12). El modelo ocho se escribe como:

$$LAIAL = \beta_0 + \beta_1 PMAMO + \beta_2 PMAMO2 + \beta_3 PMANA + \beta_4 PENDIENTE + \beta_5 TMAX + \beta_6 TMAX2 + \varepsilon_i \quad 8)$$

La R^2 ajustada muestra que el modelo explica el 59.62% de la variabilidad en *LAIAL* con todos sus parámetros estimados altamente significativos ($\alpha \leq 0.01$) y uno significativo ($\alpha \leq 0.05$).

La R^2 semiparcial muestra que *PMAMO* aporta 0.33 unidades a la R^2 no ajustada. Le sigue en importancia *TMAX* que aporta 0.17 unidades a la R^2 no ajustada. El factor de inflación de la varianza (*VIF*) para todas las variables (excepto *PENDIENTE*) es mayor de 5; se considera la existencia de multicolinealidad (Cuadro 9).

2.3.4.1. Modelado del índice de área foliar alométrico

A diferencia de los modelos para cobertura arbórea (*COB*) e índice de área foliar en sitio (*LAI5*), el índice de área foliar alométrico (*LAIAL*) guarda una mayor relación con el área basal (Figura 12). Ésta explica el 95.77% de la variabilidad total. De hecho el área basal fue la variable que más favoreció a la generación del modelo cartográfico de *LAIAL* (Figura 13).

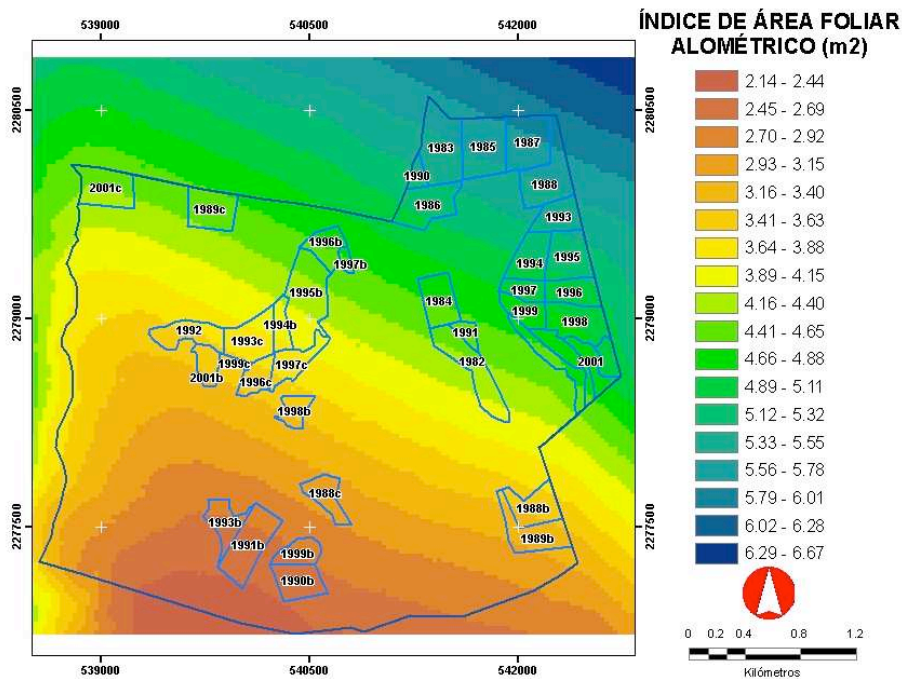


Figura 13. Distribución del índice de área foliar alométrico en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 7 para área foliar (*LAIAL*).

La relación ecológica entre *LAIAL* y el *AB*, también podría explicarse por la distribución del volumen de madera (*VOL*) o de la biomasa. Por ejemplo Claveau *et al.* (2005), en un bosque templado (*Abies*, *Picea* y *Pinus*) observaron que ciertos rasgos en la distribución de la biomasa variaba con el tamaño de los árboles y el paso de la luz. En unos casos, la proporción en la masa de acículas disminuyó conforme incrementaba la altura de los árboles; pero la tasa de disminución era mayor en árboles jóvenes que crecían bajo un 10% de luz solar. Esto podría explicar la tendencia positiva entre *LAIAL* y *AB*; sí bien en rodales jóvenes (14 – 16 años) se presentaban valores altos de *LAIAL* (3.5 a 6.5 m²/m²) por efecto de la cobertura y la densidad, estos valores no fueron

superiores a los observados en rodales maduros (5.6 a $9.4 \text{ m}^2/\text{m}^2$) (Cuadro 3). En otras palabras, la masa foliar (como una expresión de LAI) puede disminuir en rodales jóvenes si la densidad significa un incremento en COB , pues el dosel hace de la luz solar una limitante para el incremento en biomasa o en área basal; por su parte en rodales maduros el incremento en LAI puede hacerse constante (no aumentar) por virtud de la disminución en densidad más que por el aumento en altura de los árboles (Muñoz *et al.*, 2005).

De los dos modelos propuestos para LAI , destaca la relación entre ésta variable y el índice de vegetación ajustado al brillo del suelo ($SAVI$). Según algunos autores (Cándido, 1998; Lee y Hong, 2006; Ma *et al.*, 2004) el $SAVI$ presenta cierta sensibilidad al suelo para valores bajos de vegetación, pero aumenta su eficacia para valores mayores de índice de área foliar (LAI); por tanto, este índice es efectivo desde el momento que 1) a valores intermedios de vegetación, cuando los efectos de la dispersión múltiple de la radiación por el interior de la masa vegetal son mayores, toma en cuenta la influencia del suelo y 2) a diferencia del $NDVI$, que para valores un poco más altos de LAI alcanza rápidamente la saturación, el $SAVI$ disminuye la incertidumbre al estimar dicho parámetro biofísico a partir de medidas radio métricas. Este es el caso del Ejido Atopixco, mismo que se halla en una situación muy especial. Al observar con detalle la Figura 2, notamos que hacia el sur del mismo hay una pérdida de la cubierta vegetal. La causa no sólo debe atribuirse a la presión urbana, sino también al cambio en las condiciones ambientales del área bajo estudio (disminución de las precipitaciones, aumento en la temperatura, cambio en la estructura y propiedades del suelo, entre otras). De aquí la importancia de haber utilizado al $SAVI$ como una variables capaz de predecir la distribución del índice de área foliar (LAI) (Figura 13 y 14).

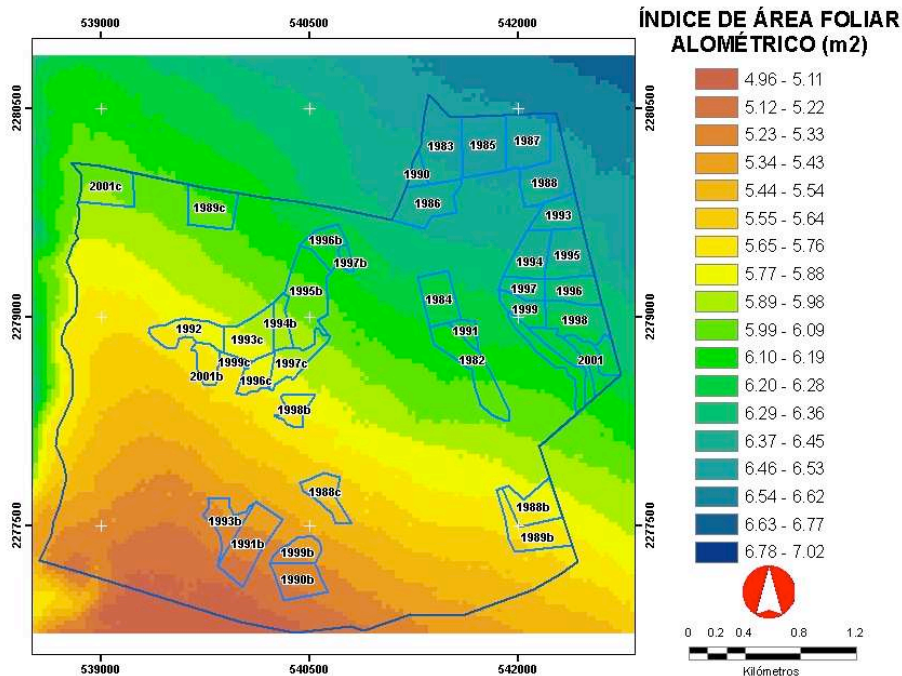


Figura 14. Distribución del índice de área foliar alométrico en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 8 para área foliar (*LAIAL*).

A semejanza de los modelos para *LAI5*, los modelos para *LAIAL* también ponen de manifiesto la importancia de la temperatura máxima promedio (*TMAX*), la precipitación media en lluvias (*PMAMO*) y la precipitación en periodo de secas (*PMANA*). La variable *TMAX* se relaciona de forma negativa con *LAIAL*, en cambio la relación entre *PMAMO* y *PMANA* con *LAIAL* es positiva (Cuadro 9). Tal fenómeno se explica mejor al revisar la manera en que se relacionan la temperatura con la precipitación, es decir, como la ubicación de Atopixco entre la zona de transición de matorral xerófilo a bosque templado se ve reflejada en las variables cartográficas *TMAX*, *PMAMO* y *PMANA*, y como éstas a su vez influyen en *LAIAL* (Cuadro 8).

Más allá de la relación entre temperatura y lluvia con el índice de área foliar, surge una duda ¿cómo la estructura foliar podría contribuir a expandir las masas forestales? Un fenómeno muy interesante (que no fue contemplado en este trabajo) fue el descrito por Dietz *et al.* (2006). De acuerdo a sus datos, la interceptación de lluvia es más alta en bosques naturales (30% de la precipitación es reevaporada a la atmósfera) que en bosques intervenidos (18 – 20% reevaporada). La variabilidad en la estructura vertical explica en gran medida la interceptación de las precipitaciones. De tal manera que el

porcentaje de escurrimiento aumenta conforme disminuye la altura de los árboles. Un hecho muy significativo es que hay una correlación positiva entre escurrimiento, la altura y el índice de área foliar suele ser muy alto. Por tanto, la altura de los árboles mejora la arquitectura foliar y aumenta la complejidad vertical, lo que a su vez favorece al almacenamiento de agua (Villavicencio y Valdez, 2003).

2.4. Conclusiones

Para la variable cobertura arbórea (*COB*) se encontró una correlación positiva con las variables cartográficas exposición de la pendiente (*EXPOSICIÓN*) y precipitación media anual en época de lluvias (*PMAMO*) y secas (*PMANA*). Tal relación responde a la necesidad de las especies arbóreas por humedad.

La relación de *COB* con la banda 4 (*B4*) merece atención, sí bien los coeficientes de correlación para esa variable espectral no fueron muy altos, queda claro que su tasa de cambio (β_i) tuvo un signo negativo. Esto concuerda con lo observado por los autores consultados. La *B4* - que corresponde al infrarrojo medio - presenta una tendencia negativa con relación a la presencia de estructura verdes, en virtud de la absorción de ese espectro por parte del agua de las hojas.

Por su parte el índice de área foliar en sitio (*LAI5*) fue muy sensible a la densidad arbórea, razón por la cual rodales jóvenes tuvieron valores de *LAI5* similares a los de rodales más viejos.

El *LAI5* presentó una buena correlación con las variables cartográficas precipitación media anual (*PMA*) y temperatura máxima anual (*TMAX*). Con la primera hubo una relación positiva, mientras que con la segunda la relación fue negativa. Al igual que con *COB*, el *LAI5* se beneficia de las lluvias, pero se ve afectada por el incremento de la temperatura. En este caso, la temperatura se puede asociar a las áreas más secas del ejido, es decir, a la parte donde empieza la transición de bosque templado a matorral xerófilo. También destaca la relación negativa de *LAI5* con *B4*, una vez más se hace patente la importancia de las estructuras foliares en la absorción y reflectancia de la luz solar, que es captada por los sensores remotos (SPOT 5).

El índice de área foliar alométrico (*LAIAL*) fue sensible a la cantidad de área basal (*AB*). Esto contribuyó a que los modelos para estimar *LAIAL* (a partir de *AB* y variables cartográficas) presentaran los mayores coeficientes de correlación parcial. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el *LAIAL* es una variable que se deriva de mediciones de campo (como el *DAP*), de aquí que su relación con *AB* sea tan alta. El *LAIAL* tuvo un comportamiento semejante al de *LAI5* con relación a las variables cartográficas *PMA* y *TMAX*. Cabe recordar que la estimación de *LAIAL* dependió del cálculo de la biomasa seca del follaje, en otras palabras, el incremento en biomasa se beneficia de un clima más templado y húmedo.

Destaca la relación de *LAIAL* con el índice de vegetación ajustado al suelo (*SAVI*). De todos los índices probados, el *SAVI* fue el único que resulto significativo para la generación de los modelos lineales. De acuerdo a varios autores y a lo descrito en este trabajo, el *SAVI* es un índice muy útil cuando las zonas a estudiar presentan cierta variabilidad en cubierta vegetal, producto de áreas con suelo desnudo o poca cubierta verde. Condición que puede apreciarse con claridad en el Ejido Atopixco.

Finalmente, una de las mayores metas perseguidas por esta investigación fue mejorar la predicción en *COB* y *LAI*s (*LAI5* y *LAIAL*), utilizando variables cartográficas. Sin embargo, los resultados obtenidos fueron mixtos. Por un lado los modelos que sólo contemplaron como elementos predictores a variables cartográficas, tuvieron coeficientes de correlación parcial menores, en comparación con aquellos modelos que usaron *AB* como una variable más. Por otra parte, si bien la utilización de *AB* ayudó a mejorar las predicciones de *COB* y *LAI*s sería más deseable que los modelos sólo emplearan variables espectrales y cartográficas. Esto con el fin de obtener verdaderos ahorros al momento de inventariar recursos forestales.

Uno de los mayores problemas fue la preparación de las variables cartográficas, éstas provinieron de mapas de escala pequeña. Bajo estas circunstancias, la interpolación de las isotermas e isoyetas fue todo un reto. Aparecieron amplias zonas con poca variación, razón que afectó a los modelos. No obstante, los coeficientes de correlación parcial muestran que las variables cartográficas sí contribuyen a explicar variaciones en *COB* y *LAI*s. Por tanto se sugiere incorporar a los modelos información cartográfica de escala más grande ($\geq 1:50\ 000$).

Capítulo 3. Modelación espacial de área basal y volumen de madera en bosques manejados de *Pinus patula* y *Pinus teocote* en el Ejido Atopixco, Hidalgo.

Resumen

Se modeló el área basal (AB m²/ha) y volumen de madera (VOL m³/ha) utilizando variables de porcentaje de cobertura arbórea (COB), índice de área foliar en sitio ($LAI5$ m²/m²) y alométrico ($LAIAL$ m²/m²), variables cartográficas y de reflectancia obtenidas de una imagen multiespectral del satélite SPOT 5. Para la caracterización de las condiciones ambientales se digitalizó la carta de Efectos Climáticos (escala 1: 250 000) de INEGI y se manipuló el Modelo Digital de Elevación (MDE) correspondiente a la zona. Se integró un Sistema de información Geográfica (SIG) constituido por veinte capas de información: Altitud, Pendiente, Exposición, Temperaturas, Precipitaciones, Bandas Espectrales, y dos grupos de índices de vegetación basados en a) la relación espectral de bandas ($NDVI - CTVI$) y b) la distancia espectral entre vegetación y suelo desnudo ($PVI - SAVI$). Con datos de campo y del SIG , se ajustaron modelos de regresión lineal múltiple. Para el AB la relación más significativa fue $LAIAL$, Temperatura Media Anual (TMA), $ALTITUD$ y la Banda 4 ($P < 0.001$, $R^2 = 0.9662$). Para el VOL la relación más significativa fue $LAIAL$, Temperatura Media Anual (TMA) y $ALTITUD$ ($P < 0.001$, $R^2 = 0.8856$). La relación estadística entre los parámetros forestales y las condiciones ambientales, demuestran que los SIG son una buena herramienta para el inventariado de recursos maderables.

Palabra clave: Modelado Espacial, Variables Cartográficas, SIG , Variables Espectrales, Inventario Forestal.

Chapter 3. Spatial modelling of basal area and tree volume in managed *Pinus patula* - *Pinus teocote* forests in the Ejido Atopixco, Hidalgo.

Abstract

Basal area (AB m²/ha) and tree volume (VOL m³/ha) were modelled with basis on tree cover percentage (COB), leaf area indices both, recorded in the field ($LAI5$ m²/m²) and estimated from allometric relations ($LAIAL$ m²/m²), cartographic variables and reflectance data derived from a multispectral SPOT 5 image. Environmental conditions were characterized by digitizing the INEGI's chart of Climatic effects (scale 1: 250 000) and processing the Digital Elevation Model (MDE) of the study area. A Geographic Information System (GIS) including 20 data layers was set up: Elevation, Slope's angle and Aspect, Temperature, Precipitation, Spectral bands, and two sets of Vegetation Indices based either on a) the ratio of spectral bands ($NDVI$ and $CTVI$) or on b) the spectral distance between vegetation and bare soil (PVI and $SAVI$). Multiple linear regression models were built based on field and GIS data. AB was significantly related to $LAIAL$, mean annual temperature (TMA), $ALTITUD$ and Band 4 reflectance ($P < 0.001$, $R^2 = 0.9662$). VOL was significantly related to $LAIAL$, mean annual temperature (TMA) and $ALTITUD$ ($P < 0.001$, $R^2 = 0.8856$). The statistical relationship found between forest variables and environmental conditions show that GIS constitute a useful tool for the inventorying of forest resources.

Key words: Spatial modelling, GIS variables, spectral variables, GIS, forest inventory.

3.1. Introducción

Una de las principales razones que han impedido evaluar de manera confiable los recursos forestales, se debe a que los métodos tradicionales de mapeo son costosos tanto en términos monetarios como de tiempo. Por ejemplo, el primer Inventario Nacional Forestal de México requirió 24 años para completarse: de 1961 a 1985 (Sorani *et al.*, 1995; Sorani y Álvarez, 1996). Afortunadamente la evaluación de los recursos naturales ha cambiado radicalmente en la última década, gracias a la tecnología de la geomática, en particular a los satélites de observación terrestre, y los Sistemas de Información Geográfica (Camarero y Gutiérrez, 1999; Maliha y Chaloud, 2002; Wallerman, 2003).

A pesar de que la geomática ha mejorado las metodologías de los inventarios forestales, sus resultados son válidos únicamente para escalas pequeñas (por ejemplo 1: 250 000) (Velázquez, 2002). Para escalas grandes (< 1: 25 000) a nivel de rodal, la precisión alcanzada a la fecha no es suficiente para propósitos de manejo forestal (Mäkelä y Pekkarinen, 2001). De aquí que los esfuerzos por modelar el comportamiento del volumen de madera (Lee, 1995), el área basal (González *et al.*, 2004) o la geometría de claros a escalas pequeñas (Silbernagel y Moeur, 2001), se encaminen a comprender los efectos de la absorción y reflectancia de la estructura arbórea (hojas y ramas) (McRoberts *et al.*, 2002), las limitaciones de la resolución espacial y espectral de los sensores remotos, y a estudiar modelos matemáticos que mejor describan el comportamiento ecológico de las masas forestales (Franco *et al.*, 2001; García *et al.*, 2006). En especial, la importancia del análisis estadístico exploratorio en el proceso de interpolación de datos espaciales y la dependencia del valor de un atributo en función de su localización geográfica (Miranda y Condal, 2003). En este sentido, el objetivo de este trabajo es describir dos variables importantes del bosque, el área basal (*AB*) y el volumen de madera (*VOL*) del Ejido Atopixco, por medio de técnicas de modelado espacial. Con el fin de aportar herramientas que faciliten la administración racional de los recursos forestales.

3.2. Materiales y Métodos

3.2.1. Área de estudio

El Ejido Atopixco tiene una superficie de 1170.97 ha. Se ubica dentro del municipio de Zacualtipán, entre las coordenadas 20°37' 26" N y 98°37' 48" W, y 20°35' 20" N y 98° 35' 23" W. Este municipio colinda al norte con Tianguistengo, al sur con Metzquititlán, al este con Veracruz, y al oeste con Metztlán y Xochicoatlán (Figura 1). Su fisiografía comprende la Sierra Madre Oriental, conocida como Sierra Alta Hidalguense y una parte del Eje Neovolcánico, subprovincia Carso Huasteco. Está conformado por pendientes, mesetas y cañones. La altitud media es de 2100 m (EMM, 2000).

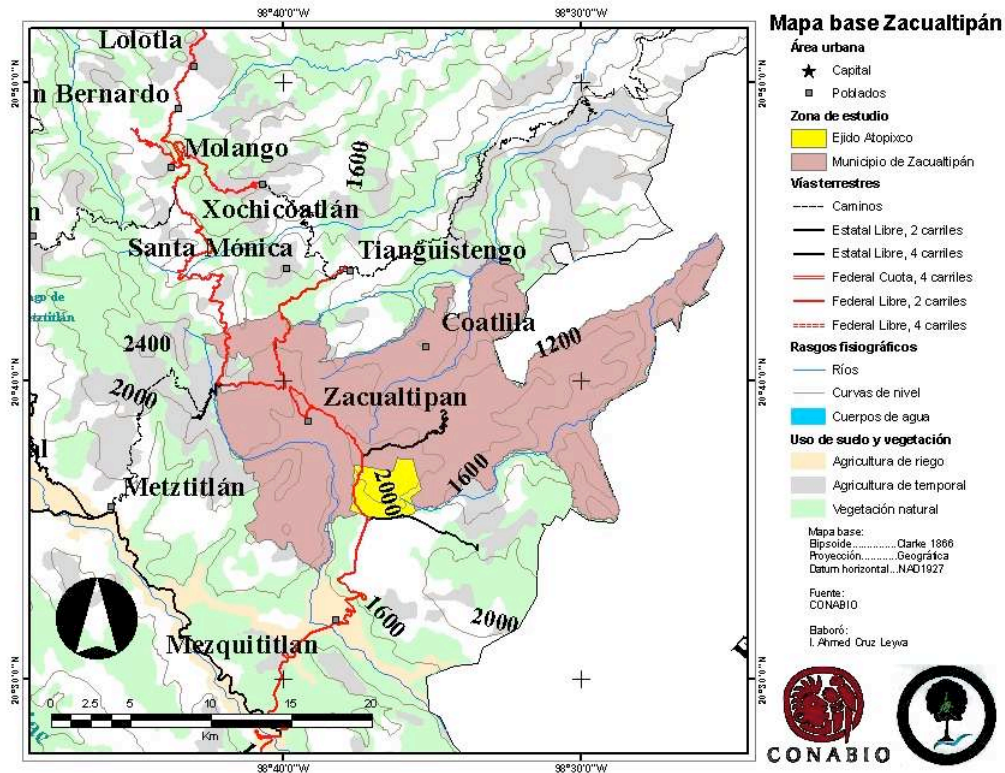


Figura 1. Ubicación de Ejido Atopixco, municipio de Zacualtipán de Ángeles.

El municipio de Zacualtipán cuenta con tres ríos principales: El Pánuco, El Zoyatla y El Miniahuaco, además de la laguna Chapultepec. Su sustrato geológico data del periodo Cenozoico (terciario superior) y está conformado por rocas ígneas extrusivas del tipo toba ácida (Ts - Ta, al norte) y basalto (Ts - B, al sur). El sustrato edáfico está

representado por suelos acrisol órtico (Ao), luvisol crómico (Lc) y feozem háplico (Hh). Se puede observar, en la parte norte del ejido que el suelo es rico en nutrientes; caso contrario es la parte sur donde el suelo es delgado y pedregoso (EMM, 2000).

En el área de estudio predomina el clima templado húmedo (C(m)) y templado subhúmedo (C(w2)) con temperatura media anual entre 12 y 18 °C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18 °C y temperatura del mes más caliente bajo 22 °C. La precipitación media anual oscila (temporalmente) entre 700 y 2050 mm, precipitación del mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual (2050 milímetros). El periodo de lluvias es de junio a septiembre (EMM, 2000).

El 30 de abril de 1991, el Ejido Atopixco recibió el Premio Nacional al Mérito Forestal por parte de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) como reconocimiento al buen manejo y aprovechamiento de sus recursos forestales. Para esto ha creado, bajo el método de desarrollo silvícola, conjuntos de rodales monoespecíficos, coetáneos de edades que van de 0 a 26 años (Figura 2). En los rodales intervenidos encontramos especies como: *Pinus patula*, *Pinus teocote* y en menor abundancia *Pinus greggii* y *Pinus montezumae*. En las áreas de vegetación natural hallamos especies tales como: *Quercus crassipes*, *Q. laurina*, *Q. excelsa*, *Q. castanea*, *Q. rugosa*, *Cornus disciflora*, *Viburnum sp*, *Cleyera theaeoides*, *Alnus sp*, *Arbutus xalapensis*, *Prunus serotina*, *Symplocus sp*, *Ternstroemia sp*, *Vaccinium leucanthum*, *Fagus grandifolia* subsp. mexicana, entre otras (Ángeles, 1995).

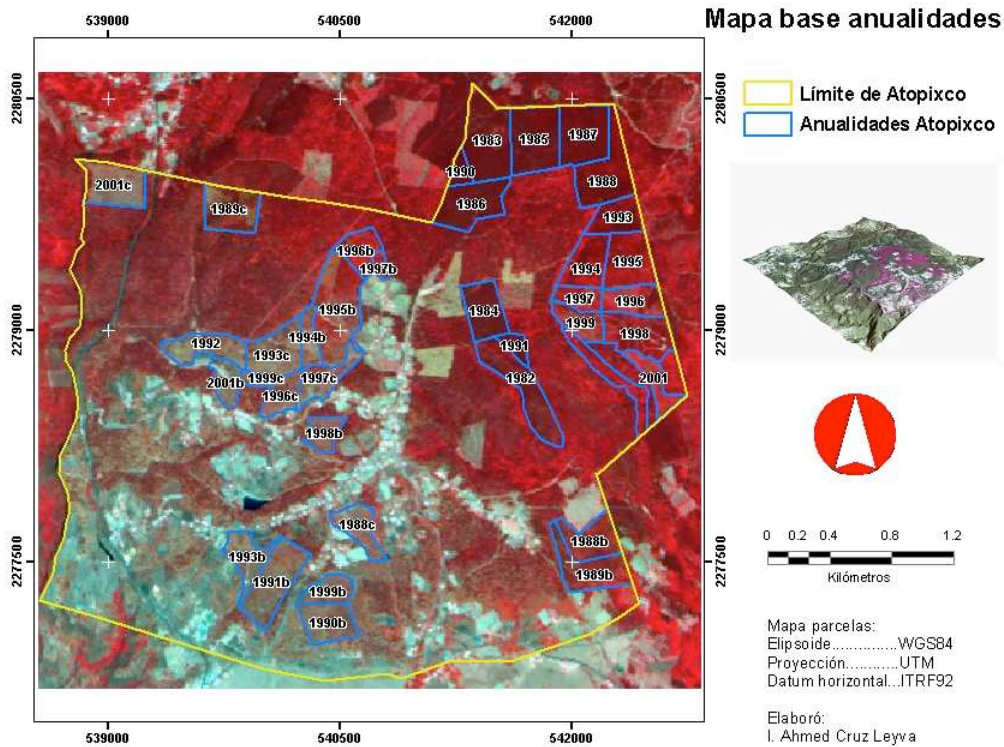


Figura 2. Ubicación de rodales bajo manejo forestal, Ejido Atopixco. Composición RGB (432) con los rodales sobrepuestos, imágenes año 2006. Los números indican el año de cosecha. La edad del rodal se calcula restando al año actual la edad de cosecha.

3.2.2. Adquisición y procesamiento en gabinete de datos de campo

Para establecer los límites geográficos del área de estudio, se consultó “El plan general de manejo forestal del Ejido Atopixco”. Con esta información y con el auxilio de un modelo digital de elevación (resolución de 30 m INEGI) se delimitó la poligonal del Ejido y de los diferentes rodales coetáneos que lo integran.

Se definieron 21 anualidades que corresponden a rodales coetáneos de edades que van de 0 a 26 años. Dentro de cada anualidad se ubicaron al azar tres sitios circulares de muestreo, cada uno de 400 m² de superficie. Se marcó el norte y el árbol central (en cada sitio) y se procedió a medir el diámetro a la altura del pecho (*DAP*) de todos los árboles al tiempo que se etiquetaban. También se midió la altura total de al menos 5 árboles de *DAP* variable. Finalmente, con un GPS Trimble Geoexplorer III se georeferenció cada uno de los 114 sitios muestreados (Figura 3) (Matteucci y Miranda, 1982; FAO, 2004). Mayores detalles se presentan en el Capítulo II de este reporte.

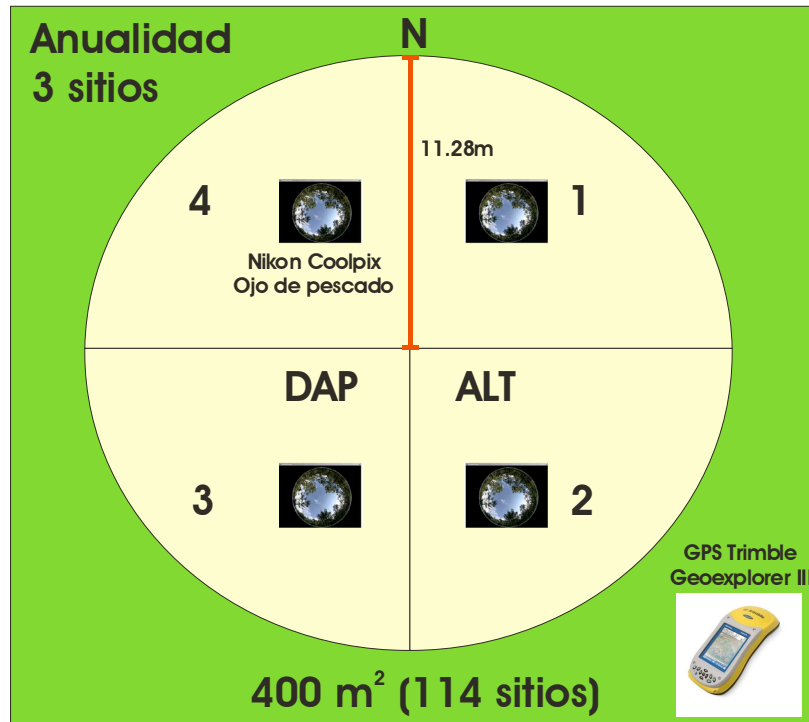


Figura 3. Adquisición de datos de campo, Ejido Atopixco.

En gabinete se estimó el área basal (m^2) de los árboles medidos, para esto se utilizó la siguiente ecuación (Husch *et al.*, 2003):

$$AB = (\pi / 40000) \times DAP^2$$

Donde:

AB = Área basal (m^2).

DAP = Diámetro a la altura del pecho (cm).

Para estimar el volumen total de madera por árbol, se empleó la ecuación de Carrillo *et al.* (2004):

$$VOL = \exp(-9.7688) \times (DAP^2 \times ALT)^{0.9451}$$

Donde:

VOL = Volumen total de madera (m^3).

DAP = Diámetro a la altura del pecho (cm).

ALT = Altura total (m).

El volumen total, en especies hojosas, fue estimado con auxilio de la ecuación ajustada por SAG (1976):

$$VOL = \exp(-9.80434696) \times DAP^{1.91033696} \times ALT^{1.03262007}$$

Donde:

VOL = Volumen total de madera (m³).

DAP = Diámetro a la altura del pecho (cm).

ALT = Altura total (m).

Para analizar la estructura por tamaños, se construyeron histogramas de frecuencias, con base en el *DAP* y la densidad de todas las especies.

3.2.2.1. Inventario forestal

Teniendo la información del área basal y el volumen de los árboles medidos en los 114 sitios de muestreo se procedió a calcular el inventario de los recursos maderables en el Ejido Atopixco. Para este fin se aplicaron dos técnicas de inventariado: muestreo estratificado al azar (*MEA*) y muestreo de razón y regresión (*MRR*). El propósito fue obtener una estimación base en volumen de madera que sirviese de referencia para comparar las estimaciones realizadas con los modelos propuestos en 3.2.2.4

El *MEA* es una forma especial del muestreo simple aleatorio (*MSA*), tiene la ventaja de tomar en cuenta las diferencias relevantes entre áreas arboladas. Es decir, una forma de homogenizar la variabilidad arbórea es crear estratos (rodales) que tomen en cuenta las diferencias en edad, especies, tipo de tratamiento o calidad del sitio. Sí a cada rodal se aplican los estadísticos pertinentes, al final se tendrá una estimación poblacional más precisa (por ejemplo del volumen o área basal) que la obtenida por muestreo simple aleatorio (Schreuder *et al.*, 2005).

Para el *MEA* el número de estratos se simboliza por “L”, la suma de ellos es el marco

de muestreo $N = \sum_{h=1}^L Nh$. La media por estrato se define como $\bar{Y}_h = 1/nh \sum_{i=1}^{nh} Y_{h,i}$, donde

$Y_{h,i}$ es el valor de interés de la *i*-ésima unidad muestral del *h*-ésimo estrato. La media

poblacional, por su parte, se expresa como $\bar{Y}_{ESTotal} = \sum_{h=1}^L \frac{Nh}{N} \times \bar{Y}_h = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^L Nh \times \bar{Y}_h$. Siendo la

varianza de la media poblacional $S_{\bar{Y}_{ESTotal}}^2 = \sum_{h=1}^L \left(\frac{Nh}{N}\right)^2 S_{\bar{Y}_h}^2$ de la cual $S_{\bar{Y}_h}^2$ es la varianza de

la media por estrato o $\frac{S_h^2}{nh} \left(1 - \frac{nh}{Nh}\right)$. Ésta no debe confundirse con la varianza del total

estratificada, la cual es $S_{T_{EST}}^2 = N^2 S_{\bar{Y}_{ESTotal}}^2 = \sum_{h=1}^L S_{T_h}^2$ y que es parte de la ecuación para

definir el intervalo de confianza sobre el inventario total. Esto es $\left(\bar{Y}_{ESTotal} \pm 2\sqrt{S_{\bar{Y}_{ESTotal}}^2}\right) \times N$,

donde $2\sqrt{S_{\bar{Y}_{ESTotal}}^2}$ o $2\sqrt{S_{\bar{Y}_{ESTotal}}^2} \times N$ es la amplitud del intervalo de confianza al 95% (B) y

la precisión se puede definir como $2\sqrt{S_{\bar{Y}_{ESTotal}}^2} / \bar{Y}_{ESTotal}$. El tamaño de muestra total puede

determinarse a partir de las varianzas muestrales por estrato y la amplitud deseada

del intervalo de confianza al 95% como: $n = \frac{\sum Nh^2 \times S_{Y_h}^2}{\frac{B^2}{4} + \sum_{h=1}^L Nh \times S_{Y_h}^2}$ (Schreuder *et al.*, 2005).

Tanto los estimadores de *MRR*, como el *MEA*, fueron desarrollados para aumentar la precisión de una muestra, utilizando información complementaria de la población estudiada. Para elegir el uso de un estimador de regresión o uno de razón se deben graficar los datos de interés, por ejemplo área basal vs. cobertura arbórea o *SAVI* vs. volumen de madera (Figura 4) (Valdez *et al.*, 2006).

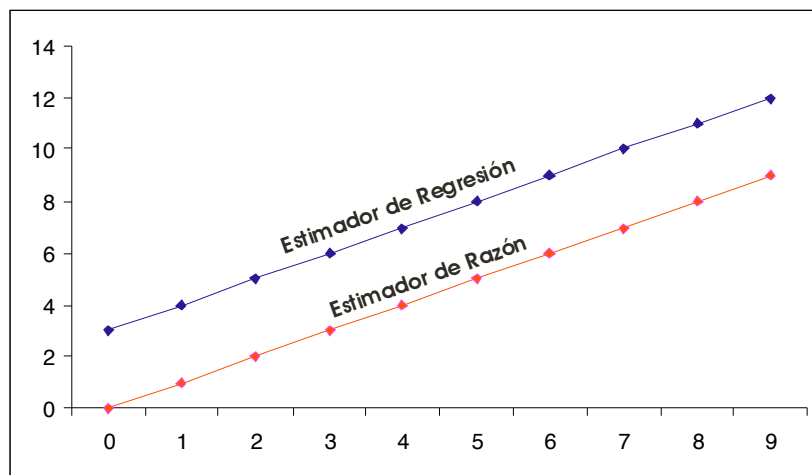


Figura 4. Relaciones postuladas en las variables X y Y.

Sí la recta definida por la relación entre las variables pasa por el origen la estimación de razón es recomendable. Sí la relación no pasa por el origen, se debe utilizar el estimador de regresión. Por el tipo de información manejada en este trabajo, se optó por el estimador de regresión (Schreuder *et al.*, 2005; Valdez *et al.*, 2006).

El estimador de regresión es sesgado pero de alta precisión y varianza pequeña. Bajo ciertas condiciones puede hacerse preciso e insesgado (Schreuder *et al.*, 2005).

Para el *MRR* la media \bar{Y}_{Reg} se expresa como $\bar{Y}_{Reg} = \bar{Y} + b \times (\mu_x - \bar{X})$, donde “b” es la tasa

de cambio promedio de X_i y Y_i . Es decir $b = \frac{\sum X_i Y_i - \sum X_i \times \sum Y_i}{\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n}}$. La varianza del

estimador de regresión se define como $S_{\bar{Y}_{Reg}}^2 = \frac{S_{xy}^2}{n} \times \left(1 - \frac{n}{N}\right)$, donde S_{xy}^2 es la covarianza

de la variable auxiliar “X” y la variable de interés “Y” siendo $S_{xy}^2 = \frac{SC(y) - b^2(SC(x))}{n - 2}$. En

este caso $SC(y) = \sum Y_i^2 - \frac{(\sum Y_i)^2}{n - 1}$. A partir de la varianza de la regresión ($S_{\bar{Y}_{Reg}}^2$) se

pueden establecer los límites de confianza para la media estimada. Esto es $\bar{Y} \pm 2\sqrt{S_{\bar{Y}_{Reg}}^2}$ donde $2\sqrt{S_{\bar{Y}_{Reg}}^2}$ es la amplitud del intervalo de confianza al 95%.

Finalmente, el tamaño de muestra puede determinarse con ayuda de la varianza y la

precisión: $n = \frac{4 \times S_{xy} \times N}{4 \times S_{xy} + B^2 \times N}$ En este caso se asume que la media de la variable auxiliar

μ_x es conocida para la población (Schreuder *et al.*, 2005).

3.2.2.2. Procesamiento de información espectral (SPOT5 HRG)

Se adquirió una imagen SPOT 5, a través del Colegio de Postgraduados. La escena fue tomada el 18 de abril de 2006, sus características más importantes se reportan en el Cuadro 1:

Cuadro 1. Parámetros de la escena SPOT 5

Fecha	2006 – 04 – 18		17:05:10.5	
Instrumento	HRG 2			
Número de bandas	4			
Indicador de banda espectral	HI1: Verde	HI2: Rojo	HI3: IR Cercano	HI4: IR Medio
Longitud de onda (μm)	0.50 – 0.59	0.61 – 0.68	0.78 – 0.89	1.58 – 1.75
Número de ganancias	7	7	5	4
Calibración absoluta de ganancias ($\text{W/m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$)	2.139452	2.853960	1.738550	8.225268
Ángulo de orientación	12.264436 grados			
Ángulo de incidencia	20.187256 grados			
Ángulos del sol	Azimut: 111.469109		Elevación: 66.197548	
Filas	7302			
Columnas	7784			

Se realizó la corrección geométrica y radiométrica de la escena SPOT 5. Los detalles se presentan en el Capítulo II de este reporte.

Una vez corregida la geometría y la radiación de la escena, el siguiente paso fue calcular dos tipos de índices de vegetación (*IVs*). El primer tipo es conocido como “basados en la pendiente” (Slope – Based *IVs*) se refiere a la combinación de las bandas rojo y cercano infrarrojo. Bajo esta categoría se obtuvieron los siguientes índices: el Índice Vegetación de Diferencia Normalizada (*NDVI*) y el Índice de Vegetación Transformado (corregido) (*CTVI*).

El segundo tipo de índices de vegetación utilizados pertenecen a los llamados “basados en la distancia”(Distance – Based *IVs*). Éstos se utilizan en ambientes donde la vegetación no es tan densa y donde se hace necesario separar la reflectancia del suelo de la reflectancia propia de la vegetación. Para esto se hace una correlación entre las bandas roja e infrarroja, utilizando como factor de corrección en pendiente (β_0) a las zonas de suelo desnudo (*PVI*) o en su caso transformando las bandas roja e infrarrojo en radianza absoluta (*SAVI*) (Eastman, 2001). Bajo esta categoría se obtuvieron dos tipos de índices: el Índice Perpendicular de Vegetación (*PVI*) y el Índice de Vegetación Ajustado a la Pendiente del Suelo (*SAVI*). Detalles de los *IVs* usados se presentan en el Capítulo II.

3.2.2.3. Generación del sistema de información geográfica

Para caracterizar las condiciones ambientales del área de estudio, se generó (en el paquete IDRISI KILIMANJARO) un Sistema de Información Geográfica (*SIG*) a partir del modelo digital de elevación (MDE) de resolución espacial de 30 m y de las cartas Edafológica y Geológica (escala 1:50,000) y de Efectos climáticos (escala 1:250,000) para los periodos de lluvias (mayo – octubre) y secas (noviembre – abril) de *INEGI*. La información contenida en las cartas se digitalizó por medio de una tableta y del paquete ArcGis 9.0, bajo el modelo de datos vectorial. Las cartas digitales así obtenidas fueron transformadas a formato ráster con una resolución semejante a la del MDE. A partir del MDE se obtuvo la capa de elevación sobre el nivel medio del mar (*ALTITUD*) y se construyeron las capas de pendiente (*PENDIENTE*) y exposición (*EXPOSICIÓN*) del terreno. Las cartas de isolíneas climáticas (isotermas e isoyetas) se interpolaron mediante el módulo INTERCON del paquete IDRISI KILIMANJARO. Este módulo calcula la ubicación y valor de un píxel a ser interpolado con base al valor de las isolíneas, su tendencia (cambio del atributo a partir de un final de la línea al otro, dividido por la longitud de la línea) y su posición “X, Y” (Eastman, 2001). De esta manera se obtuvieron las cartas de temperatura media anual (*TMA*), temperatura máxima (*TMAX*), temperatura mínima (*TMIN*), precipitación media anual (*PMA*), precipitación en lluvias (*PMAMO*) y precipitación en secas (*PMANA*).

Se consideraron además las variables biofísicas que representan los índices de área foliar (*LAI5* y *LAIAL*) y de cobertura arbórea (*COB*). Para mayor detalle ver Capítulo II.

3.2.2.4. Análisis de correlación y regresión stepwise

Los datos de campo se empataron con las variables cartográficas del medio físico, con los datos espectrales obtenidos de la escena SPOT 5 (Bandas 1 – 4) y con los datos espectrales transformados en *IVs* (*NDVI*, *CTVI*, *PVI* y *SAVI*). Para ello se ubicaron las parcelas muestreadas sobre las capas ráster. Para cada parcela se extrajeron los datos referentes a las nueve capas de información ambiental, los valores de cada banda espectral y los valores correspondientes a los índices de vegetación calculados.

Con los datos de las parcelas de muestreo se buscó ajustar, por separado, para las variables área basal (*AB*) y volumen de madera (*VOL*), modelos de regresión lineal múltiple de la forma general:

$$\begin{aligned}
 AB, VOL &= \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_9 X_9 + \beta_{10} B_1 + \dots + \beta_{13} B_4 + \beta_i IV + \varepsilon_i \\
 AB, VOL &= \beta_0 + \beta_1 COB + \beta_2 X_1 + \beta_3 X_2 + \dots + \beta_{10} X_9 + \beta_{11} B_1 + \dots + \beta_{14} B_4 + \beta_i IV + \varepsilon_i \\
 AB, VOL &= \beta_0 + \beta_1 LAI5 + \beta_2 X_1 + \beta_3 X_2 + \dots + \beta_{10} X_9 + \beta_{11} B_1 + \dots + \beta_{14} B_4 + \beta_i IV + \varepsilon_i \\
 AB, VOL &= \beta_0 + \beta_1 LAIAL + \beta_2 X_1 + \beta_3 X_2 + \dots + \beta_{10} X_9 + \beta_{11} B_1 + \dots + \beta_{14} B_4 + \beta_i IV + \varepsilon_i
 \end{aligned}$$

El modelo predice, para cada variable por separado, el valor promedio de *AB* y *VOL* que se esperaría alcance un sitio (píxel) donde las condiciones ambientales sean X_1, X_2, \dots, X_9 y cuyas propiedades espectrales sean B_1, B_2, \dots, B_4 e *IV* (índices de vegetación). Para elegir a las variables a incluir en el modelo se aplicó una estrategia de selección de variables STEPWISE (Crawley, 1993; Pindyck y Rubinfeld; 1981).

Los modelos obtenidos se aplicaron posteriormente a cada uno de los píxeles del mapa base para modelar las variaciones en *AB* y *VOL* a través del área de estudio.

Cabe mencionar que se probaron modelos de regresión no lineales (*RNL*) (Aguirre, 2007; García *et al.*, 2006). Sin embargo, en sucesivas pruebas, los coeficientes de determinación por *RNL* siempre fueron menores a los obtenidos con regresión lineal múltiple (*RLM*). Razón por la cual se eligió como método estadístico a la *RLM* (Belsley *et al.*, 2005). Con el fin de identificar y corregir inconsistencias estadísticas en los modelos, además de las pruebas de varianza, significancia ($P < 0.05$) y factor de inflación de varianza ($VIF < 1$ o 5), se buscaron observaciones aberrantes (*OA*) con relación al conjunto de datos a predecir (Y_i) y del conjunto de variables predictoras (X_i) (Belsley *et al.*, 2005). Ver detalles en el Capítulo II.

3.3. Resultados y Discusión

Se estimó un valor promedio de área basal (*AB*) de 22.54 m²/ha de los cuales un 85.65% corresponde a árboles de *DAP* mayores de 10 cm, y un 36.33% a los mayores de 20 cm (Cuadro 2 y 3, Figura 5).

Cuadro 2.- Valores estructurales promedio por hectárea de área basal (*AB*) y volumen de madera (*VOL*).

ANUALIDAD	EDAD DE RODAL	DAP (cm)			Volumen (m ³ /ha)	Área Basal (m ² /ha)
		MÍNIMO	PROMEDIO	MÁXIMO		
1981	26	2.50	10.29	23.80	93.71	16.64
1982	25	2.00	13.95	32.00	189.37	26.71
1983	24	2.10	18.76	38.20	259.06	32.99
1984	23	2.10	13.31	30.10	150.77	22.32
1985	22	2.00	17.16	34.50	225.49	28.62
1986	21	2.70	17.39	29.20	216.43	31.13
1987	20	3.00	18.12	32.80	212.76	29.04
1988	19	1.70	13.08	41.10	123.14	16.81
1989	18	2.40	12.04	26.10	72.00	13.95
1990	17	1.60	11.30	26.90	110.06	21.90
1991	16	1.50	12.65	31.00	95.23	15.98
1992	15	2.30	8.37	29.30	49.16	11.04
1993	14	1.50	9.56	37.00	108.29	19.95
1994	13	2.00	11.20	29.00	103.05	18.47
1995	12	1.80	10.32	28.50	89.39	16.27
1996	11	1.20	9.23	25.30	72.67	14.60
1997	10	1.00	8.65	31.00	66.46	11.22
1998	9	1.50	6.40	30.80	30.50	8.28
1999	8	0.50	6.45	19.50	20.36	5.94
2001	6	1.00	4.67	36.20	11.56	3.19
MEDIA		1.82	11.65	30.62	118.89	22.54

El área basal de los rodales jóvenes es relativamente elevada en las clases de *DAP* de 1 a 13 cm (33.8%) debido a las altas densidades. No obstante a medida que el bosque se desarrolla se observa un aumento del área basal correspondiente a las clases de *DAP* mayores de 10 cm, y sobre todo de 16 cm, acompañado de una atenuación de la dominancia de las clases, misma que se va desplazando de las clases bajas a las medias (Figura 5).

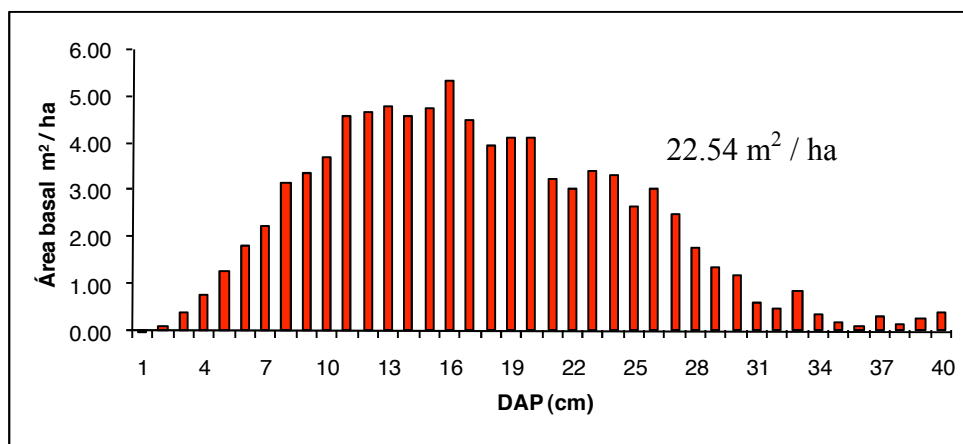


Figura 5.- Distribución del área basal (*AB*) por hectárea del estrato arbóreo, Ejido Atopixco.

El volumen de madera (*VOL*) promedio obtenido por muestreo simple aleatorio (*MSA*) fue de 118.89 m³/ha. Aplicando el muestreo estratificado aleatorio (*MEA*) se obtuvo un promedio, en *VOL*, de 140.69 m³/ha para las 21 anualidades (estratos) (Cuadro 3).

La precisión (por *MEA*) fue de 5.28%, de tal manera que los 114 sitios muestreados representan una muestra adecuada ya que sí se desea un nivel de confianza del 5% (0.05) se requerirían – de al menos - 100 sitios de muestreo (*n*) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Estimadores por sitio de 400 m², en muestreo simple aleatorio (*MSA*) y muestreo estratificado aleatorio (*MEA*).

ESTIMADORES	ÁREA BASAL		VOLUMEN	
	MSA	MEA	MSA	MEA
MEDIA	0.7985	0.90	4.76	5.63
VARIANZA MEDIA ESTIMADA	0.0021	0.00033	0.13	0.02
INTERVALO CONFIANZA SUPERIOR	0.71	0.94	5.47	5.92
INTERVALO CONFIANZA INFERIOR	0.89	0.86	4.04	5.33
ERROR PERMISIBLE PORCENTUAL (B/\bar{y})	11.53%	4.06%	14.94%	5.28%
AMPLITUD DEL IC AL 95% (B)	0.09	0.04	0.71	0.30
INVENTARIO TOTAL (T)	5961.76	6730.69	35507.37	42019.11
MEDIA * ALFA	0.04	0.05	0.24	0.28
TAMAÑO DE MUESTRA, α (n)	568.27	65.07	908.02	100.78
MARCO DE MUESTREO (N)	1170.97 (298.67)	1170.97 (298.67)	1170.97 (298.67)	1170.97 (298.67)
ALFA (α)	0.05	0.05	0.05	0.05

Del Cuadro 3, se estima un inventario final de 42019.11 m³, para el Ejido Atopixco, con una variación estimada en *VOL* de ± 2218.59 m³ (5.28%). Con la intención de probar si mejoraba la precisión porcentual (B/\bar{y}) del inventario en *VOL*, se procedió a aplicar un muestreo de regresión (*MRR*). Al graficar la variables de interés (Figura 6), se observa

que la línea de regresión entre volumen de madera (*VOL*) y área basal (*AB*) no intercepta en el origen, por tal razón se eligió un estimador de regresión (Schreuder *et al.*, 2005; Valdez *et al.*, 2006).

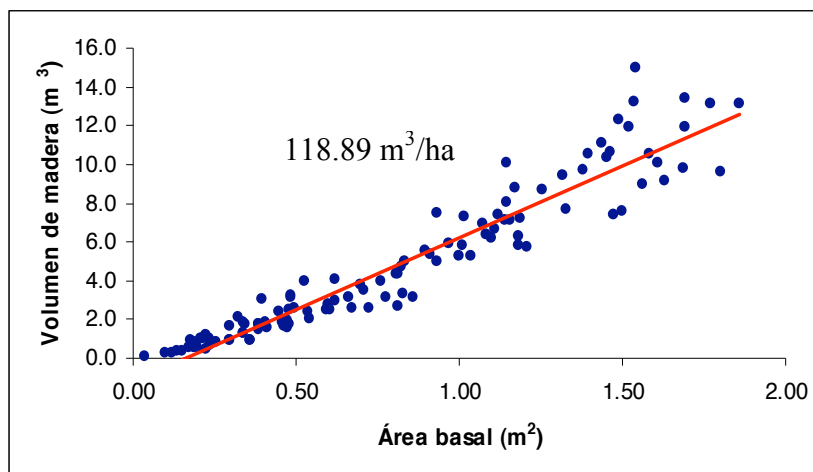


Figura 6.- Relación Volumen de Madera y Área Basal por sitio del estrato arbóreo, Ejido Atopixco.

El promedio de *VOL* - por *MRR* – fue menor (118.89 m³/ha) al obtenido por *MEA* (140.69 m³/ha). Cabe recordar que la variable auxiliar (*AB*) proviene de los mismos datos (fase principal) y no de un muestreo previo (fase auxiliar). De aquí que la correlación entre volumen de madera y área basal sea alta (0.96 unidades) (Cuadro 4).

Cuadro 4. Estimadores por sitio de 400 m², en muestreo por regresión (MRR).

ESTIMADORES DE REGRESIÓN	VOLUMEN
b (PENDIENTE)	7.38
CORRELACIÓN VOL vs. AB	0.96
MEDIA	4.76
COOVARIANZA DE XY (Syx)	1.29
VARIANZA MEDIA REGRESIÓN (SmedReg)	0.01
INTERVALO CONFIANZA SUPERIOR	4.54
INTERVALO CONFIANZA INFERIOR	4.97
ERROR PERMISIBLE PORCENTUAL (B/y)	4.43%
AMPLITUD DEL IC AL 95% (B)	0.21
INVENTARIO TOTAL (T)	35507.37
MEDIA * ALFA	0.24
TAMAÑO DE MUESTRA, α (n)	89.92
MARCO DE MUESTREO (N)	1170.97 (298.67)
ALFA (α)	0.05

La técnica de inventariado por regresión mejora significativamente la precisión porcentual (4.43%), de tal manera que a un nivel de confianza del 5% sólo se

requerirían 90 sitios de muestreo (n), en vez de los 100 sitios propuestos por el inventario estratificado (Cuadro 3 y 4). Del Cuadro 5, considerando a la *MEDIA*, se estima un inventario final de 35507.37 m³, para el Ejido Atopixco. La cantidad de volumen en madera varía en ± 1574.18 (4.43%). Es un margen menor, en comparación al muestreo aleatorio (± 2218.59 m³). Los estimadores de regresión son más precisos que el estimador aleatorio o el estratificado, desde el momento en que reducen la variabilidad de la media. No obstante, para aplicarlos se recomienda tener datos históricos de un muestreo intensivo sobre la variable auxiliar (*AB*). La variable auxiliar puede ser diferente al área basal, por ejemplo los índices de vegetación (*NDVI*, *PVI*, *SAVI*, *CTVI*, entre otros); sin embargo, es indispensable que exista una buena correlación entre la variable auxiliar y la variable principal (volumen de madera) (Valdez *et al.*, 2006).

Al existir una correlación baja entre los índices de vegetación y el volumen de madera, no fue posible aplicar un muestreo de razón y regresión utilizando los índices de vegetación como fase auxiliar. No obstante, los datos de volumen de madera nos muestran que el Ejido Atopixco es muy productivo, aunque no al nivel de su vecino, el Ejido La Mojonera. En éste ejido el área basal (*AB*) alcanza los 25.47 m²/ha, mientras que el volumen de madera es de 191.96 m³/ha. La diferencia radica en las especies manejadas y en la calidad de sitio. En La Mojonera el clima es más húmedo y los rodales están dominados por la especie *Pinus patula*; en cambio en Atopixco el clima es seco al suroeste y más húmedo al noreste, además de que existen rodales mezclados de *Pinus patula* y *Pinus teocote* (Ángeles, 1995; Aguirre, 2007).

3.3.1. Relación del área basal y la cobertura arbórea, variables cartográficas, variables espectrales e índices de área foliar

A través del análisis de correlación de Pearson se identificaron las variables correlacionadas con el área basal (*AB*); éstas son cobertura arbórea (*COB*), índice de área foliar en sitio (*LAI5*), índice de área foliar alométrico (*LAIAL*), pendiente del terreno (*PENDIENTE*), altitud sobre el nivel medio del mar (*ALTITUD*) y su cuadrado (*ALTITUD2*), temperatura media anual (*TMA*), temperatura máxima (*TMAX*) y su

cuadrado ($TMAX2$), precipitación media en lluvias ($PMAMO$) y su cuadrado ($PMAMO2$), índice de vegetación ajustado al brillo del suelo ($SAVI$) y reflectancia en la banda cuatro SPOT 5 ($B4$) (Cuadro 5).

Cuadro 5. Correlación de Pearson para los pares de variables respuesta y predictoras.

	COB	LAI5	LAIAL	PENDIENTE	ALTITUD	ALTITUD2	TMA	TMAX	TMAX2	PMA	PMAMO	PMAMO2	PVI	B4	AB
COB	1	0.94	0.81	0.26	0.34	0.35	-0.62	-0.41	-0.41	0.55	0.55	0.56	-0.06	-0.36	0.81
LAI5	0.94	1	0.80	0.25	0.30	0.30	-0.64	-0.33	-0.33	0.57	0.57	0.58	-0.07	-0.37	0.83
LAIAL	0.81	0.80	1	0.11	0.42	0.42	-0.68	-0.48	-0.48	0.57	0.57	0.58	-0.14	-0.25	0.97
PENDIENTE	0.26	0.25	0.11	1	0.02	0.02	-0.28	-0.26	-0.26	0.29	0.29	0.29	0.00	-0.05	0.12
ALTITUD	0.34	0.30	0.42	0.02	1	1.00	-0.66	-0.73	-0.73	0.66	0.66	0.65	0.10	0.01	0.43
ALTITUD2	0.35	0.30	0.42	0.02	1.00	1	-0.66	-0.73	-0.73	0.66	0.66	0.64	0.10	0.01	0.43
TMA	-0.62	-0.64	-0.68	-0.28	-0.66	-0.66	1	0.67	0.67	-0.87	-0.87	-0.88	0.00	0.20	-0.75
TMAX	-0.41	-0.33	-0.48	-0.26	-0.73	-0.73	0.67	1	1.00	-0.60	-0.60	-0.58	-0.13	0.01	-0.45
TMAX2	-0.41	-0.33	-0.48	-0.26	-0.73	-0.73	0.67	1.00	1	-0.61	-0.60	-0.59	-0.13	0.01	-0.45
PMA	0.55	0.57	0.57	0.29	0.66	0.66	-0.87	-0.60	-0.61	1	1.00	1.00	0.03	-0.11	0.63
PMAMO	0.55	0.57	0.57	0.29	0.66	0.66	-0.87	-0.60	-0.60	1.00	1	1.00	0.03	-0.11	0.63
PMAMO2	0.56	0.58	0.58	0.29	0.65	0.64	-0.88	-0.58	-0.59	1.00	1.00	1	0.03	-0.12	0.64
PVI	-0.06	-0.07	-0.14	0.00	0.10	0.10	0.00	-0.13	-0.13	0.03	0.03	0.03	1	0.15	-0.13
B4	-0.36	-0.37	-0.25	-0.05	0.01	0.01	0.20	0.01	0.01	-0.11	-0.11	-0.12	0.15	1	-0.30
AB	0.81	0.83	0.97	0.12	0.43	0.43	-0.75	-0.45	-0.45	0.63	0.63	0.64	-0.13	-0.30	1

COB = Cobertura arbórea, LAI5 = Índice de Área Foliar en Sitio, LAIAL = Índice de Área Foliar Alométrico, PENDIENTE = Pendiente del terreno, ALTITUD = Altitud sobre el nivel medio del mar, TMA = Temperatura Media Anual, TMAX = Temperatura Máxima, PMA = Precipitación Media Anual, PMAMO = Precipitación Media Anual Mayo-Octubre, PVI = Índice Perpendicular de Vegetación, B4 = Banda 4, AB = Área Basal.

Se procedió a realizar una regresión lineal múltiple bajo el método *Stepwise*. Para cada variable se tomó como restricción o selección de entrada (*SLE*) y de estancia (*SLS*) en el modelo una $P < 0.05$ (Cuadro 6).

Cuadro 6. Significancia ($P < 0.001$) del análisis de varianza (ANOVA) y estimadores de los parámetros β_i .

	Modelo 1				Modelo 2			
R-cuadrada	0.777				0.8058			
R-ajustada	0.768				0.7938			
	Estimador parámetro β_i	Pr > t	Corr., tipo I semiparcial cuadrado	FIV	Estimador parámetro β_i	Pr > t	Corr., tipo I semiparcial cuadrado	FIV
Intercepto	8.222	0.0001		0	299.52	0.004		0
COB	0.016	0.0001	0.64984	1.67				
LAI5					0.39	0.0001	0.68	1.82
LAIAL								
PENDIENTE	-0.018	0.0029	0.02113	1.1	-0.01	0.0296	0.01	1.24
ALTITUD					-0.29	0.0051	0.0001	> 5
ALTITUD2					0.0001	0.0052	0.03	> 5
TMA	-0.565	0.0001	0.09731	1.68	-0.49	0.0001	0.08	3.2
TMAX								
TMAX2								
PMA								
PMAMO								
PMAMO2								
PVI	-0.054	0.0468	0.00912	1.01	-0.05	0.0453	0.01	1.02
B4								
	Modelo 3				Modelo 4			
R-cuadrada	0.9662				0.7313			
R-ajustada	0.9649				0.7117			
	Estimador parámetro β_i	Pr > t	Corr., tipo I semiparcial cuadrado	FIV	Estimador parámetro β_i	Pr > t	Corr., tipo I semiparcial cuadrado	FIV
Intercepto	6.554	0.0001		0	1177.91	0.0001		0
COB								
LAI5								
LAIAL	0.138	0.0001	0.947	1.9				
SLOPE								
ALTITUD	-0.001	0.009	0.003	1.86	-0.576	0.0001	0.18	> 5
ALTITUD2					0.0001	0.0001	0.07	> 5
TMA	-0.27	0.0001	0.014	2.77				
TMAX					-58.827	0.0001	0.05	> 5
TMAX2					1.656	0.0001	0.001	> 5
PMA					0.183	0.0001	0.29	> 5
PMAMO					-0.17	0.0001	0.001	> 5
PMAMO2					0.00002	0.0001	0.13	> 5
PVI								
B4	-0.002	0.0306	0.002	1.11				

COB = Cobertura arbórea, LAI5 = Índice de Área Foliar en Sitio, LAIAL = Índice de Área Foliar Alométrico, PENDIENTE = Pendiente del terreno, ALTITUD = Altitud sobre el nivel medio del mar, TMA = Temperatura Media Anual, TMAX = Temperatura Máxima, PMA = Precipitación Media Anual, PMAMO = Precipitación Media Anual Mayo-Octubre, PVI = Índice Perpendicular de Vegetación, B4 = Banda 4.

El primer modelo obtenido se define como:

$$AB = \beta_0 + \beta_1 COB + \beta_2 TMA + \beta_3 PENDIENTE + \beta_4 PVI + \varepsilon_i \quad 1)$$

La R^2 ajustada (por grados de libertad) muestra que el modelo explica el 76.8% de la variabilidad del AB , con tres de sus parámetros estimados como altamente significativos ($\alpha \leq 0.01$) y uno significativo ($\alpha \leq 0.05$).

La R^2 semiparcial muestra que COB aporta 0.649 unidades a la R^2 no ajustada. Le siguen en importancia TMA y $PENDIENTE$ que aporta 0.097 y 0.021 unidades a la R^2 no ajustada. El factor de inflación de la varianza (VIF) para COB , TMA , $PENDIENTE$ y PVI es menor de 5 y mayor de 1, no se considera la existencia de multicolinealidad (Cuadro 6).

El segundo modelo ajustado (Cuadro 6) tiene como variables explicativas al índice de área foliar en sitio ($LAI5$), temperatura media anual (TMA), altitud sobre el nivel medio del mar ($ALTITUD$) y su cuadrado ($ALTITUD2$), pendiente del terreno ($PENDIENTE$) e índice de vegetación perpendicular al suelo (PVI). El modelo dos se escribe como:

$$AB = \beta_0 + \beta_1 LAI5 + \beta_2 TMA + \beta_3 ALTITUD + \beta_4 ALTITUD2 + \beta_5 PENDIENTE + \beta_6 PVI + \varepsilon_i \quad 2)$$

La R^2 ajustada muestra que el modelo explica el 79.38% de la variabilidad en AB , con cuatro de sus parámetros estimados como altamente significativos ($\alpha \leq 0.01$) y dos significativos ($\alpha \leq 0.05$).

La R^2 semiparcial muestra que $LAI5$ aporta 0.68 unidades a la R^2 no ajustada. Le sigue en importancia TMA que aporta 0.08 unidades a la R^2 no ajustada. El factor de inflación de la varianza (VIF) para $ALTITUD$ y su cuadrado es mayor de 5, se considera la existencia de multicolinealidad (Cuadro 8).

El tercer modelo (Cuadro 6) considera como variables explicativas al índice de área foliar alométrico ($LAIAL$), temperatura media anual (TMA), altitud sobre el nivel medio del mar ($ALTITUD$) y reflectancia en la banda cuatro SPOT 5 ($B4$). El tercer modelo obtenido se escribe como:

$$AB = \beta_0 + \beta_1 LAIAL + \beta_2 TMA + \beta_3 ALTITUD + \beta_4 B4 + \varepsilon_i \quad 3)$$

La R^2 ajustada muestra que el modelo explica el 96.5% de la variabilidad en AB , con tres de sus parámetros estimados como altamente significativos ($\alpha \leq 0.01$) y uno significativo ($\alpha \leq 0.05$).

La R^2 semiparcial muestra que $LAIAL$ aporta 0.95 unidades a la R^2 no ajustada. Le sigue en importancia TMA que aporta 0.014 unidades a la R^2 no ajustada. El factor de inflación de la varianza (VIF) es menor de 5 y mayor de 1, no se considera la existencia de multicolinealidad (Cuadro 6).

En un cuarto modelo ajustado (Cuadro 6) se consideraron como variables explicativas solamente a variables cartográficas y espectrales, dejándose fuera a las variables de campo COB , $LAI5$ y $LAIAL$. Se consideró a la altitud sobre el nivel medio del mar ($ALTITUD$) y su cuadrado ($ALTITUD2$), temperatura media anual máxima ($TMAX$) y su cuadrado ($TMAX2$), precipitación media anual (PMA), precipitación media anual en lluvias ($PMAMO$) y su cuadrado ($PMAMO2$).

La más alta relación está dada por el par $AB - PMA$ y $PMAMO$, es una relación positiva de 0.63 unidades. A ésta le sigue el par $AB - TMAX$, que es negativa con un valor de 0.45 unidades. La relación $AB - TMAX$ y $ALTITUD$ es moderadamente baja, negativa para el primero y positiva para el segundo. El modelo cuatro se define como:

$$AB = \beta_0 + \beta_1 ALTITUD + \beta_2 ALTITUD2 + \beta_3 TMAX + \beta_4 TMAX2 + \beta_5 PMA + \beta_6 PMAMO + \beta_7 PMAMO + \varepsilon_i \quad 4)$$

La R^2 ajustada muestra que el modelo explica el 71.2% de la variabilidad en AB . Todos sus parámetros estimados son altamente significativos ($\alpha \leq 0.01$).

La R^2 semiparcial muestra que PMA aporta 0.29 unidades a la R^2 no ajustada. Le sigue en importancia $ALTITUD$ que aporta 0.18 unidades a la R^2 no ajustada. El factor de inflación de la varianza (VIF) para todas las variables es mayor de 5, se considera la existencia de multicolinealidad (Cuadro 6).

3.3.1.1. Modelado espacial del área basal

El coeficiente de correlación parcial (R^2) es moderadamente alto en los modelos propuestos para predecir la cantidad de área basal (AB). Sus valores van de 73.1 a 96.62% de la variabilidad explicada (Cuadro 6).

Del primer modelo (Figura 8), la relación entre AB y cobertura arbórea (COB) es positiva y alta (64.9% correlación semiparcial, Cuadro 6). La relación de ambas variables, aunque positiva, sigue una tendencia logarítmica y asintótica con respecto a la abscisa (Figura 7A). La asíntota se forma alrededor del 85% de COB , tal fenómeno puede explicarse por la relación productividad / biomasa. La producción primaria neta es la energía fijada por fotosíntesis menos la energía empleada en la respiración, o lo mismo, la producción primaria bruta menos la respiración. Cuando la producción primaria neta es positiva, la biomasa de las plantas va aumentando. Es lo que sucede, por ejemplo, en los rodales jóvenes de 1990 – 1995; en cual los árboles van creciendo, aumentando su número y mostrando altos valores de cobertura. Cuando el bosque ha envejecido, sigue haciendo fotosíntesis pero toda la energía que asimila la emplea en la respiración, la producción neta tiende a cero y la masa de vegetal del bosque se puede considerar que ya no aumenta (Begon *et al.*, 1990; Kitani *et al.*, 1989). La cantidad en área basal no incrementa y la cobertura arbórea puede tener valores similares a rodales más jóvenes, es el caso de las anualidades 1981 – 1985.

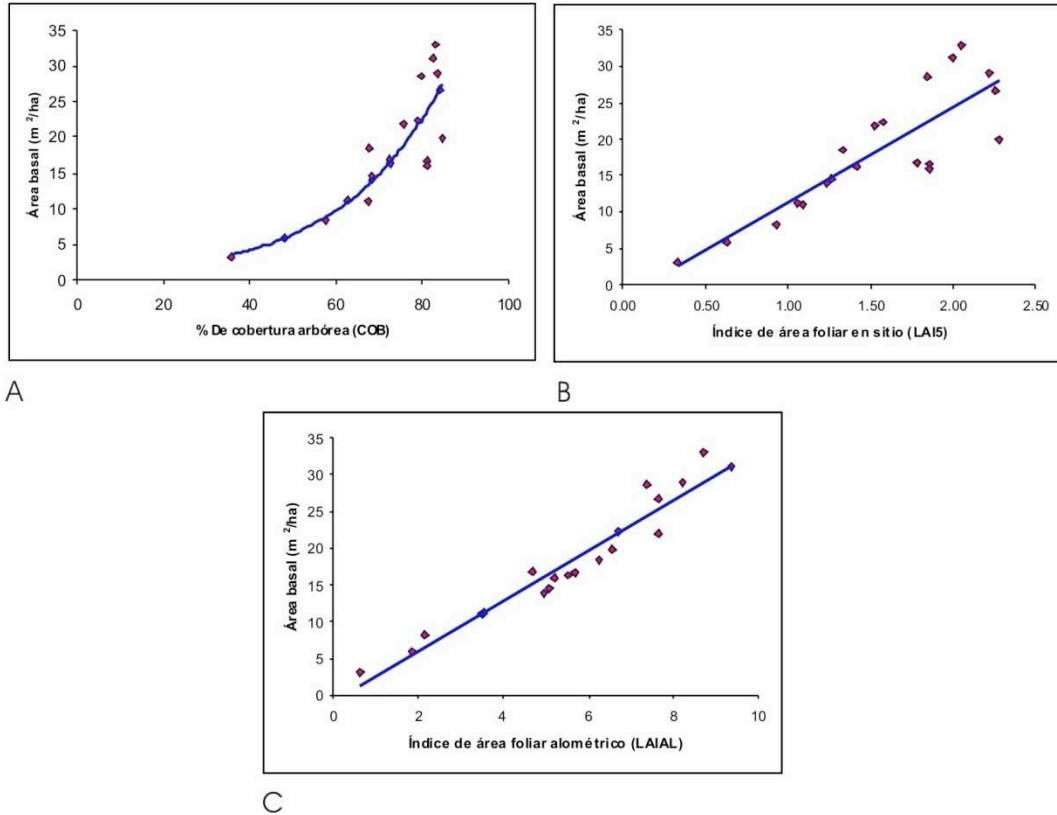


Figura 7.- Correlación del área basal (AB) y A) porcentaje de cobertura arbórea (COB), B) índice de área foliar en sitio ($LAI5$), C) índice de área foliar alométrico ($LAIAL$) del estrato arbóreo.

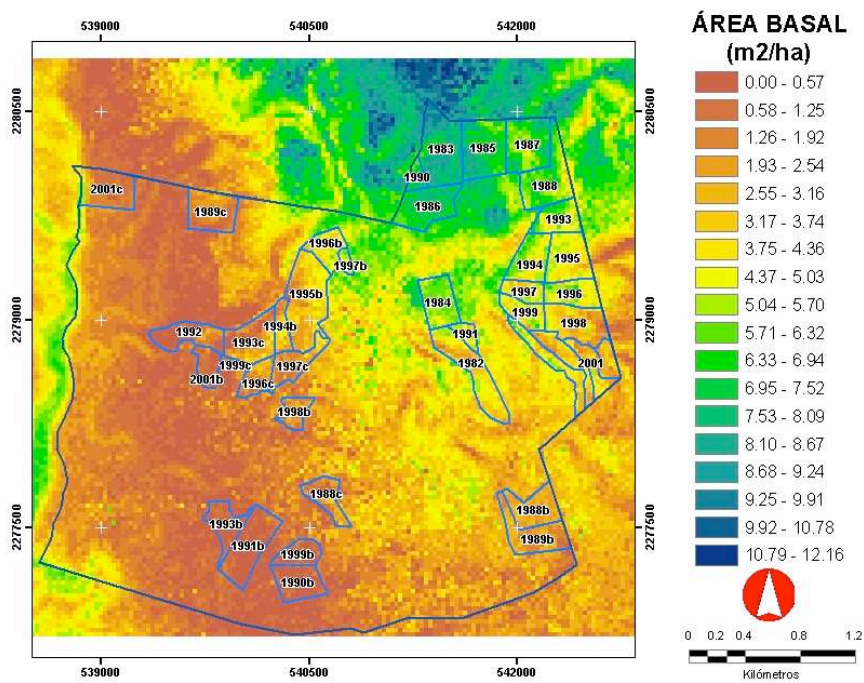


Figura 8. Distribución del área basal (m^2/ha) en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 1 para cobertura arbórea (COB).

La *COB* es un reflejo de la densidad. Márquez y Álvarez (1995) muestran que en *Pinus cooperi*, de diferentes clases de copa, hay una tendencia negativa entre el diámetro y la densidad conforme la competencia aumenta. Es decir, la competencia tiene un efecto importante en la pendiente de la relación tamaño - densidad, a partir del punto en el cual la competencia se hace más intensa (individuos intermedios) (Gobbi, 2007).

También la alta densidad, en rodales jóvenes, puede producir árboles con bajo porcentaje de ramas vivas a lo largo del tronco, coberturas muy amplias y fustes cónicos (Black y Abrams, 2005). Esto fue captado por las fotos hemisféricas (Jonckheere *et al.*, 2004) y explicaría porque rodales jóvenes presentan altos valores de cobertura arbórea (Cuadro 2, Figura 8).

Del segundo modelo (Figura 9), la relación entre área basal (*AB*) y el índice de área foliar en sitio (*LAI5*) es positiva y alta (68% correlación semiparcial, Cuadro 6). A diferencia de *COB*, *LAI5* sigue una tendencia lineal más clara con *AB* (Figura 7B).

Cabe recordar que *COB* y *LAI5* fueron variables derivadas del análisis de las fotos hemisféricas.

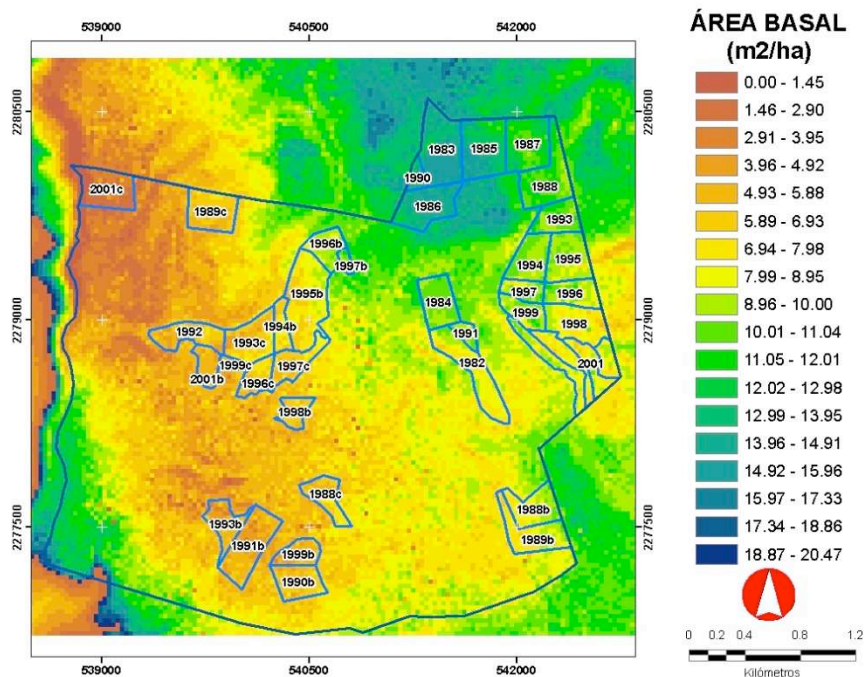


Figura 9. Distribución del área basal (m^2/ha) en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 2 para índice de área foliar en sitio (*LAI5*).

De los cuatro modelos ajustados, destaca la variable índice de área foliar alométrico (*LAI_{AL}*) (Figura 7C y 10), es ésta la que más apporto a la R^2 ajustada (Cuadro 6). A diferencia de *LAI₅*, el *LAI_{AL}* está altamente relacionado con el *AB*, pues su estimación depende del diámetro normal (*DAP*) (Cano *et al.*, 1996; Figueroa, 2008).

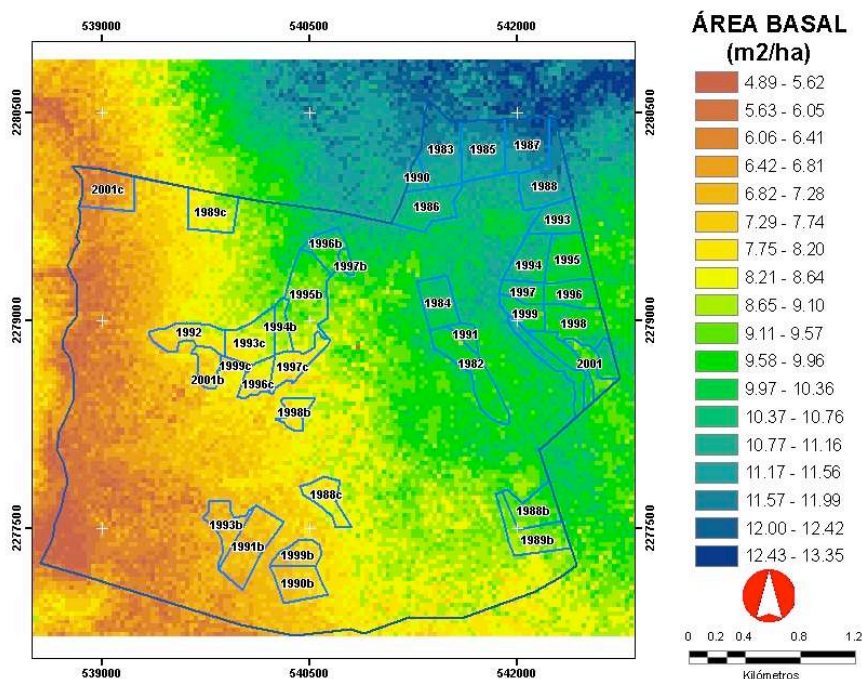


Figura 10. Distribución del área basal (m²/ha) en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 3 para índice de área foliar en alométrico (*LAI_{AL}*).

La relación entre el *LAI_{AL}* y el *AB* puede explicarse por la relación que existe entre el tejido vascular (xilema y floema) y la superficie foliar. Según Barrantes y Gracia (1989), el área específica de una hoja (medida en cm²/mg) varía con la altura del árbol. Las hojas situadas a mayor altura (más expuestas a la radiación solar) presentan un área específica menor que las halladas en la copa. En otras palabras, el área foliar es proporcional a la superficie transversal del tronco (xilema vivo), del cual pasa el agua necesaria para abastecerlo y que circula desde las raíces hacia las hojas. Este es un fenómeno muy importante que tiene varias implicaciones; pues no solo relaciona la cantidad de área basal con el índice de área foliar, sino que también muestra que la disponibilidad de agua influye en la estructura arbórea. En *Pinus* significaría, que para una misma especie, el área basal se beneficia de la humedad y esto se ve reflejado en el área foliar (Figura 10 y 11).

En todos los modelos, las variables cartográficas: altitud sobre el nivel medio del mar (*ALTITUD*), temperatura media anual (*TMA*), precipitación media anual (*PMA*) y precipitación media en lluvias (*PMAMO*) siempre se hacen presentes. Mención aparte merecen las variables reflectancia en la banda cuatro SPOT5 (*B4*) y el índice de vegetación perpendicular al suelo (*PVI*). En el modelo 3, el coeficiente de la variable *B4* es negativo. Esto significa que la cantidad de área basal aumenta conforme disminuye la reflectancia en el infrarrojo cercano (*B4*). En un estudio con plantaciones de *Eucalyptus* y *Pinus*, Lencinasa y Mohr-Bell (2007) determinaron una correlación significativa (-0.58 y -0.79) entre los valores de la banda 4 y la edad de dichas plantaciones. Estimaron la edad con un error medio de 2.2 años en eucaliptos y 3.5 años en pinos. Esa relación inversa, entre valores espectrales y la edad para plantaciones de coníferas, también fue reportada por Sivanpillai *et al.* (2006). Tal fenómeno se explica por el agua de las hojas que absorbe la luz roja, mientras que la demás estructuras celulares reflejan la mayor parte de la radiación infrarroja (*B4*). El incremento en *AB* está acompañado por un aumento en *LAIAL* y por tanto una mayor absorción del infrarrojo medio (*B4*), razón que expone la relación negativa de *AB - B4* (Figura 10, Cuadro 6).

Por otra parte, tenemos el índice de vegetación perpendicular al suelo (*PVI*). De acuerdo a Ante *et al.* (2005), en general los índices de vegetación que toman la razón entre la reflectancia del suelo y la vegetación (por ejemplo *SAVI*, *PVI*, entre otros) son mejores para discriminar tipos de cobertura vegetal en zonas con contrastes ambientales, que los índices de vegetación basados en la razón de bandas rojo – infrarrojo (*NDVI*, *CTVI*, entre otros). Es de llamar la atención que el coeficiente de *PVI* (modelo 2) sea negativo, en tal caso habría que explorar su relación con la variable *LAI5* (Cuadro 5 y 6).

De lo anterior, Gilabert *et al.* (1997) y Gilabert *et al.* (2002) escriben “el *PVI* se puede citar como un índice que presenta, dentro del rango de variación, una dependencia lineal con respecto al índice de área foliar (*LAI*), y al *NDVI* como aquél en el que se observa más claramente la saturación”. Es decir, para valores intermedios en cantidad de vegetación, que es cuando los efectos de la dispersión múltiple de la radiación por el interior de la masa vegetal son mayores, y en consecuencia, mayor es la influencia del

suelo, los índices de vegetación tradicionales (*NDVI*) presentan los valores más altos, indicando una eficacia menor en cuanto a su poder de normalización de la perturbación introducida por la señal del suelo. Se manifiesta la limitación de estos índices en zonas que presentan vegetación dispersa (es el caso del Ejido Atopixco). El *PVI*, no obstante, parece funcionar mejor, probablemente porque define con suficiente precisión la línea del suelo (Figura 9).

Sí bien las variables cartográficas *ALTITUD*, *TMA*, *PMA* y *PMAMO* se hacen presente en los modelos 1, 2 y 3. Son en el modelo 4 (Figura 11), donde cobran gran relevancia. Como su nombre lo indica, son variables obtenidas de información cartográfica, lo cual puede ser una virtud o una desventaja (Trotter y Dymond, 1997). De acuerdo a Miranda y Condal (2003), los atributos altitud y área basal de árboles, mostraron que la altitud satisface las condiciones de variable interpolable. Mientras que las evidencias indican que el área basal no satisface dichas condiciones, lo que es atribuible a la ausencia total de correlación espacial de los datos estudiados. Dadas estas evidencias, se puede indicar que un proceso de interpolación no puede ser exitoso, si primero no consideran los resultados obtenidos de un análisis estadístico preliminar de los datos a interpolar. Entonces se debe ser cuidadoso al considerar variables cartográficas en la modelación espacial.

Como se aprecia en la Figura 11; las variables cartográficas (Cuadro 6) describen un rango de valores, para área basal (*AB*) que van de 12.31 a 16.09 m²/ha. Es un rango estrecho en comparación con los modelos que incluyen variables como cobertura arbórea (*COB*) e índices de área foliar (*LAI5* y *LAIAL*). Además se hace evidente el peso que tiene la precipitación y la temperatura sobre la modelación espacial del *AB* (Figura 11). Esto indicaría que los modelos que sólo contemplan variables cartográficas son menos eficaces para la modelación espacial de variables biofísicas (*COB* y *LAI*) o dasométricas (*AB*) (Zurita, 2000). Pero no es así, el mayor problema de utilizar tales variables es su construcción. Por ejemplo, las capas ráster de temperatura y precipitación fueron obtenidas de cartas escala 1: 250 000, con una escala tan pequeña es complicado realizar operaciones de interpolación, aun cuando se utilice una base ráster de 30 x 30 m de resolución. El resultado es poca variabilidad espacial, aun con ésta y otras desventajas se pudieron obtener coeficientes de correlación

moderadamente altos (Cuadro 6), es decir, de mejorar la calidad de la información contenida en mapas se daría un enorme salto hacia delante (McCoy y Johnston, 2001; Eastman, 2001).

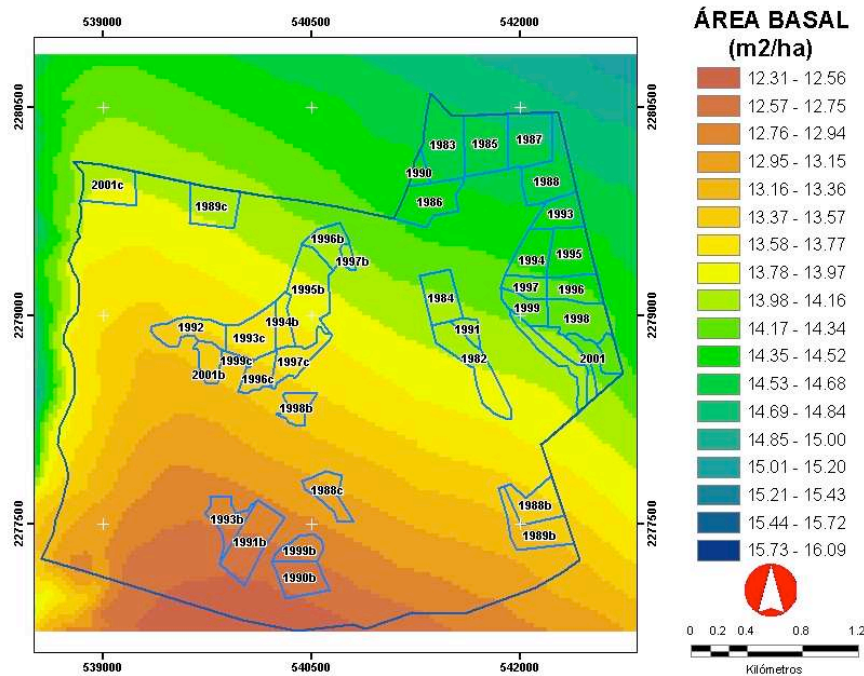


Figura 11. Distribución del área basal (m²/ha) en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 4 para variables cartográficas.

Sin olvidar lo mencionado arriba, queda de manifiesto la utilidad de emplear variables cartográficas como altitud, precipitación y temperatura para describir la distribución del AB. Los coeficientes de altitud y temperatura guardan una relación positiva con el incremento de AB. Esto concuerda con el trabajo de Camarero y Gutiérrez (1999) quienes describieron el patrón espacial de un ecotono de bosque dominado por *Pinus uncinata*, a través de variaciones en altitud, tipo de sustrato, y cobertura de herbáceos y arbustos. La descripción del ecotono permitió discernir la posible respuesta de las poblaciones de *P. uncinata* ante cambios ambientales. Por su parte, Sánchez y López (2003) al realizar un análisis sobre la vegetación y los factores que influyen en su estructura y distribución a lo largo de la Sierra Nevada, notaron que la relación (correlación canónica) entre vegetación y altitud – precipitación era positiva hasta un cierto rango, mientras que la temperatura presentaba coeficientes canónicos negativos. La temperatura en esa zona templada se asociaba a sitios de cobertura vegetal seca y

menor cantidad de precipitación. La misma tendencia fue observada en el Ejido Atopixco. Un hecho importante destacado por Sánchez y López (2003) fue que la distribución de las especies era continua a lo largo del gradiente. En consecuencia el patrón en la estructura y distribución de las comunidades arbóreas está definido por el gradiente altitudinal (temperatura y precipitación) y por las propiedades del suelo (pendiente del terreno, materia orgánica, cationes, nutrimentos y la profundidad del horizonte A y O). Elementos que podrían valorarse en futuras investigaciones para el Ejido Atopixco.

3.3.1.2. Comparación de las estimaciones de inventario para área basal

A través de la aplicación de las técnicas de muestreo simple aleatorio (*MSA*) y muestreo estratificado al azar (*MEA*), se obtuvo el inventario del área basal (*AB*) en el Ejido Atopixco. De acuerdo al inventario por *MSA*, la cantidad promedio de *AB* fue de 19.96 m²/ha. Si consideramos que la superficie ocupada por las 21 anualidades corresponde a 298.66 hectáreas y que el marco de muestro (*N*) es igual a 1170.97 hectáreas, entonces se estima un inventario final de 5961.76 m², con una variación estimada en área basal de ± 11.53% (Cuadro 3 y 7).

Cuadro 7. Comparación de las estimaciones de área basal (m²/ha) con inventario tradicional y con inventario por SIG. Intervalos de confianza (IC) al 95% de significancia estadística.

Superficie (ha)	298.66	Área Basal Total			
		IC-	TOTAL	IC+	Precisión % (B/y)
Inventario Tradicional	Inventario MSA	5274.66	5961.76	6648.85	11.53%
	Inventario MEA	6457.56	6730.69	7003.83	4.06%
Inventario SIG	Modelo 1 (COB)		3631.76		
	Modelo 2 (LAI5)		6113.67		
	Modelo 3 (LAIAL)		3987.18		
	Modelo 4 (Cartográficas)		4805.52		

COB = Cobertura arbórea

LAI5 = Índice de área foliar en sitio

LAIAL = Índice de área foliar alométrico

MSA = Muestreo Simple Aleatorio

MEA = Muestreo Estratificado Aleatorio

El promedio de *AB* - por *MEA* – fue mayor (22.54 m²/ha) al registrado por *MSA* (19.96 m²/ha). El inventario final de *AB* por *MEA* fue de 6730.69 m², con una variación estimada en área basal de $\pm 4.06\%$ (Cuadro 3 y 7).

La técnica de inventario por *MEA* mejoró la precisión porcentual (de 11.53% a 4.06%) de forma significativa. Tomando como base el *MEA*, se procedió a comparar su resultado con el obtenido por los modelos de regresión lineal múltiple.

De los cuatro modelos propuestos para describir la distribución de *AB*, fue el modelo 2 (*LAI5*) el que mejor se ajustó a la estimación de inventario final. Es decir, el inventario obtenido por *MEA* fue de 6730.69 m² mientras que por modelo 2 fue de 6113.67 m², hay una diferencia en *AB* de 617 m². Un margen menor, en comparación al *MSA* (769 m²). Estos resultados concuerdan con los presentados por Aguirre (2007) quien obtuvo para el Ejido Mojonera un *AB* promedio de 25.47 m²/ha; él observó que el *AB* fue el parámetro forestal que registró el error cuadrático medio (*RECM*) más pequeño para pinos. Un dato muy importante, pues el *AB* siempre fue la variable respuesta que mejor ajuste tuvo con relación a las variables independientes. Por otro lado destaca el resultado obtenido con el modelo 4, el cual está integrado únicamente por variables cartográficas. A pesar de tener la menor R² ajustada (0.7117) fue el segundo modelo que más se acercó al inventario final (Cuadro 6 y 7).

3.3.2. Relación del volumen de madera y la cobertura arbórea, variables cartográficas, variables espectrales e índices de área foliar

Se identificaron, por medio de análisis de correlación de Pearson, como variables correlacionadas con volumen de madera (*VOL*) a cobertura arbórea (*COB*), índice de área foliar en sitio (*LAI5*), índice de área foliar alométrico (*LAIAL*), pendiente del terreno (*PENDIENTE*), altitud sobre el nivel del mar (*ALTITUD*) y su cuadrado (*ALTITUD2*), temperatura media anual (*TMA*) y su cuadrado (*TMA2*), temperatura máxima (*TMAX*) y su cuadrado (*TMAX2*), precipitación media anual (*PMA*), precipitación media en lluvias (*PMAMO*) y su cuadrado (*PMAMO2*) (Cuadro 8).

Cuadro 8. Correlación de Pearson para los pares de variables respuesta y predictoras.

	COB	LAI5	LAIAL	PENDIENTE	ALTITUD	ALTITUD2	TMA	TMA2	TMAX	TMAX2	PMA	PMAMO	PMAMO2	VOL
COB	1	0.94	0.81	0.26	0.34	0.35	-0.62	-0.62	-0.41	-0.41	0.55	0.55	0.56	0.75
LAI5	0.94	1	0.80	0.25	0.30	0.30	-0.64	-0.64	-0.33	-0.33	0.57	0.57	0.58	0.81
LAIAL	0.81	0.80	1	0.11	0.42	0.42	-0.68	-0.68	-0.48	-0.48	0.57	0.57	0.58	0.88
PENDIENTE	0.26	0.25	0.11	1	0.02	0.02	-0.28	-0.28	-0.26	-0.26	0.29	0.29	0.29	0.10
ALTITUD	0.34	0.30	0.42	0.02	1	1.00	-0.66	-0.66	-0.73	-0.73	0.66	0.66	0.65	0.43
ALTITUD2	0.35	0.30	0.42	0.02	1.00	1	-0.66	-0.67	-0.73	-0.73	0.66	0.66	0.64	0.43
TMA	-0.62	-0.64	-0.68	-0.28	-0.66	-0.66	1	1.00	0.67	0.67	-0.87	-0.87	-0.88	-0.79
TMA2	-0.62	-0.64	-0.68	-0.28	-0.66	-0.67	1.00	1	0.67	0.68	-0.87	-0.87	-0.88	-0.78
TMAX	-0.41	-0.33	-0.48	-0.26	-0.73	-0.73	0.67	0.67	1	1.00	-0.60	-0.60	-0.58	-0.39
TMAX2	-0.41	-0.33	-0.48	-0.26	-0.73	-0.73	0.67	0.68	1.00	1	-0.61	-0.60	-0.59	-0.39
PMA	0.55	0.57	0.57	0.29	0.66	0.66	-0.87	-0.87	-0.60	-0.61	1	1.00	1.00	0.65
PMAMO	0.55	0.57	0.57	0.29	0.66	0.66	-0.87	-0.87	-0.60	-0.60	1.00	1	1.00	0.66
PMAMO2	0.56	0.58	0.58	0.29	0.65	0.64	-0.88	-0.88	-0.58	-0.59	1.00	1.00	1	0.67
VOL	0.75	0.81	0.88	0.10	0.43	0.43	-0.79	-0.78	-0.39	-0.39	0.65	0.66	0.67	1

COB = Cobertura arbórea, LAI5 = Índice de Área Foliar en Sitio, LAIAL = Índice de Área Foliar Alométrico, PENDIENTE = Pendiente del terreno, ALTITUD = Altitud sobre el nivel medio del mar, TMA = Temperatura Media Anual, TMAX = Temperatura Máxima, PMA = Precipitación Media Anual, PMAMO = Precipitación Media Anual Mayo-Octubre, VOL = Volumen de Madera.

Se procedió a realizar una regresión múltiple lineal bajo el método *Stepwise*. Para cada variable se tomó como restricción o selección de entrada (*SLE*) y de estancia (*SLS*) en el modelo una $P < 0.05$ (Cuadro 9).

El modelo cinco ajustado se escribe como:

$$VOL = \beta_0 + \beta_1 COB + \beta_2 TMA + \beta_3 TMA2 + \beta_4 PENDIENTE + \varepsilon_i \quad 5)$$

La R^2 ajustada (por grados de libertad) muestra que el modelo explica el 77.9% de la variabilidad en *VOL*, con tres de sus parámetros estimados como altamente significativos ($\alpha \leq 0.01$) y uno significativo ($\alpha \leq 0.05$).

La R^2 semiparcial muestra que *COB* aporta 0.56 unidades a la R^2 no ajustada. Le sigue en importancia *TMA* que aporta 0.165 unidades a la R^2 no ajustada. El factor de inflación de la varianza (*VIF*) para *TMA* y su cuadrado es mayor de 5, se considera la existencia de multicolinealidad (Cuadro 9).

Cuadro 9. Significancia ($P < 0.001$) del análisis de varianza (ANOVA) y estimadores de los parámetros β_i .

	Modelo 5				Modelo 6			
	Estimador parámetro β_i	Pr > t	Corr., tipo I semiparcial cuadrado	FIV	Estimador parámetro β_i	Pr > t	Corr., tipo I semiparcial cuadrado	FIV
R-cuadrada	0.788				0.8137			
R-ajustada	0.7794				0.8062			
Intercepto	1003.38912	0.0001		0	705.42	0.003		0
COB	0.09363	0.0001	0.5639	1.67				
LAI5					2.56	0.0001	0.65	1.82
LAIAL								
PENDIENTE	-0.11661	0.0112	0.0143	1.16	-0.13	0.0029	0.02	1.17
ALTITUD								
ALTITUD2								
TMA	-133.53265	0.0001	0.16547	> 5	-92.36	0.0049	0.12	> 5
TMA2	4.4283	0.0002	0.04434	> 5	3.02	0.0076	0.02	> 5
TMAX								
TMAX2								
PMA								
PMAMO								
PMAMO2								
	Modelo 7				Modelo 8			
R-cuadrada	0.8856				0.7404			
R-ajustada	0.881				0.7215			
Intercepto	1048.44	0.0001		0	8093.86	0.0001		0
COB								
LAI5								
LAIAL	0.77	0.0001	0.773	1.86				
PENDIENTE								
ALTITUD	-0.01	0.0417	0.005	1.83	-3.99	0.0001	0.18	> 5
ALTITUD2					0.001	0.0001	0.06	> 5
TMA	-137.06	0.0001	0.068	> 5				
TMA2	4.59	0.0001	0.04	> 5				
TMAX					-393.47	0.0004	0.02	> 5
TMAX2					11.11	0.0004	0.0001	> 5
PMA					1.49	0.0001	0.33	> 5
PMAMO					-1.39	0.0001	0.001	> 5
PMAMO2					0.0001	0.0001	0.15	> 5

COB = Cobertura arbórea, LAI5 = Índice de Área Foliar en Sitio, LAIAL = Índice de Área Foliar Alométrico, PENDIENTE = Pendiente del terreno, ALTITUD = Altitud sobre el nivel medio del mar, TMA = Temperatura Media Anual, TMAX = Temperatura Máxima, PMA = Precipitación Media Anual, PMAMO = Precipitación Media Anual Mayo-Octubre.

El sexto modelo ajustado (Cuadro 9) considera como variables explicativas al índice de área foliar en sitio (*LAI5*), temperatura media anual (*TMA*) y su cuadrado (*TMA2*), y pendiente del terreno (*PENDIENTE*).

El modelo seis se escribe como:

$$VOL = \beta_0 + \beta_1 LAI5 + \beta_2 TMA + \beta_3 TMA2 + \beta_4 PENDIENTE + \varepsilon_i \quad 6)$$

La R^2 ajustada muestra que el modelo explica el 80.6% de la variabilidad en *VOL*. Todos sus parámetros estimados son altamente significativos ($\alpha \leq 0.01$).

La R^2 semiparcial muestra que *LAI5* aporta 0.65 unidades a la R^2 no ajustada. Le sigue en importancia *TMA* que aporta 0.12 unidades a la R^2 no ajustada. El factor de inflación de la varianza (*VIF*) para *PMA*, *TMA* y su cuadrado es mayor de 5, se considera la existencia de multicolinealidad (Cuadro 9).

El séptimo modelo (Cuadro 9) tiene como variables explicativas al índice de área foliar alométrico (*LAIAL*), temperatura media anual (*TMA*) y su cuadrado (*TMA2*), y altitud sobre el nivel medio del mar (*ALTITUD*).

El modelo siete ajustado se define como:

$$VOL = \beta_0 + \beta_1 LAIAL + \beta_2 TMA + \beta_3 TMA2 + \beta_4 ALTITUD + \varepsilon_i \quad 7)$$

La R^2 ajustada muestra que el modelo explica el 88.1% de la variabilidad en *VOL*, con tres de sus parámetros estimados como altamente significativos ($\alpha \leq 0.01$) y uno significativo ($\alpha \leq 0.05$).

La R^2 semiparcial muestra que *LAIAL* aporta 0.773 unidades a la R^2 no ajustada. Le sigue en importancia *TMA* que aporta 0.068 unidades a la R^2 no ajustada. El factor de inflación de la varianza (*VIF*) para *TMA* y su cuadrado es mayor de 5, se considera la existencia de multicolinealidad (Cuadro 9).

Finalmente, el octavo modelo (Cuadro 9) contempla como variables explicativas únicamente a variables cartográficas. Se consideró a la altitud sobre el nivel medio del mar (*ALTITUD*) y su cuadrado (*ALTITUD2*), temperatura máxima anual (*TMAX*) y su

cuadrado ($TMAX2$), precipitación media anual (PMA), precipitación media anual en lluvias ($PMAMO$) y su cuadrado ($PMAMO2$).

La más alta relación está dada por el par $VOL - PMA$ y $PMAMO$, es una relación positiva de 0.65 y 0.66 unidades. A ésta le sigue el par $VOL - ALTITUD$, que es positiva con un valor de 0.43 unidades. La relación $VOL - TMAX$ y $ALTITUD$ es moderadamente baja, negativa para el primero y positiva para el segundo. El modelo ocho se escribe como:

$$VOL = \beta_0 + \beta_1 ALTITUD + \beta_2 ALTITUD^2 + \beta_3 TMAX + \beta_4 TMAX^2 + \beta_5 PMA + \beta_6 PMAMO + \beta_7 PMAMO^2 + \varepsilon_i \quad 8)$$

La R^2 ajustada muestra que el modelo explica el 72.2% de la variabilidad en VOL . Todos sus parámetros estimados son altamente significativos ($\alpha \leq 0.01$).

La R^2 semiparcial muestra que PMA aporta 0.33 unidades a la R^2 no ajustada. Le sigue en importancia $ALTITUD$ que aporta 0.18 unidades a la R^2 no ajustada. El factor de inflación de la varianza (VIF) para todas las variables es mayor de 5, se considera la existencia de multicolinealidad (Cuadro 9).

3.3.2.1. Modelado del volumen de madera

Todos los modelos obtenidos para estimar la distribución del volumen de madera (VOL), ponen de manifiesto la importancia de utilizar variables biofísicas (COB , $LAI5$ y $LAIAL$) y cartográficas (TMA , $PENDIENTE$, $ALTITUD$, PMA y $PMAMO$). En el modelo 5 (Figura 12) destaca la importancia de la cobertura arbórea (COB) y la temperatura media anual (TMA), el coeficiente β de la temperatura (Cuadro 9) es consistente con los resultados obtenidos para área basal (AB).

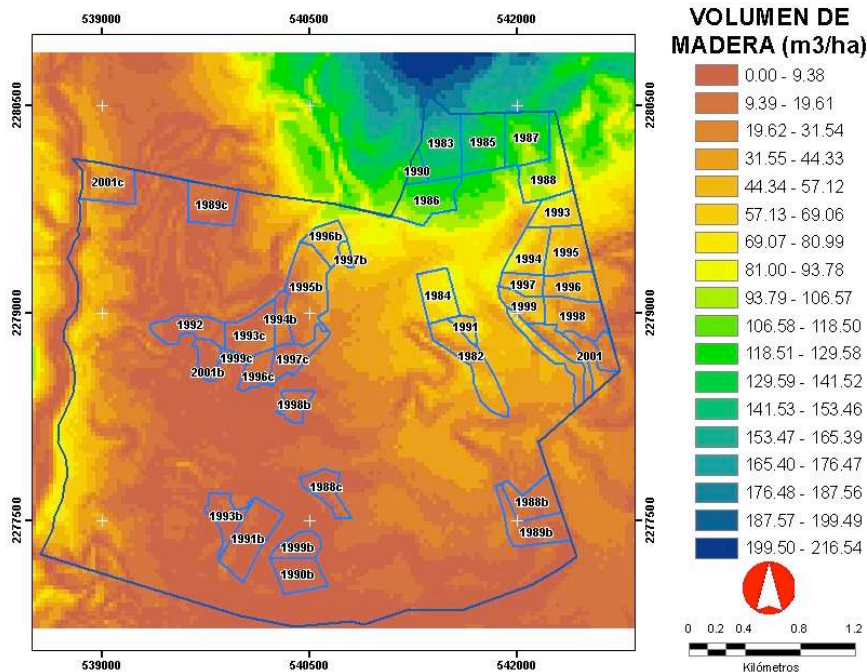


Figura 12. Distribución del volumen de madera (m³/ha) en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 5 para cobertura arbórea (COB).

La temperatura se correlaciona negativamente con el *VOL*, es decir, a mayor temperatura menor cantidad de madera. Esto puede asociarse a la disponibilidad de humedad (precipitación) y como ésta influye en la actividad del árbol y de algunos microorganismos. Como menciona Liétor (2002), en bosques de *Abies pinsapo*, las condiciones extremas de temperatura y humedad del suelo retardan la actividad de los microorganismos relacionados con el ciclado del N (mineralización y nitrificación). Al final del invierno y principios del otoño, coincidiendo con máximos de producción de hojarasca y con la recuperación de condiciones de temperatura y humedad favorables, se incrementan los niveles de N mineral en el suelo y los microorganismos son más efectivos para liberar nutrientes (Chen *et al.*, 2004). Un fenómeno que podría explicar en parte la distribución arbórea en el Ejido Atopixco.

La cobertura arbórea (COB) fue una de las variables que más aportó a explicar el comportamiento del *VOL* (Cuadro 9). La COB es una variable sencilla de medir en campo, sin embargo al momento de modelar se observa que la pendiente del terreno (*PENDIENTE*) influye de algún modo sobre la COB y por ende sobre el *VOL*, aun cuando su coeficiente de correlación semiparcial sea bajo. Como explica Valdez *et al.*

(2006) una opción adecuada para estimar la cobertura de copas, cuando las áreas tienen diversas condiciones fisiográficas, es contar las sombras registradas (en imágenes de satélite) como áreas de vegetación; considerando que en sitios de poca inclinación las sombras efectivamente son suelo sin cubierta vegetal. Esto de manera indirecta puede revelar porque la pendiente de suelo influyó sobre la modelación del *VOL*; las sombras formadas por las pendientes debieron contarse como cobertura arbórea (Figura 12).

En el modelo 6 (Figura 13) la inclinación de terreno (*PENDIENTE*) también produce un efecto positivo sobre la cantidad de *VOL*. Sin embargo su contribución al modelo (Cuadro 9) no se compara a la aportación del índice de área foliar en sitio (*LAI5*). Tanto la *COB* como el *LAI5* dependen de la geometría de copas, de la arquitectura de hojas y ramas, así como de la cantidad de luz que éstas dejan pasar hasta la cámara (Frazer *et al.*, 1999) no obstante hay una mejor relación lineal del *VOL* y *LAI5* (Figura 14B) que del *VOL* y *COB* (Figura 14A). Razón por la cual el coeficiente de correlación parcial del modelo 6 es mayor que el coeficiente del modelo 5 (Cuadro 9).

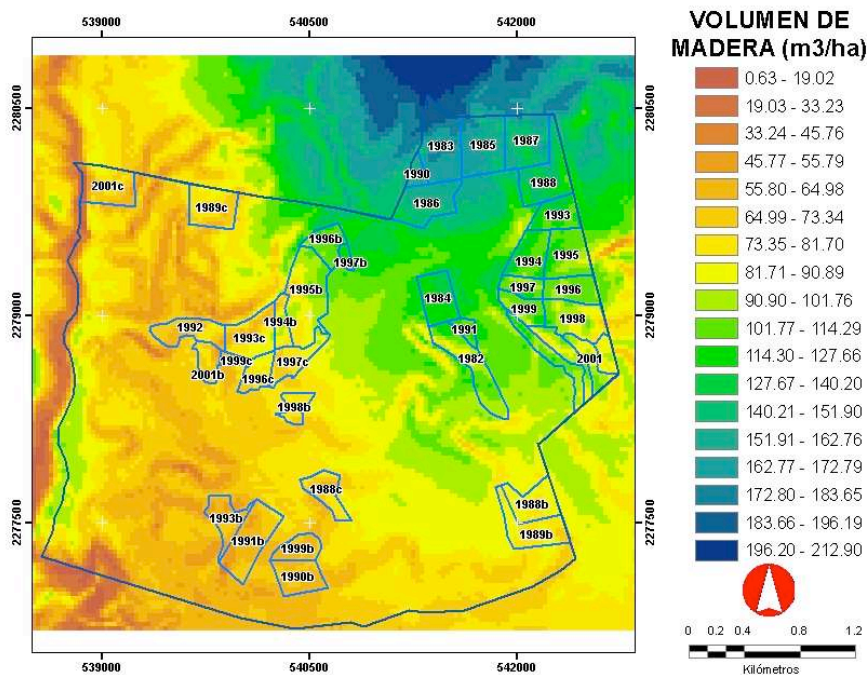


Figura 13. Distribución del volumen de madera (m^3/ha) en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 6 para índice de área foliar en sitio (*LAI5*).

También en el modelo 6 (Figura 13) se hace presente la temperatura media anual (*TMA*), al igual que en modelo 5, la temperatura puede asociarse a la distribución de la humedad (precipitación). De hecho, todos los modelos muestran una tendencia hacia el aumento creciente del *VOL*, desde el suroeste hacia el noroeste; lo cual coincide con el cambio del régimen climático de una zona árida (Valle de Metztlán) hacia una zona templada (Ejido la Mojonera). Esto viene apoyado por la presencia de la variable elevación (*ALTITUD*) que representa el gradiente altitudinal (Figura 13).

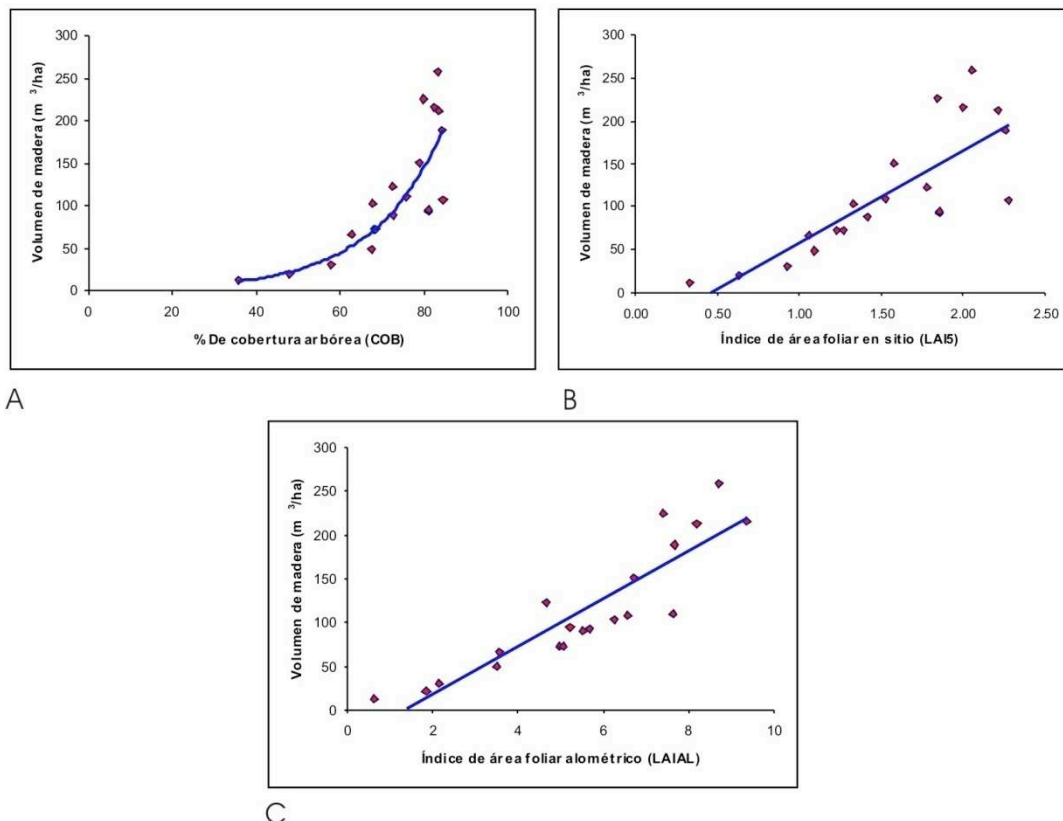


Figura 14.- Correlación del volumen de madera (*VOL*) y A) porcentaje de cobertura arbórea (*COB*), B) índice de área foliar en sitio (*LAI5*), C) índice de área foliar alométrico (*LAIAL*) del estrato arbóreo.

De los modelos ajustados, el modelo 7 (Figura 15) es el que presenta el mayor coeficiente de determinación (Cuadro 9). En este caso, se hace evidente la alta relación guardada entre la variable índice de área foliar alométrico (*LAIAL*) y el volumen de madera (*VOL*) a través del área basal (*AB*) (Figura 14C).

En el modelo 7 (Figura 15), el gradiente climático (temperatura y elevación sobre el nivel del mar) ejercen un marcado efecto sobre la distribución del *VOL*. Se esperaría

que el modelo espacial con *LAI*AL fuera mejor que los modelos obtenidos con *COB* y *LAI*5, desde el momento en que su R^2 fue la más alta de todos los modelos. No obstante, en términos generales, el modelo 7 vuelve a mostrar la tendencia de aumento en *VOL* desde el suroeste hacia el noreste (Ejido la Mojonera). En este sentido, es posible perfeccionar las predicciones en *VOL* sí por un lado se aumenta la precisión de las variables cartográficas y por otro se halla un modelo matemático que emule la complejidad del paisaje. Esto es apoyado por García *et al.* (2006) y McRoberts *et al.* (2002) quienes comprobaron que los modelos espaciales son susceptibles a mejoras, sí se reduce la heterogeneidad del bioma, lo cual hace que la relación entre variables forestales y variables radiométricas no sea tan alta como las observadas en otros medios forestales más homogéneos.

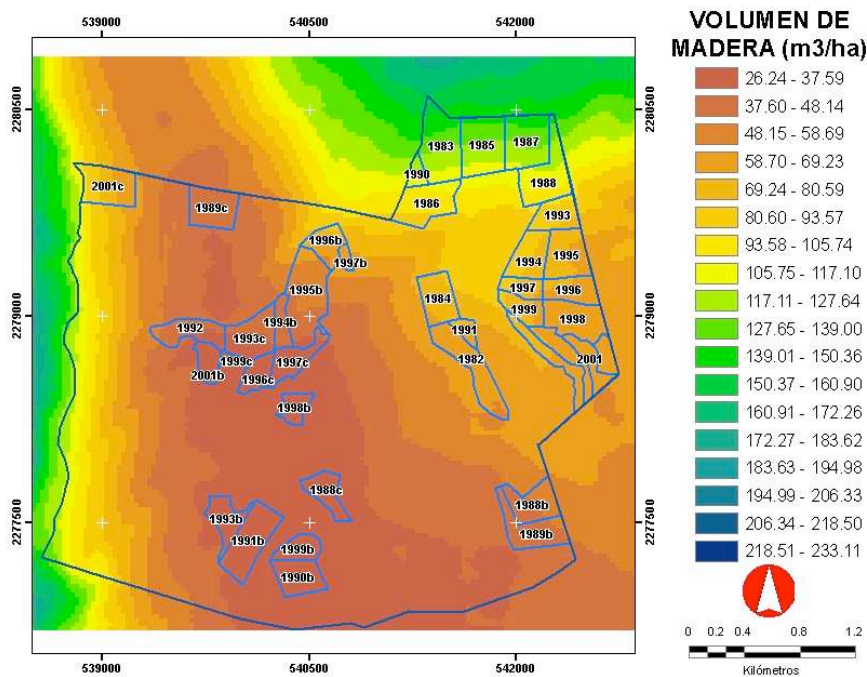


Figura 15. Distribución del volumen de madera (m^3/ha) en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 7 para índice de área foliar en alométrico (*LAI*AL).

Por su parte, el modelo 8 (Figura 16), generado a partir de variables cartográficas. Presenta el menor coeficiente correlación ($R^2 = 0.74$) de los cuatro modelos para distribución de *VOL*. Esto se ve reflejado en el intervalo del *VOL* (Figura 16) que va de 99.9 a 126.6 m^3/ha , en comparación el modelo 2 tiene un intervalo de 0.6 a 213 m^3/ha . Al igual que en el modelo de área basal (Figura 11), los coeficientes para elevación

sobre el nivel medio de mar (*ALTITUD*), temperatura máxima anual (*TMAX*), precipitación media anual (*PMA*) y precipitación en época de lluvias (*PMAMO*); indican que la cantidad de *VOL* incrementa con la elevación (*ALTITUD*) y con el aumento en precipitaciones (*PMA*, *PMAMO*), por el contrario la cantidad de *VOL* disminuye al haber un aumento en la temperatura (*TMAX*). Lo anterior concuerda con lo observado en los modelos 5, 6 y 7.

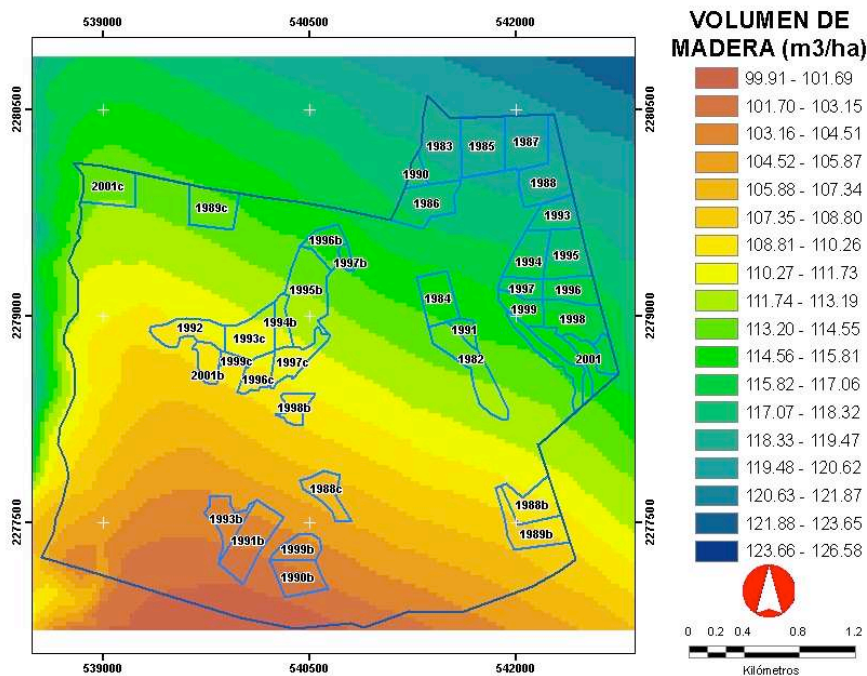


Figura 16. Distribución del volumen de madera (m^3/ha) en el Ejido Atopixco, Hidalgo con base al modelo 8 para variables cartográficas.

La trascendencia de los modelos para distribución del *VOL* radica en su aplicación, por ejemplo Noda y Hayashi (2004) usando pendiente del terreno, altitud, distancia a una vía de comunicación, categoría del sitio y grado de ausencia en relación a la producción de madera en Kumamoto, Japón, notaron una diferencia significativa en la distribución espacial de las tierras reforestadas y las no reforestadas, esto en razón a la pendiente del terreno y a la actividad económica. Para Atopixco significaría la posibilidad de acceder a nuevas herramientas que coadyuven a la planeación (operativa y estratégica) debidamente administrada y ejecutada para alcanzar metas próximas a lo proyectado (control), al tiempo que se genera nuevo conocimiento, del cual podrían derivarse funciones de producción y valoración para finalmente obtener

funciones de optimización (periodo de cortas, transporte y participación en el mercado, pago por servicios ambientales) como lo especifica Buongiorno y Pilles (1987) para bosques templados de *Pinus spp.*

Finalmente, el mayor reto al modelar el *VOL* fue la escala de las variables cartográficas (< 1: 250 000) de la zona de estudio. Esto produjo extensas áreas donde las variables (*ALTITUD*, *PMA*, *PMAMO*, *PENDIENTE*, *TMA* y *TMAX*) no mostraban variabilidad espacial. Como describen Fazakas *et al.* (1999), Franco *et al.* (2001) y Mäkelä y Pekkarinen (2001), la estimación del volumen de madera (con sensores remotos) puede aplicarse a zonas pequeñas, siempre y cuando se tenga presente que esa estimación depende del cuadrado medio del error (*RMSE*) de lo estimado y lo medido en campo. La pregunta relevante es ¿cómo reducir el error medio a la vez que se aumenta la varianza explicada? Al parecer las variables cartográficas son un tercio del camino, los otros dos tercios son representados por las variables biofísicas (*COB*, *LAI5*, *LAIAL*). Al respecto Lee (1995) mostró que es posible obtener coeficientes de correlación múltiple elevados ($R^2 > 0.90$) sí se posee información geográfica de escala adecuada. En este caso, se tenían variables categóricas de especies, edades y cobertura para toda la zona de estudio. El secreto radicó en la calidad de los mapas. Para el Ejido Atopixco hubo que utilizar información del Instituto de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y de la Comisión Nación para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Como se mencionó, en la modelación del área basal, el problema de generar las variables cartográficas a partir de información de INEGI y CONABIO radicó en lidiar con mapas de escala muy pequeña ($\geq 1: 50\ 000$). Se puede afirmar que de contar con información fisiográfica y climática de escala grande ($\leq 1: 25\ 000$) se habrían obtenido resultados muy significativos (Foody *et al.*, 2003; Silbernagel y Moeur, 2001; Velázquez *et al.*, 2002).

3.3.2.2. Comparación de las estimaciones de inventario para volumen de madera

De acuerdo al inventario por *MEA*, la cantidad promedio de volumen de madera (*VOL*) fue de 140.69 m³/ha. Se estima un inventario final de 42019.11 m³, con una variación estimada en *VOL* de ± 5.28% (Cuadro 3 y 10).

El promedio de *VOL* - por *MRR* – fue menor (118.89 m³/ha) al obtenido por *MEA* (140.69 m³/ha). El inventario final de *VOL* por *MRR* fue de 35507.37 m³, con una variación estimada en *VOL* de ± 4.43% (Cuadro 4 y 10).

Cuadro 10. Comparación de las estimaciones de volumen de madera (m³/ha) con inventario tradicional y con inventario por SIG. Intervalos de confianza (IC) al 95% de significancia estadística.

		Volumen de Madera Total			
Superficie (ha)		IC-	TOTAL	IC+	Precisión % (B/y)
Inventario Tradicional	Inventario MEA	39800.52	42019.11	44237.7	5.28%
	Inventario MRR	33933.19	35507.37	37081.55	4.43%
Inventario SIG	Modelo 5 (COB)		64672.88		
	Modelo 6 (LAI5)		63585.74		
	Modelo 7 (LAIAL)		69621.76		
	Modelo 8 (Cartográficas)		37804.99		

COB = Cobertura arbórea

LAI5 = Índice de área foliar en sitio

LAIAL = Índice de área foliar alométrico

MEA = Muestreo Estratificado Aleatorio

MRR = Muestreo de Razón y Regresión

Tomando como base el inventario por regresión (*MRR*), se procedió a comparar su resultado con el obtenido por los modelos de regresión lineal múltiple (*RLM*).

Todos los modelos propuestos para describir la distribución *VOL*, presentaron sobreestimaciones con relación al inventario obtenido por *MRR*. Sin desatender éste punto, fue el modelo 8 (Variables Cartográficas) el que mejor se ajustó a la estimación de inventario final. Sí se toma como referencia el inventario obtenido por *MRR* (35507.37 m³) se observa que tal estimación es similar al obtenido por el modelo 8 (37804.99 m³). La diferencia entre ambas estimaciones es de 2298 m³. Un margen considerablemente menor, en comparación al *MEA* (6512 m³). Por el contrario, sí se toma como referencia al inventario obtenido por *MEA*, la mayoría de los modelos (5 al

7) muestran sobreestimaciones de *VOL*, en cambio el modelo 8 está por debajo de ese inventario. En éste caso la diferencia entre el inventario por *MEA* (42019.11 m³) y el obtenido a través del modelo 8 (37804.99 m³) es de 4214 m³.

De acuerdo a Aguirre (2007), en el Ejido Mojonera el promedio de *VOL* fue de 191.96 m³/ha. Éste resultado confirma que las estimaciones obtenidas por *MEA*, *MRR* y Modelo 8 son congruentes con la ubicación geográfica del Ejido Atopixco, pues cabe recordar que el clima de La Mojonera (ejido colindante a Atopixco) es más húmedo y los rodales están dominados por la especie *Pinus patula*. Por el contrario en el Ejido Atopixco el clima es más seco, además de que existen rodales mezclados de *Pinus patula* y *Pinus teocote*, razón por lo cual se esperaría una menor producción de área basal y en consecuencia un promedio menor de volumen de madera (Ángeles, 1995).

Un dato muy importante observado por Aguirre (2007) es que los errores cuadráticos medios (*RECM*) más altos se asociaron a la estimación de volumen de pino. De hecho, en este trabajo las R^2 ajustadas para volumen de madera (*VOL*) siempre fueron menores a la de sus pares para área basal (*AB*).

3.4. Conclusiones

Para la variable dasométrica *AB* se halló una correlación positiva con las variables cartográficas temperatura media anual (*TMA*), altitud sobre el nivel medio del mar (*ALTITUD*) y precipitación media anual en lluvias (*PMAMO*). Los coeficientes β_i de estas variables (excepto *TMA*) muestran una correlación positiva con *AB*. La cantidad de *AB* incrementa con la disponibilidad de lluvias y el aumento (hasta cierto nivel) en altitud. Es decir, el *AB* sigue un régimen climático influido por el cambio en altitud. En cuanto a *TMA*, esta pudo relacionarse con la transición de bosque templado a matorral xerófilo o bien con la transición del clima árido del Valle de Metztitlán hacia el clima templado del Ejido La Mojonera.

Las variables biofísicas de cobertura arbórea (*COB*), índices de área foliar en sitio (*LAI5*) y alométrico (*LAIAL*) mostraron alta correlación con *AB*. Destaca la correlación de *AB* con *LAIAL*, esto queda explicado por la relación de *AB* con la biomasa seca del follaje, misma que fue parte importante para la estimación de *LAIAL*.

Mención aparte merece la correlación de *AB* con la banda 4 (*B4*) que siempre fue negativa. En este caso se puede afirmar que las estructuras foliares de los árboles mediaron en la relación de *AB* con *B4*. A mayor cantidad de área foliar, mayor área basal y por tanto menor reflectancia del infrarrojo medio (*B4*).

El rango de *AB* predicho por los modelos varió de 12.16 a 20.47 m²/ha, un valor muy cercano al obtenido por el análisis de los datos de campo (22.54 m²/ha).

Para la variable dasométrica volumen de madera (*VOL*) se observó una correlación positiva con las variables cartográficas temperatura media anual (*TMA*), altitud sobre el nivel medio del mar (*ALTITUD*) y precipitación media anual en lluvias (*PMAMO*). Los coeficientes β_i de estas variables (excepto *TMA*) muestran una correlación positiva con *VOL*. Al igual que con *AB*, el *VOL* incrementa con la disponibilidad de lluvias y el aumento (hasta cierto punto) en altitud; o bien con la transición del clima árido del Valle de Metztitlán hacia el clima templado del Ejido La Mojonera. Es importante destacar que la cantidad de volumen de madera aumenta conforme las masas forestales se acercan al Ejido La Mojonera.

Las variables biofísicas de cobertura arbórea (*COB*), índices de área foliar en sitio (*LAI5*) y alométrico (*LAIAL*) también mostraron alta correlación con *VOL*.

Destaca la relación de *VOL* con el índice de vegetación ajustado al suelo (*SAVI*). El *SAVI* fue útil debido a que la zona de estudio presentó variabilidad en cubierta vegetal, producto de áreas con suelo desnudo o poca cubierta verde.

El rango de *VOL* predicho por los modelos varió de 126.58 a 233.11 m³/ha, un valor muy cercano al obtenido por el análisis de los datos de campo (118.89 m³/ha).

El volumen de madera (*VOL*) promedio obtenido por muestreo de regresión fue menor (118.89 m³/ha) al obtenido por muestreo estratificado (140.69 m³/ha). En este caso, la variable auxiliar por muestreo de regresión fue área basal (*AB*), dada su alta correlación ($r^2 = 0.92$).

Finalmente, el mayor propósito de esta investigación fue mejorar la predicción en área basal y volumen de madera empleando variables cartográficas y espectrales. Sin embargo los resultados obtenidos fueron inesperados. Por ejemplo, los modelos que sólo contemplaron como elementos predictores a variables cartográficas tuvieron coeficientes de correlación parcial menores, en comparación con aquellos modelos que

usaron *COB*, *LAI5* y *LAIAL*. Siendo que uno de los objetivos era dar mayor peso a las variables cartográficas, porque estas son más fáciles de generar y su costo es muy bajo en comparación a una salida de campo ¿cuál fue el problema?...

El mayor problema fue que para el Ejido Atopixco se utilizó información de escala muy pequeña ($\leq 1: 250\ 000$). En este sentido, se puede afirmar que de contar con información fisiográfica y climática de escala grande ($\geq 1: 25\ 000$) posiblemente se habrían obtenido mejores predicciones. De hecho y a pesar de contar con información geográfica de poca calidad, se pudieron obtener coeficientes de correlación parcial moderadamente altos. Razón que justifica el empleo de variables cartográficas en el inventariado de recursos forestales.

Capítulo 4. Discusión general y conclusiones

Los sistemas de información geográfica (*SIG*) y la modelación espacial son una ciencia relativamente joven cuyo campo de aplicación se extiende a casi todas las ramas del conocimiento humano. En este estudio se utilizó un *SIG* para estudiar variables biofísicas (cobertura arbórea e índice de área foliar) y dasométricas (área basal y volumen de madera).

En el Capítulo 2 se mostró que la mayor proporción de especies arbóreas existentes en el área de estudio corresponden a *Pinus patula* (65.5%), seguida de *Pinus teocote* (15%) y *Quercus laurina* (9.3%). También se observó que el 85.65% de los árboles presentaron un Diámetro a la Altura del Pecho (*DAP*) mayor a 10 cm. Por otro lado, 33.8% del área basal (*AB*) se concentra en los individuos que poseen un *DAP* de entre 1 y 13 cm. Hay una alta densidad en rodales jóvenes, por lo cual se propone una serie de tratamientos intermedios (aclareos y podas) con el fin de reducir la competencia y aumentar la calidad de la madera.

Del análisis de regresión lineal múltiple (*RLM*) se concluyó que la variable cobertura arbórea (*COB*) tiene una correlación positiva con las variables cartográficas como exposición (*EXPOSICIÓN*) y precipitación media anual en época de lluvias (*PMAMO*) y secas (*PMANA*). Tal relación responde a la necesidad de las especies arbóreas por humedad (Ceccatoa *et al.*, 2001; Begon *et al.*, 1990).

La relación de *COB* con la banda 4 (*B4*) mereció especial atención, sí bien los coeficientes de correlación para esa variable no fueron altos, queda claro que su tasa de cambio (β_i) tuvo un signo negativo. Esto concuerda con lo observado por Chen *et al.* (2004) y Lencinasa y Mohr-Bell (2007).

Por su parte el índice de área foliar en sitio (*LAI5*) fue sensible a la densidad arbórea, hecho que explica porque rodales jóvenes presentaron valores *LAI5* similares a los de rodales más viejos. El *LAI5* tuvo una buena correlación con las variables cartográficas precipitación media anual (*PMA*) y temperatura máxima anual (*TMAX*). Al igual que con *COB*, el *LAI5* se beneficia de las lluvias, pero se ve afectada por el incremento de la temperatura. En este caso, la temperatura se puede asociar a las áreas más secas del

ejido, es decir, a la parte donde empieza la transición de bosque templado a matorral xerófilo (Ángeles, 1995). También destaca la relación negativa de *LA15* con *B4*.

El índice de área foliar alométrico (*LAIAL*) fue sensible a la cantidad de *AB*. Esto contribuyó a que los modelos para estimar *LAIAL* (a partir de *AB* y variables cartográficas) presentaran los mayores coeficientes de correlación parcial. El *LAIAL* tuvo un comportamiento semejante al de *LA15* con relación a las variables cartográficas *PMA* y *TMAX*. En este sentido la estimación de *LAIAL* dependió del cálculo de la biomasa seca del follaje, es decir, el incremento en biomasa se beneficia de un clima más templado y húmedo lo cual concordó con lo observado por Claveau *et al.* (2005) y Muñoz *et al.* (2005).

De todos los índices de vegetación probados, el *SAVI* (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo) fue el único que resultó significativo para los *RLM* (en específico para *LAIAL*). De acuerdo a Cándido (1998), Lee y Hong (2006) y Ma *et al.* (2004) el *SAVI* es un índice muy útil cuando las zonas a estudiar presentan cierta variabilidad en cubierta vegetal, producto de áreas con suelo desnudo o poca cubierta verde. Condición que puede apreciarse en el Ejido Atopixco.

En el Capítulo 3 se mencionó que la variable dasométrica *AB* tuvo una correlación positiva con las variables cartográficas temperatura media anual (*TMA*), altitud sobre el nivel medio del mar (*ALTITUD*) y precipitación media anual en lluvias (*PMAMO*). Esto concuerda con lo dicho por Trotter y Dymond (1997) y Miranda y Condal (2003) quienes describen que la cantidad de área basal incrementa con la disponibilidad de lluvias y el aumento (hasta cierto nivel) en altitud. El *AB* sigue un régimen climático influido por el cambio en altitud.

Las variables biofísicas de *COB*, *LA15* y *LAIAL* mostraron alta correlación con *AB*. Destaca la correlación de *AB* con *LAIAL*, esto queda explicado por la relación de *AB* con la biomasa seca del follaje, misma que fue parte importante para la estimación de *LAIAL* (Aguirre, 2007; Cano *et al.*, 1996 y Figueroa, 2008). La correlación de *AB* con la banda 4 (*B4*) siempre fue negativa. En este caso las estructuras foliares de los árboles influyeron en la relación de *AB* con *B4*. A mayor cantidad de área foliar, mayor área basal y por tanto menor reflectancia del infrarrojo medio (*B4*) (Sivanpillai *et al.*, 2006)

Para la variable dasométrica volumen de madera (*VOL*) también se observó una correlación positiva con las variables *TMA*, *ALTITUD* y *PMAMO*. Al igual que con *AB*, el *VOL* incrementa con la disponibilidad de lluvias y el aumento (hasta cierto límite) en altitud.

Las variables biofísicas de *COB*, *LAI5* y *LAIAL* también mostraron alta correlación con *VOL*. Destaca la relación de *VOL* con *SAVI*.

A partir de un muestreo estratificado aleatorio (*MEA*) para *AB* y uno de regresión (*MRR*) para *VOL* se obtuvo un promedio de 22.54 m²/ha de *AB* y 140.69 m³/ha de *VOL*. Información que ayudó a validar los resultados obtenidos a través de la modelación espacial. De los cuatro modelos propuestos para *AB*, el modelo 2 (*LAI5*) es el que mejor se ajustó a la estimación de inventario final. El inventario obtenido por *MEA* fue de 6730.69 m² mientras que por modelo 2 fue de 6113.67 m², la diferencia en área basal fue de 617 m². Destaca el resultado obtenido con el modelo 4, el cual está integrado únicamente por variables cartográficas. A pesar de tener la menor R² ajustada (0.7117) fue el segundo modelo que más se acercó al inventario final (4805.52 m²). Estos resultados concuerdan con los presentados por Aguirre (2007) quien obtuvo para el Ejido Mojonera un *AB* promedio de 25.47 m²/ha. El *AB* fue la variable respuesta que mejor ajuste tuvo las variables independientes.

De los cuatro modelos propuestos para *VOL*, el modelo 8 (Variables Cartográficas) fue el que mejor se ajustó a la estimación de inventario final. Al tomar como referencia el inventario obtenido por *MRR* (35507.37 m³) se observa que tal estimación es similar al obtenido por el modelo 8 (37804.99 m³). La diferencia entre ambas estimaciones es de 2298 m³. Esto concuerda con lo observado por Aguirre (2007) quien obtuvo, en el Ejido Mojonera, un promedio de 191.96 m³/ha de *VOL*. Éste resultado confirma que las estimaciones obtenidas por *MEA*, *MRR* y Modelo 8 son congruentes con la ubicación geográfica del Ejido Atopixco donde el clima es más seco, además de que existen rodales mezclados de *Pinus patula* y *Pinus teocote*, razón por lo cual se esperaría una menor producción de área basal y en consecuencia un promedio menor de volumen de madera (Ángeles, 1995).

Finalmente, el propósito de esta investigación fue mejorar la predicción cobertura arbórea, índices de área foliar, área basal y volumen de madera empleando variables

cartográficas y espectrales. Sin embargo los resultados obtenidos fueron inesperados. Por ejemplo, los modelos que sólo contemplaron como elementos predictores a variables cartográficas tuvieron coeficientes de correlación parcial menores, en comparación con aquellos modelos que usaron *COB*, *LAI5* y *LAIAL*. Siendo que uno de los objetivos era dar mayor peso a las variables cartográficas, porque estas son más fáciles de generar y su costo es bajo en comparación a una salida de campo ¿cuál fue el problema?

El mayor problema fue que para el Ejido Atopixco se utilizó información de escala muy pequeña ($\leq 1: 250\ 000$). Bajo estas circunstancias, por ejemplo la interpolación de las isotermas e isoyetas fue muy difícil, aparecieron amplias zonas con poca variación razón que afectó a los modelos. En este sentido, puede afirmarse que de contar con información fisiográfica y climática de escala grande ($\geq 1: 25\ 000$) se habrían obtenido resultados altamente significativos. De hecho, aun trabajando con información geográfica de poca calidad, se obtuvieron coeficientes de correlación parcial moderadamente altos. Razón que justifica el empleo de variables cartográficas en el inventariado de recursos forestales.

5. Literatura citada

- Aguirre S., C. A. 2007. Almacenamiento de carbono en bosques manejados de *Pinus patula*: Estimación mediante percepción remota. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Postgrado Forestal. México. 98 p.
- Ángeles P., G. 1995. Efecto de la vegetación competidora en el desarrollo inicial de *Pinus patula*. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Postgrado Forestal. México. 114 p.
- Ángeles P., G., J. R. Valdez L., H. De los Santos P., P. Hernández De la Rosa, A. Gómez and A. Velásquez. 2005. Carbon storage in managed *Pinus patula* forest in central Mexico. *The International Forestry Review* 7(5): 294.
- Ante, M. E., J. A. Peri y M. C. Serafini. 2005. Detección de cambios a través del análisis multitemporal de imágenes satelitales en un sector de la provincia de San Luis. Publicación Monográfica INTA, EEA San Luis. 20 p.
- Aspinall, R. J. 1992. An inductive modeling procedure based on bayes theorem for analysis of pattern in spatial data. *International Journal of Geographical Information Systems* 8: 105 – 121.
- Bai, Y., K. Broersma, D. Thompson and T. J. Ross. 2004. Landscape-level dynamics of grassland-forest transitions in British Columbia. *Journal of Range Management* 57: 66 – 75.
- Barrantes, O. y C. A. Gracia. 1989. Estimación del área foliar a partir de la superficie de albura en *Pinus sylvestris*. *Options Méditerranéennes – Série Séminaires* 3: 53 – 56.

- Begon, M., J. L. Harper and C. R. Townsend. 1990. Ecology individuals, populations and communities. 2^a Ed. Blackwell Scientific Publications. Massachusetts, USA. 47 – 121p.
- Belsley, D. A., E. Kuh and R. E. Welsch. 2005. Regression Diagnostics: Identifying Influential Data and Sources of Collinearity. Wiley-IEEE. U.S.A. 201 p.
- Black, B. A. and M. D. Abrams. 2005. Disturbance history and climate response in an old – growth hemlock – white pine forest, central Pennsylvania. Journal of the Torrey Botanical Society 132 (1): 103 – 114.
- Bolstad, P. V., J. M. Vose and S. G. McNulty. 2001. Forest Productivity, Leaf Area and Terrain in Southern Appalachian Deciduous Forests. Forest Science 47(3): 419 - 427.
- 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 SENS. ENVIRON. 71: 16 – 25.
- Buongiorno, J. and J. K. Gilles. 1987. Forest management and economics. A primer in quantitative methods. Macmillan publishing company. U. S. A. 285 p.
- Camarero, J. J. y E. Gutiérrez. 1999. Patrón espacial de un ecotono bosque subalpino – pastos alpinos (Las Cutas, Ordesa, Pirineos Centrales). Invest. Agr.: Sist. Recur. For. 8 (1): 172 – 215.
- Cándido, Xavier A. 1998. Estimación de propiedades biofísicas de plantaciones de eucaliptos a partir de datos Landsat TM. Tesis de Maestría. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales (INPE). Brasil 98 p.

- Cano Morales, E., A. Velásquez, J. J. Vargas, C. Rodríguez and A. M. Fierros. 1996. Área foliar específica en *Pinus patula*, efecto del tamaño del árbol, edad del follaje y posición en la copa. *Agrociencia* 30, 117 - 122.
- Carrillo, A. F., Acosta, M.M. y Tenorio, G. G. 2004. Tabla de volumen para *Pinus patula* Schl. et Cham. en el Estado de Hidalgo. Folleto Técnico No. 2. INIFAPSAGARPA. 16p.
- Ceccatoa, P., S. Flasseb, S. Tarantolac, S. Jacquemoudd and J. M. Grégoirea. 2001. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment* 77: 22 – 33.
- Chavez, P.S. 1996 Image Based Atmospheric Corrections - Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62(9): 1025 -1036.
- Chen, X., L. Vierling, E. Rowell and T. DeFelice. 2004. Using lidar and effective LAI data to evaluate IKONOS and Landsat 7 ETM+ vegetation cover estimates in a ponderosa pine forest. *Remote Sensing of Environment* 91: 14 - 26.
- Claveau, Y., C. Messier and P. Comeau. 2005. Interacting influence of light and size on aboveground biomass distribution in sub-boreal conifer saplings with contrasting shade tolerance. *Tree Physiology* 25: 373 - 384.
- Claveau, Y., C. Messier and P. G. Comeau. 2005. Interacting influence of light and size on aboveground biomass distribution in sub-boreal conifer saplings with contrasting shade tolerance. *Tree Physiology* 25: 373 - 384.
- Coelho Amaral, P. H. 2001. Evaluación de las condiciones, procesos y resultados del manejo forestal comunitario en la amazonía brasileña. Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Costa Rica. 112 p.

- Collet, C., O. Lanter and M. Pardos. 2001. Effects of canopy opening on height and diameter growth in naturally regenerated beech seedlings. INRA, EDP Sciences 58: 127 - 134.
- Colleta, C., O. Lantera and M. Pardosb. 2001. Effects of canopy opening on height and diameter growth in naturally regenerated beech seedlings. INRA, EDP Sciences 58: 127 – 134.
- Corvalán, P. and J. H. Palma. 2006. Densidad de rodal. UNIVERSIDAD DE CHILE, Facultad de Ciencias Forestales. Departamento de Manejo de Recursos Forestales. Cátedra de Dasometría. 5 p.
- Crawley, M. 1993. Glim for ecologists. Blackwell Scientific Publications. London. 363 p.
- Dietz, J., D. Hölscher, C. Leuschner and Hendrayanto. 2006. Rainfall partitioning in relation to forest structure in differently managed montane forest stands in Central Sulawesi, Indonesia. *Forest Ecology and Management* 237: 170 – 178.
- Dirzo, M. R., O. Maser and Ma. J. Ordóñez. 1992. Estimates of carbon emissions from deforestation in Mexico. *Institute of Ecology UNAM*: 1 – 49.
- Dykstra, D. P. 1984. *Mathematical programming for natural resource management*. McGraw – Hill Book Company. EE. UU. 309 p.
- Eastman, J. R. 2001. *IDRISI for windows. User's Guide, version 3.2*. Clark Labs. 144 p.
- Enciclopedia de los municipios de México, EMM. 2000. Estado de Hidalgo: Zacualtipán de los Ángeles.

- FAO Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2000. 2002. Estudio mundial para FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), Italia. 494 p.
- FAO Inventario Forestal Nacional. 2004. Manual de campo modelo. Departamento de Montes, FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). Guatemala. 89 p.
- 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.
- Ferrando, J. J., J. F. Goya, M. D. Barrera, P. F. Yapura and J. L. Frangi. 2000 - 2001. Biomasa y productividad aérea de bosques de *Austrocedrus chilensis* en Río Negro, Argentina. *Rev. Fac. Agron., La Plata* 104(2): 139 -149.
- Figuroa, N. C. M. 2008. Almacenamiento de carbono en bosques manejados de *Pinus patula* en la Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo. Tesis de Maestría en Ciencias. Postgrado Forestal. Colegio de Postgraduados. Datos no publicados.
- Foody, G. M., R. G. Jackson and C. P. Quine. 2003. Potential improvements in the characterization of forest canopy gaps caused by wind throw using fine spatial resolution multispectral data: comparing hard and soft classification techniques. *Forest Science* 49 (3): 444 – 454.
- Franco-López, H., A. R. Ek and M. E. Bauer. 2001. Estimation and mapping of forest stand density, volume and cover type using *k* – nearest neighbor's method. *Remote Sensing of Environment* 77: 251 – 274.
- Frazer, G. W., Canham, C.D. y Lertzman, K. P. 1999. Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0; Imaging software to extract canopy structure and gap light

- transmission indices from true-color fisheye photographs. User's manual and program documentation. Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia and the Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York.
- Gallant, R. 1991. An earth is vanishing forest. McMillan Publishing Company, USA. 28 – 49 p.
- García M, A., F. Pérez C. y J. Riva F. 2006. Evaluación de los recursos de biomasa residual forestal mediante imágenes del satélite Landsat y SIG. *GeoFocus* 6: 205 - 230.
- Gilabert, M. A., J. González - Piqueras and J. García-Haro. 1997. Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección* 8: 1 - 10.
- Gilabert, M. A., J. González, F. J. García and J. Meliá. 2002. A generalized soil adjusted vegetation index .*Remote sensing of Environment* 82: 303 – 310.
- Gobbi, Miriam E. 2007. Condiciones de micrositio para juveniles de *Austrocedrus chilensis* y respuesta a intervenciones extractivas. *Bosque* 28(1): 50 - 56.
- González M., R., E. J. Treviño, O. A. Aguirre, J. Jiménez, I. Cantú, R. Foroughbakhch. 2004. Rodalización mediante sistemas de información geográfica y sensores remotos. *Investigaciones Geográficas - UNAM* 53: 39 - 57.
- Gould, W. 2000. Remote sensing of vegetation, plant species richness and regional biodiversity hotspot. *Ecological Application* 10 (6): 1861 – 1870.
- Guisan, A. and N. E. Zimmermann. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modeling* 135: 147 – 186.

- Guisan, A., S. B. Weiss and A. D. Weiss. 1999. GLM versus CCA spatial modeling of plants species distributions: setting the scene. *Ecological Modeling* 157 (2-3): 89 – 100.
- Hardy O. J. and B. Sonké. 2004. Spatial pattern analysis of tree species distribution in a tropical rain forest of Cameroon: assessing the role of limited dispersal and niche differentiation. *Forest Ecology and Management* 197: 191 – 202.
- Huber, A. and R. Trecaman. 2002. The effect of the inter-annual variability of rainfall on the development of *Pinus radiata* (D. Don) plantations in the sandy soil zones of VIII region of Chile. *Bosque (Valdivia)* 23(2): 43 - 49.
- Huete, A. R. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), Remote Sensing and the Environment 25: 53 - 70.
- Husch B., T. W. Beers and J. A. Kershaw. 2003. *Forest Mensuration*. 4th. Edition. John Wiley y Sons. 443 p.
- Informe de la Situación del Medio Ambiente en México (ISAMAM). 2006. Compendio de Estadísticas Ambientales. PNUD – SEMARNAT. México. 383 p.
- Johnston, Kevin., J. M. Ver Hoef, K. Krivoruchko and N. Lucas. 2001. *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*. GIS by ESRI. EE. UU. 310 p.
- Jonckheere, I., S. Fleck, K. Nackaerts, B. Muysa, P. Coppin, M. Weiss, F. Baret. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121: 19 – 35.
- Kennedy, M. and S. Kopp. 2000. *Understanding Map Projections*. GIS by ESRI. EE. UU. 110 p.

- Kitani, O., C. W. Hall, K. Wagener, S. Tsuru, T. Susuki and S. Sudo. 1989. Biomass hand book. Gordon and Breach Science Publishers, USA. 4 – 198 p.
- Leblanc, S. G., J. M. Chen, R. Fernandez, D. W. Deering and A. Conley. 2005. Methodology comparison for canopy structure parameters extraction from digital hemispherical photography in boreal forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 129: 187 – 207.
- Lee, David C. L. 1995. Timber volume estimation using qualitative variables. National Institute for Space Research – INPE 613 – 621.
- Lee, S. B. and H. J. Hong. 2006. Leaf Area Index (LAI) Analysis of Landsat Satellite Images for Monitoring of the Future CDM Afforestation/Reforestation Project in North Korea. Korea Environment Institute. Korea. 61 p.
- Lencinasa, J. D. y D. Mohr-Bell. 2007. Estimación de clases de edad de las plantaciones de la provincia de Corrientes Argentina con base en datos satelitales Landsat. *BOSQUE* 28(2): 106 - 118.
- Liétor Gallego, J. 2002. Patrones de disponibilidad y limitación por nutrientes como indicadores de estado en masas de pinsapar (*Abies pinsapo* Boiss.). Tesis de Doctorado. Ecosistemas. España. Año XI 3: 1 – 5.
- Lillesand, T. M. and R. W. Kiefer. 2001. Remote sensing and image interpretation. 4a. Ed. John Wiley and Sons, USA. 720 p.
- Lindenmayer, D. B., B. G. Mackey, I. C. Mullen, M. A. McCarthy, A. M. Gill, R. B. Cunningham and C. F. Donnelly. 1999. Factors affecting stand structure in forest – are there climatic and topographic determinants? *Forest Ecology and Management* 123: 55 – 63.

- Long, J. N., T. J. Dean and S. D. Roberts. 2004. Linkages between silvicultura and ecology: examination of several important conceptual models. *Forest Ecology and Management* 200: 249 – 261.
- Ma, M. G., X. Li, L. Lu, T. Che, C. L. Huang, F. Veroustraete , S. Else, Q. H. Dong, R. Ceulemnans, J. Bogaert. 2004. Up-scaling the field measured data from Landsat ETM+ image for validating biophysical variables in the Heihe River Basin, Northwest China. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute (CAREERI). China. 32 p.
- Mäkelä, H. and A. Pekkarinen. 2001. Estimation of timber volume at the sample plot level by means of image segmentation and Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment* 77: 66 – 75.
- Maliha S. N. and D. J. Chaloud. 2002. Multivariate analyses (canonical correlation and partial least square (PLS)) to model and assess the association of landscape metrics to surface water chemical and biological properties using savannah river basin data. U.S. Environmental Protection Agency (EPA), EE.UU. 76 p.
- Manel, S.; Díaz, J.M. and Ormerod, S.J. 1999. Comparing discriminant analysis, neural networks and logistic regression for predicting species distribution: a case study with Himalayan river bird. *Ecological Modelling* 120: 337 – 347.
- Márquez L., M. y Álvarez Z., R. 1995. Construcción de una guía de densidad para *Pinus cooperi var. ornelasi* con base en la clase de copa en Durango, México. *Madera y Bosques* 1(2): 23 - 36.
- Matteucci, S. D. y F. Miranda. 1982. Metodología para el estudio de la vegetación. Sria. Gral. De la OEA. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico. 1 – 62 p.

- McCoy, J. and K. Johnston. 2001. Using ArcGIS Spatial Analyst. GIS by ESRI. EE. UU. 230 p.
- McRoberts, R. E., M. D. Nelson and D. G. Wendt. 2002. Stratified estimation of forest area using satellite imagery, inventory data and the k – Nearest Neighbors technique. *Remote Sensing Environment* 82: 457 – 468.
- Mendoza Briseño, M. A. 1993. Conceptos básicos de manejo forestal. UACH, Chapingo, México. Colección de Cuadernos Universitarios. Serie agronomía 9: 118 p.
- Merino, L. y Segura G. 2002. El manejo de los Recursos Forestales en México, 1992 – 2002. Procesos, tendencias y políticas públicas. In: Leff, E., Ezcurra, E., Pizanty, I. y Romero Lankao, P. (Comp.). La transición hacia el desarrollo sustentable. Perspectivas de America Latina y el Caribe. INE, UAM, PNUMA. Mexico. 237 – 256.
- Michael C. W., J. L. Ohmann, K. B. Pierce Jr, M. J. Gregory and J. Fried. 2003. A multivariate approach to mapping forest vegetation and fuel using GIS databases, satellite imagery and forest inventory plots. 2nd International Wildland Fire Ecology and Fire Management Congress, 5th Symposium on Fire and forest Meteorology J4 G. 1.
- Miranda S., M. y A. R. Condal. 2003. Importancia del análisis estadístico exploratorio en el proceso de interpolación espacial: caso de estudio Reserva Forestal Valdivia. *Bosque* 24(2): 29 - 42.
- Muñoz, C., J. Cancino and M. Espinosa. 2005. Analysis of aboveground biomass in a mature stand of *Pinus radiata*. *Bosque (Valdivia)* 26(3): 33 - 44.

- Noda I. and M. Hayashi. 2004. Characteristic differences of non – reforested lands compared with reforested lands in Kumamoto, Kyushu. Bulletin of FFPRI 3 (1 - 390): 29 – 32.
- Nogués B., D. 2003. El estudio de la distribución espacial de la biodiversidad: conceptos y métodos. Cuadernos de Investigación Geográfica 29: 67 – 82.
- Panta, Menaka. 2003. Analysis of forest canopy density and factors affecting it using RS and GIS Techniques. Thesis of Master of Science. International Institute for Geo - information Science and Earth Observation (ITC). Netherlands. 74 p.
- Pérez G., Uriel. 2005. La percepción remota. Universidad de Tolima, LabSIG. España. 34 p.
- Pindyck, R.S. and D. L. Rubinfeld. 1981. Econometric Models and Econometric Forecasts, 2ª ed. McGraw-Hill. U. S. A. 654 p.
- Programa Nacional Forestal 2001 – 2006. SMARNAT – CONAFOR. México. 163 p.
- Rautiainen, M., P. Stenberga, T. Nilsonb and A. Kuusk. 2004. The effect of crown shape on the reflectance of coniferous stands. Remote Sensing of Environment 89: 41 – 52.
- Richards, J. A. and X. Jia. 1999. Remote sensing digital image analysis. 3ª ed. Springer, Hong Kong. 355 p.
- Rivera, P. and Zepeda, E. M. 1990. Principios básicos de regulación forestal. UACH – DICIFO, Chapingo, México. Serie de Apoyo Académico 42: 262 p.

- Romahn de la Vega, C. F., H. Ramírez Maldonado and J. L. Treviño García. 1994. Dendometría. UACH, Chapingo, México. 354 p. (Nueva versión, 2005, en prensa, PDF, 296.)
- Romo Reátegui, M. 2005. Efecto de la luz en el crecimiento de plántulas de *Dipteryx micrantha* Harms “shihuahuaco” trasplantadas a sotobosque, claros y plantaciones. *Ecología Aplicada* 4(1 - 2): 1- 8.
- Rouvinena, S. and T. Kuuluvainenb. 2005. Tree diameter distributions in natural and managed old *Pinus sylvestris* dominated forests. *Forest Ecology and Management* 208: 45–61.
- SAG. 1976. Inventario Forestal del Estado de Chiapas. Secretaría de Agricultura y Ganadería. Subsecretaría Forestal y de Fauna. Dirección General de Inventario Nacional Forestal. 85 p.
- Saldaña, A. and C. H. Lusk. 2003. Influencia de las especies del dosel en la disponibilidad de recursos y regeneración avanzada en un bosque templado lluvioso del sur de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 76: 639 – 650.
- Sampson, D. A., J. M. Vose and H.L. Allen. 2001. A conceptual approach to stand management using leaf area index as the integral of site structure, physiological function and resource supply. *Trees* 447 - 451.
- Sánchez G., A. y L. López. 2003. Clasificación y ordenación de la vegetación del norte de la Sierra Nevada, a lo largo de un gradiente altitudinal. *Anales del Instituto de Biología, UNAM, Serie Botánica* 74 (1): 47 – 71.
- Schreuder, H. T., R. Ernst and H. Ramírez. 2005. Statistical techniques for sampling and monitoring natural resources. U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 154 p.

- Scott, J. M., *et al.* 2001. Predicting species occurrences, issues of accuracy and scale. Island Press, Washington. 868 p.
- Silbernagel, J. and M. Moeur. 2001. Modeling canopy openness and under story gap patterns based on image analysis and mapped tree data. *Forest Ecology and Management* 149: 217 – 233.
- Sivanpillai R, C. T. Smith, R. Srinivasan, M. G. Messina, X. B. Wu. 2006. Estimation of managed loblolly pine stands age and density with Landsat ETM+ data. *Forest Ecology and Management* 223: 247 – 254.
- Sorani V. and R. Álvarez. 1996. Hybrid maps: updating Mexico is forest cartography using Land sat TM imagery and Land use information. *Geocarto International* 11 (4): 17 – 23.
- Sorani V., R. Álvarez y A. Cortés. 1995. El Inventario Forestal Nacional de México: resultados y productos derivados de las base de datos geográfico. Instituto de Geografía UNAM. 229 – 240.
- Sullivan, T. P., D. S. Sullivan and P. Lindgren. 2001. Influence of variable retention harvests on forest ecosystems. I. Diversity of stand structure. *Journal of Applied Ecology* 38: 1221 – 1233.
- Ter Braak, C.J.F. 1998. CANOCO: an extension of DECORANA to analyze species – environment relationships. *Vegetation* 75: 159 – 160.
- Tian, Y., C. E. Woodcock, Y. Wang, J. L. Privette, N. V. Shabanov, L. Zhou, Y. Zhang, W. Buermann, J. Dong, B. Veikkanen, T. Häme, K. Andersson, M. Ozdogan, Y. Knyazikhin, R. B. Myneni. 2002. Multiscale analysis and validation of the MODIS

- LAI product II. Sampling strategy. *Remote Sensing of Environment* (83) 431 – 441.
- 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.
- Tucker, Corey. 2000. Using ArcToolbox. GIS by ESRI. EE. UU. 105 p.
- Valdez L., J. R. y T. B. Lynch. 2000. Ecuaciones para estimar volumen comercial y total en rodales aclareados de *Pino patula* en Puebla, México. *Agrociencia* 34: 747 – 758.
- Valdez L., J. R., M. J. González y H. M. De los Santos P. 2006. Estimación de cobertura arbórea mediante imágenes satelitales multiespectrales de alta resolución. *Agrociencia* 40: 383 – 394.
- Van Eysenrode, D. S., F. Kockelbergh, J. Bogaert, I. Impens and P. Van Hecke. 2002. Canopy gap edge determination and the importance of gap edges for plant diversity. *Web Ecology* 3: 1 – 5.
- Velázquez, A., J. F. Mas, G. Bocco y J. L. Palacio. 2002. Análisis del cambio de uso de suelo, convenio INE – IGg (UNAM). Instituto de Geografía, UNAM. 83 p.
- Vienneau, Aleta. 2001. Using ArcCatalog. GIS by ESRI. EE. UU. 286 p.
- Villavicencio, L. and J. I. Valdez. 2003. Análisis de la estructura arbórea del sistema agroforestal rusticano de café. *Agrociencia* 37(4): 413 - 423.
- Wallerman, J. 2003. Remote sensing aided spatial prediction of forest stem volume. Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences. Sweden. 42 p.

Wang, Q., S. Adiku, J. Tenhunen and A. Granier. 2005. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote Sensing of Environment* 94: 244 – 255.

Young, R. A. 1982. *Introduction of forest science*. Wiley, EE. UU. 203 – 307.

Yrigoyen, Coro. 2003. *Métodos gráficos del análisis exploratorio de datos espaciales*. Instituto L. R. Klein – Dpto., de Economía Aplicada. Universidad Autónoma de Madrid, España. 25 p.

Zeiler, M. 1999. *Modeling our world. GIS by ESRI*. EE. UU. 199 p.

Zurita Milla, R. 2000. *Determinación de variables biofísicas mediante teledetección en el marco de la agricultura de precisión*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes, Universidad de Córdoba. España. 21 p.