



Artículo / Article

Inventario y mapeo de un bosque bajo manejo de pino con datos del sensor SPOT 6

Inventory and mapping of a pine forest under timber management using data obtained with a SPOT 6 sensor

Juan Esteban Torres-Vivar¹, José René Valdez-Lazalde^{1*}, Gregorio Ángeles-Pérez¹, Héctor Manuel de los Santos-Posadas¹ y Carlos Arturo Aguirre-Salado²

Resumen

El objetivo de la investigación fue cuantificar y mapear las variables de densidad forestal, área basal (Ab), biomasa total (Bt), cobertura de copa (Cob), volumen (Vol) e índice de área foliar (IAF) en un bosque de *Pinus patula* bajo manejo maderable. Inicialmente, se identificaron las correlaciones existentes entre los datos espectrales derivados del sensor satelital SPOT 6 y datos de campo del inventario. El análisis incluyó el uso de modelos de regresión lineal múltiple, estimadores de razón y regresión y el enfoque tradicional de inventario (solo con datos de campo), con fines comparativos. Las correlaciones más altas para Ab, Bt, Cob y Vol fueron con la banda del infrarrojo cercano; los valores fueron de 0.74, -0.77, -0.50 y -0.77, respectivamente. Mientras que el IAF presentó la mayor correlación en la banda verde con un valor de -0.65. Los mejores ajustes se lograron para los modelos de regresión que predicen las variables Ab, Bt y Vol; R^2_{adj} de 0.66 para cada una de ellas y valores de raíz del error medio cuadrático (REMC) de 5.82 m² ha⁻¹, 32 Mg ha⁻¹ y 62.3 m³ ha⁻¹ respectivamente. Las estimaciones de inventario se calcularon mediante el método de estimadores de razón y de regresión, y estuvieron dentro de la amplitud del intervalo de confianza del muestreo aleatorio. El estimador de regresión registró valores de precisión: 4.8 % (Ab), 6.7 % (Bt), 5.8 % (Cob), 6.6 % (Vol), 6.9 % (IAF). Este tipo de muestreo resultó el más conservador de todos los realizados.

Palabras clave: Biomasa total, índice de área foliar, inventario forestal, modelación espacial, *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., variables de densidad.

Abstract

The purpose of the present research was to quantify and map the forest density, basal area (BA), total biomass (Bt), crown cover (CC), volume (Vol) and leaf area index (LAI) variables in a *Pinus patula* forest under timber management. Initially, the existing correlations between the spectral data derived from the SPOT-6 satellite sensor and field inventory data were identified. The analysis included the use of multiple linear regression models, ratio and regression estimators, and the traditional inventory approach (with field data only), for comparative purpose. The highest correlations for BA, Bt, CC and Vol were obtained using the near infrared strip; the values were 0.74, -0.77, -0.50 and -0.77, respectively, while the LAI had the highest correlation with the green strip, having a value of -0.65. The best adjustments were obtained for the regression models predicting the BA, Bt and Vol variables, a R^2_{adj} of 0.66 for each variable, and mean square root error (MSRE) values of 5.82 m² ha⁻¹, 32 Mg ha⁻¹ and 62.3 m³ ha⁻¹ respectively. Inventory estimations were undertaken using the ratio and regression estimators' method, being within the range of the confidence interval of the random sampling. The regression estimator registered the following precision values: 4.8 % (BA), 6.7 % (Bt), 5.8 % (CC), 6.6 % (Vol), 6.9 % (LAI). This type of sampling turned out to be the most conservative of all that were carried out.

Key words: Total biomass, leaf area index, forest inventory, spatial modeling, *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., density variables.

Fecha de recepción/ Reception date: 13 de noviembre de 2016; Fecha de aceptación/ Acceptance date: 6 de febrero de 2017.

¹ Posgrado en Ciencias Forestales. Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo, México. Correo-e: valdez@colpos.mx.

² Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México.

* Autor para correspondencia.

Introducción

La valoración y gestión de los recursos forestales requieren de su cuantificación a través de inventarios forestales, los cuales se obtienen mediante la realización de muestreos en campo; que incluye la evaluación de diferentes variables como la densidad del bosque, la altura del arbolado, la cobertura de copa, el área basal y el volumen maderable; a su vez, implican esfuerzo y costos considerables (Hawbaker *et al.*, 2010; Tanaka *et al.*, 2014).

La geomática está conformada por disciplinas como la percepción remota, los sistemas de información geográfica (SIG) y los sistemas satelitales de navegación global (SSNG), las cuales facilitan la captura de datos e información valiosa y oportuna sobre los recursos naturales, y ofrece una alternativa para el levantamiento de inventarios forestales. Con esas tecnologías es posible estimar variables tanto a nivel local (Ortiz-Reyes *et al.*, 2015), como en grandes áreas a diferentes niveles de detalle y en menor tiempo (Merem y Twumasi, 2008; Muñoz-Ruiz *et al.*, 2014).

El avance constante en la informática permite que los sensores remotos, montados en plataformas satelitales o en aviones, capten imágenes a intervalos de tiempo cada vez menores, con mejor resolución espacial y espectral (Ikonos, QuickBird, SPOT 6 y 7, Pléiades), lo cual posibilita la disponibilidad de datos e información oportuna para la planeación y el manejo de los recursos forestales, particularmente, para áreas de difícil acceso (Valdez-Lazalde *et al.*, 2006).

Al respecto, la tecnología asociada a la geomática puede ser empleada para la estimación de los inventarios forestales y para transformar estos resultados visuales (e.g. mapas), para la toma de decisiones en la gestión de los recursos. El objetivo del presente estudio fue mapear el área basal, la biomasa total, el volumen, la cobertura de copa y el índice de área foliar en un bosque de *Pinus patula* bajo manejo forestal, mediante datos espectrales provenientes del sensor SPOT 6 en Zacualtipán, Hidalgo, México; con el fin de comparar el inventario tradicional con el auxiliado por percepción remota.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El área de estudio se localiza en el municipio Zacualtipán de Ángeles, en el estado de Hidalgo, México; entre las coordenadas 20°36'00" y 20°37'40" N y 98°34'44" y 98°36'32" O (Figura 1). Abarca una superficie de 900 ha (3 x 3 km). Su fisiografía comprende parte de la Sierra Alta Hidalguense y del Eje Neovolcánico, subprovincia Carso Huasteco y está constituida por pendientes, mesetas y cañones. El sustrato edáfico corresponde a suelos Acrisol órtico (Ao), Luvisol crómico (Lc)

Introduction

The evaluation and management of forest resources require these to be quantified by means of forest inventories, which are obtained through in-field samplings that include the assessment of certain variables like forest density, tree height, crown cover, basal area, and timber-yielding volume; at the same time, they involve significant effort and costs (Hawbaker *et al.*, 2010; Tanaka *et al.*, 2014).

Geomatics includes disciplines such as remote perception, geographic information systems (GIS), and global navigation satellite systems (GNSS), which facilitate the collection of worthy and timely data and information about the natural resources, providing an alternative to forest inventories. These technologies make it possible to estimate variables both locally (Ortiz-Reyes *et al.*, 2015) and in large areas at various levels of detail and in less time (Merem and Twumasi, 2008; Muñoz-Ruiz *et al.*, 2014).

Constant progress in computer science makes it possible for remote sensors, mounted on satellite platforms or aircrafts, to capture images at ever shorter time intervals, with better spatial and spectral resolution (Ikonos, QuickBird, SPOT 6 and 7, Pléiades), making timely data and information available for the planning and management of forest resources, particularly in areas with a difficult access (Valdez-Lazalde *et al.*, 2006).

In this regard, the technology associated to geomatics can be used to estimate forest inventories and to transform these visual results (e.g. maps) for purposes of decision making in the management of the resources. The objective of the present study was to map the basal area, total biomass, volume, crown cover and leaf area index of a *Pinus patula* forest under timber management, using spectral data from the SPOT-6 sensor in Zacualtipán, Hidalgo, Mexico, in order to compare the traditional inventory with the remote sensing-assisted inventory.

Materials and Methods

Study area

The study area is located in Zacualtipán de Ángeles municipality, in the state of Hidalgo, Mexico, between the coordinates 20°36'00" and 20°37'40" N, and 98°34'44" and 98°36'32" W (Figure 1). It covers a surface area of 900 ha (3 x 3 km). Its physiography includes part of the High Sierra of Hidalgo and the Neovolcanic Axis, in the Carso Huasteco subprovince, and is constituted by slopes, plateaus and canyons. The edaphic substratum consists of Orthic Acrisol (Ao), Chromic Luvisol (Lc), and Haplic phaeozem (Hh). The existing climate is temperate-humid [C(fm)w"b(e)g], with a marked rainy season between June and October. Precipitation is approximately 2 050 mm (INAFED, 2015).

y Feozem háptico (Hh). El clima existente es templado-húmedo [C(fm)w"b(e)g], con una estación marcada de lluvias entre junio y octubre. La precipitación oscila alrededor de 2 050 mm (INAFED, 2015).

In the last decades, the area has been managed using the Silvicultural Development Method (MDS), which gave rise to mono-specific, coetaneous *Pinus patula* stands with various covers and ages ranging from 0 to 31 years. There are also

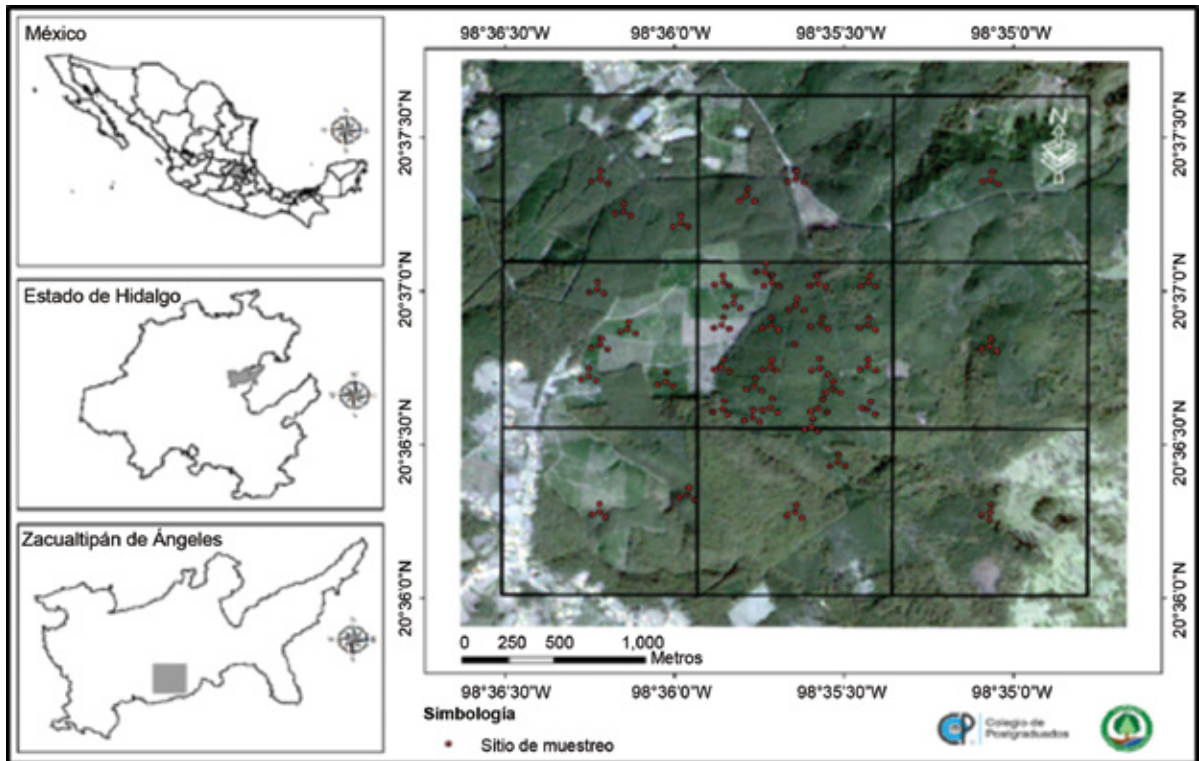


Figura 1. Ubicación del bosque de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. en Zacualtípán de Ángeles, Hidalgo.
Figure 1. Location of the *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. forest in Zacualtípán de Ángeles, Hidalgo.

El área ha sido manejada en las últimas décadas mediante el denominado Método de Desarrollo Silvícola (MDS), que originó rodales de *Pinus patula* mono-específicos, coetáneos, de coberturas y edades variables, que van de 0 hasta 31 años para los diferentes rodales. También existen rodales sin intervención silvícola (naturales) de aproximadamente 80 años de edad. A pesar de que los rodales intervenidos se caracterizan técnicamente como mono-específicos, presentan una proporción mínima de otras especies en una distribución variada: *P. teocote* Schiede ex Schltdl. & Cham., *Prunus serotina* Ehrh., *Quercus laurina* Bonpl., *Q. rugosa* Née, *Q. excelsa* Lieb., *Q. crassifolia* Bonpl., *Q. affinis* Scheidw., *Cornus disciflora* Moc. & Sessé ex DC., *Viburnum* spp., *Cleyera theaoides* (SW.) Choisy, *Alnus jorullensis* Kunth, *Arbutus xalapensis* Kunth, *Symplocos* spp., *Ternstroemia* spp., y *Vaccinium leucanthum* Schltdl., principalmente (Figueroa *et al.*, 2010).

Muestreo en campo

Se utilizó un sistema de muestreo sistemático, bajo un diseño por conglomerados, similar al propuesto por la Comisión Nacional

stands without silvicultural intervention (i.e. natural), aged approximately 80 years. Although the intervened stands are technically characterized as mono-specific, they include a minimal proportion of other species in a varied distribution: primarily *P. teocote* Schiede ex Schltdl. & Cham., *Prunus serotina* Ehrh., *Quercus laurina* Bonpl., *Q. rugosa* Née, *Q. excelsa* Lieb., *Q. crassifolia* Bonpl., *Q. affinis* Scheidw., *Cornus disciflora* Moc. & Sessé ex DC., *Viburnum* spp., *Cleyera theaoides* (SW.) Choisy, *Alnus jorullensis* Kunth, *Arbutus xalapensis* Kunth, *Symplocos* spp., *Ternstroemia* spp. and *Vaccinium leucanthum* Schltdl. (Figueroa *et al.*, 2010).

In-field sampling

A systematic sampling system under a cluster design similar to the one proposed by the National Forestry Commission (Comisión Nacional Forestal) (Conafor, 2011) for the National Forest and Soil Inventory (*Inventario Nacional Forestal y de Suelos*, INFyS) was utilized. Each cluster consists of four 400 m² sites arranged in the shape of an inverted “Y” (Figure 1). The sample comprised 157 sites belonging to the Atopixco Intensive Carbon Monitoring Site, in

Forestal (Conafor, 2011) para el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS). En cada conglomerado hay constituido por cuatro sitios de 400 m², dispuestos en forma de "Y" invertida (Figura 1). La muestra se integró por 157 sitios pertenecientes al Sitio de Monitoreo Intensivo del Carbono-Atopixco, Hidalgo; a los cuales se les da seguimiento por formar parte de La Red Mexicana de Sitios de Monitoreo Intensivo del Carbono (Ángeles-Pérez *et al.*, 2012).

El inventario se realizó en mayo del 2013, en el que se midieron en todos los árboles presentes las variables siguientes: diámetro normal (Dn a 1.30 m sobre el nivel del suelo), altura total del árbol (Ht) y diámetro de copa (Dc).

Estimación de las variables de densidad forestal

Las variables medidas en campo sirvieron como base para estimar, mediante modelos matemáticos el área basal (Ab), la biomasa total (Bt), la cobertura de copa (Cob), el volumen (Vol) y el índice de área foliar (IAF) para árboles individuales. Las estimaciones a nivel árbol se sumaron para obtener los valores por sitio.

El área basal se calculó con la fórmula:

$$Ab = \frac{\pi}{40\,000} * Dn^2$$

Donde:

Ab en m² árbol⁻¹

Dn en cm

π = Constante matemática con valor de 3.1416

La biomasa total y el volumen se determinaron a partir de los modelos ajustados por Cruz (2007) y Soriano-Luna *et al.* (2015) para el área de estudio (Cuadro 1).

the state of Hidalgo. These sites are monitored because they are part of the Mexican Network of Intensive Carbon Monitoring Sites (Ángeles-Pérez *et al.*, 2012).

The inventory was carried out in May, 2013, and measured the following variables in all the trees present: normal diameter (ND at 1.30 m above ground level), total height (Ht) and crown diameter (CD).

Estimation of the forest density variables

The variables measured in field served as a basis to estimate the basal area (BA), total biomass (Bt), crown cover (CC), volume (Vol) and leaf area index (LAI) of individual trees using mathematical models. The estimates at tree level were added up in order to obtain the values per site.

The basal area was calculated using the following formula:

$$Ab = \frac{\pi}{40\,000} * Dn^2$$

Where:

BA in m² tree⁻¹

ND in cm

π = Mathematical constant with a value of 3.1416

The total biomass and volume were determined based on the models adjusted by Cruz (2007) and Soriano-Luna *et al.* (2015) for the study area (Table 1).



Cuadro 1. Modelos para estimar biomasa total (Bt) y Volumen (Vol) en Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo.

Tipo de vegetación	Ecuación de biomasa total y volumen	Fuente
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	Bt=exp(-4.554805)*(Dn ² *Ht) ^{1.047218}	Soriano-Luna <i>et al.</i> (2015)
	Vol=exp(-10.4869)*Dn ^{1.7525} *Ht ^{1.31936}	Soriano-Luna <i>et al.</i> (2015)
Latifoliadas	Bt=exp(-3.109407)*(Dn ² *Ht) ^{0.952688}	Soriano-Luis <i>et al.</i> (2015)
	Vol=0.000082*Dn ^{1.785782} *Ht ^{0.915827}	Cruz (2007)

Bt en kg; Vol en m³; Dn = Diámetro normal en cm; Ht = Altura total en m.



Table 1. Models for estimating the total biomass (Bt) and Volume (Vol) in *Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo*.

Vegetation type	Total biomass and volume equation	Source
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	$Bt = \exp(-4.554805) * (Dn^2 * Ht)^{1.047218}$	Soriano-Luna <i>et al.</i> (2015)
	$Vol = \exp(-10.4869) * Dn^{1.7525} * Ht^{1.31936}$	Soriano-Luna <i>et al.</i> (2015)
Broadleaves	$Bt = \exp(-3.109407) * (Dn^2 * Ht)^{0.952688}$	Soriano-Luis <i>et al.</i> (2015)
	$Vol = 0.000082 * Dn^{1.785782} * Ht^{0.915827}$	Cruz (2007)

Bt in kg; Vol in m³; ND = Normal diameter in cm; Ht = Total height in m.

La cobertura de copa (Cob) se estimó con base en el diámetro de copa promedio (DC), el cual se obtuvo midiendo el diámetro de copa en dos orientaciones (N-S y E-O), con la ecuación:

$$Cob = DC^2 * \frac{\pi}{4}$$

Donde:

Cob en m²
DC en m

El IAF para *P. patula* se estimó mediante el modelo utilizado por Aguirre-Salado *et al.* (2011):

$$IAf = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{AFS}{2} \right) \right)}{A} * Dn^2$$

Donde:

IAF en m² m⁻²
AFS = Área foliar superficial en m²
A = Área del sitio de muestreo (400 m²)
i = i-ésimo árbol del sitio de muestro

El cálculo del AFS requiere de conocer los valores de área foliar específica (AFE) y de biomasa seca foliar (BSF) para cada uno de los árboles que están dentro de los sitios de muestreo (Aguirre-Salado *et al.*, 2011). Para ello, se utilizaron los modelos que se indican en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Modelos utilizados para la estimación del Índice de Área Foliar de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. en Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo.

Variable	Modelo	Fuente
AFS	AFS = AFE * BSF	Aguirre-Salado <i>et al.</i> (2011)
AFE	AFE = 2.64 * (9.5336 - 0.0758 * Dn)	Cano <i>et al.</i> (1996)
BSF	BSF = exp(-4.750974) * (Dn ² * Ht) ^{0.709796}	Soriano-Luna <i>et al.</i> (2015)

AFS = Área foliar superficial en m²; AFE = Área foliar específica en m² kg⁻¹; BSF = Biomasa seca foliar en kg; Dn = Diámetro normal en cm; Ht = Altura total en m.

The crown cover (CC) was estimated based on the average crown diameter (CD), which in turn was calculated by measuring the crown diameter in two directions (N-S and E-W), with the equation:

$$Cob = DC^2 * \frac{\pi}{4}$$

Where:

CC in m²
CD in m

The LAI for *P. patula* was estimated with the model used by Aguirre-Salado *et al.* (2011):

$$IAf = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{AFS}{2} \right) \right)}{A} * Dn^2$$

Where:

LAI in m² m⁻²
LSA = Leaf surface area in m²
A = Sampling site surface area (400 m²)
i = ith tree of the sampling site

The calculation of the LSA requires knowing the values of the specific leaf area (SLA) and the dry leaf biomass (DLB) of each of the trees within the sampling site (Aguirre-Salado *et al.*, 2011). The models shown in Table 2 were used for this purpose.



Table 2. Models used to estimate the Leaf Area Index of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. in *Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo*.

Variable	Model	Source
LSA	AFS=AFE*BSF	Aguirre-Salado <i>et al.</i> (2011)
SLA	AFE=2.64*(9.5336-0.0758*Dn)	Cano <i>et al.</i> (1996)
DLB	BSF=exp(-4.750974)*(Dn ² *Ht) ^{0.709796}	Soriano-Luna <i>et al.</i> (2015)

LSA = Leaf surface area in m²; SLA = Specific leaf area in m² kg⁻¹; DLB = Dry leaf biomass in kg; ND = Normal diameter in cm; Ht = Total height in m.

Preprocesamiento de la imagen SPOT 6

La imagen SPOT 6 se capturó en enero de 2014, ya que las malas condiciones atmosféricas impidieron tener una fecha más cercana al periodo del muestreo en campo. A pesar del desfase temporal entre los datos de campo y los espectrales, el análisis es adecuado dado que este es corto, si se considera la tasa de crecimiento de una masa forestal; además de, que la intención fue estimar el inventario a la fecha de la toma de datos en campo; es decir, mayo de 2013.

La imagen SPOT 6 cuenta con una resolución espacial de 6 m en multiespectral, y un proceso *Standard Ortho*, el cual consiste en una orto rectificación mediante un modelo digital de elevación (MDE) y corrección radiométrica de 12 bits, con el método del vecino más cercano (Astrium, 2013).

Los datos espectrales (números digitales) se convirtieron a valores de radiancia y, a su vez, a valores de reflectancia. Para ello se utilizó el paquete *ArcMap* versión 10.2®, con las siguientes fórmulas (Astrium, 2013):

$$L_b(p) = \frac{DC(p)}{GAIN(b)} + BIAS(b)$$

$$P_b(p) = \frac{\pi * L_b(p)}{E_0(b) * Cos(\theta_s)}$$

Donde:

- $L_b(p)$ = Radiancia al tope de la atmósfera (w sr⁻¹ m² μm⁻¹)
- $DC(p)$ = Número digital
- $GAIN(b)$ = Coeficiente de calibración de la ganancia de cada banda
- $BIAS(b)$ = Factor multiplicativo de la banda
- $P_b(p)$ = Reflectancia exoatmosférica adimensional
- π = Valor del número pi (3.1416)
- $E_0(b)$ = Radiancia exoatmosférica solar media de cada banda
- $Cos(\theta_s)$ = Coseno del ángulo cenital solar de la escena (90° - θs)

Los valores de los parámetros se obtuvieron de los metadatos de la imagen SPOT 6.

Preprocessing of the SPOT-6 image

The SPOT-6 image was captured in January, 2014, because the poor atmospheric conditions made it impossible to capture them on a nearer date to the in-field sampling period. Although there is a time lag between the field data and the spectral data, the analysis is adequate because this lag is short, considering the growth rate of the forest mass; besides, the intention was to estimate the inventory as of the date of the in-field data collection, i.e. May, 2013.

The SPOT-6 image has a spatial resolution of 6 m in multispectral mode, and a *Standard Ortho* process, which consists in an ortho-rectification using a digital elevation model (DEM), and a 12-bit radiometric correction using the nearest neighbor method (Astrium, 2013).

The spectral data (digital numbers) were converted to irradiance values and, in turn, to reflectance values. The *ArcMap*™ version 10.2 package was used for this purpose, with the following formulas (Astrium, 2013):

$$L_b(p) = \frac{DC(p)}{GAIN(b)} + BIAS(b)$$

$$P_b(p) = \frac{\pi * L_b(p)}{E_0(b) * Cos(\theta_s)}$$

Where:

- $L_b(p)$ = Irradiance at the top of the atmosphere (w sr⁻¹ m² μm⁻¹)
- $DC(p)$ = Digital number
- $GAIN(b)$ = Gain calibration coefficient of each band
- $BIAS(b)$ = Multiplicative factor of the band
- $P_b(p)$ = Adimensional exoatmospheric reflectance
- π = Value of number pi (3.1416)
- $E_0(b)$ = Mean solar exoatmospheric irradiance of each band
- $Cos(\theta_s)$ = Cosine of the solar zenith angle of the scene (90° - θs)

The values of the parameters were obtained from the metadata of the SPOT-6 image.



Obtención de variables espectrales

Las variables espectrales utilizadas fueron las cuatro bandas de la imagen SPOT 6: azul (A), verde (V), roja (R) e infrarrojo cercano (NIR) (Astrium, 2013). Adicionalmente, se calculó el índice de vegetación de diferencias normalizadas; debido a que este presenta alta correlación con la cobertura de la vegetación (Aguirre-Salado *et al.*, 2011).

$$(NDVI) = \frac{NIR-R}{NIR+R}$$

Estas variables fueron extraídas como el promedio de la reflectancia correspondiente a cada uno de los sitios de muestreo (400 m²) establecidos en campo, mediante el comando *Zonal Statistics as Table* del programa ArcMap versión 10.2®.

Análisis estadístico

En principio, los datos de campo a nivel sitio se transformaron calculando la raíz cuadrada de su valor original, con el fin de minimizar la varianza y obtener una distribución normal. Posteriormente, se estimó el coeficiente de correlación de Pearson implementado en SAS 9.0®, para identificar las variables espectrales correlacionadas con las de campo.

A continuación se aplicó el método de regresión por pasos (*STEPWISE*) para identificar los modelos de regresión lineal múltiple adecuados para estimar, a nivel sitio, el área basal, la biomasa total, la cobertura de copa, el volumen y el índice de área foliar. La estructura de los modelos fue la siguiente:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \epsilon_i$$

Donde:

- Y = Variable de interés
- X_n = Variables espectrales con valores de reflectancia
- β_n = Parámetros de regresión
- ε_i = Error

Los indicadores de bondad de ajuste considerados para seleccionar los mejores modelos fueron el coeficiente de determinación ajustado (R²_{adj}), la Raíz del Error Medio Cuadrático (REMC) y un valor de probabilidad de rechazo (p) menor a 0.05 para cada uno de los parámetros de regresión.

El inventario tradicional de las variables Ab, Bt, Cob, Vol e IAF se realizó considerando dos tipos de muestreo: simple aleatorio y estratificado (Scheaffer *et al.*, 1986); de ellos, el que arrojó la mejor precisión fue utilizado como punto de comparación para las estimaciones con datos espectrales del sensor SPOT 6.

Estimation of the spectral variables

The spectral variables used were the four bands of the SPOT-6 image: blue (B), green (G), red (R) and near infrared (NIR) (Astrium, 2013). In addition, the normalized differences vegetation index was calculated, because it has a high correlation with the vegetation cover (Aguirre-Salado *et al.*, 2011).

$$(NDVI) = \frac{NIR-R}{NIR+R}$$

These variables were extracted as the average reflectance of each of the sampling sites (400 m²) established in field, using the *Zonal Statistics as Table* command of the ArcMap™ version 10.2 software.

Statistical analysis

In principle, the field data at site level were transformed by calculating the square root of their original value in order to minimize the variance and obtain a normal distribution. Pearson's correlation coefficient implemented in the SAS 9.0™ software was subsequently estimated in order to identify the spectral variables correlated with the field variables.

The stepwise regression method was then applied to identify the adequate multiple linear regression models for estimating the basal area, total biomass, crown cover, volume and leaf area index at site level. The structure of the models was as follows:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \epsilon_i$$

Where:

- Y = Variable of interest
- X_n = Spectral variables with reflectance values
- β_n = Regression parameters
- ε_i = Error

The goodness-of-fit indicators considered for the selection of the best models were the adjusted determination coefficient (R²_{adj}), the Mean Square Root Error (MSRE) and a rejection probability value (p) below 0.05 for each of the regression parameters.

The traditional inventory of the BA, Bt, CC, Vol and LAI variables was carried out with two types of sampling: simple random and stratified (Scheaffer *et al.*, 1986); of these, the one that yielded the most accurate values was used as a point of comparison for the estimations based on spectral data of the SPOT-6 sensor.

The criterion for the selection of the best traditional inventory vs. the remote sensing inventory was the precision attained in the estimations, while the criterion within the remote-sensing inventories was the Mean Square Root Error (MSRE).

El criterio para la selección del mejor inventario tradicional vs. inventario con percepción remota fue la precisión lograda en las estimaciones, mientras que el criterio dentro de los inventarios con percepción remota fue la menor Raíz del Error Medio Cuadrático (REMC).

Dada la alta correlación que suele existir entre las variables de campo con algunas variables espectrales (Aguirre-Salado *et al.*, 2009; Muñoz-Ruiz *et al.*, 2014), los datos registrados en las imágenes SPOT ó sirvieron como base para estimar, mediante interpolación, los valores de las variables para toda el área de estudio, a nivel de pixel, a través de estimadores de razón y de regresión (Scheaffer *et al.*, 1986; Valdez-Lazalde *et al.*, 2006).

Los mejores modelos de regresión ajustados se usaron para generar mapas temáticos de las variables de interés (Ab, Bt, Cob, Vol e IAF), mediante algebra de mapas en ArcMap versión 10.2®.

Resultados y Discusión

Relación entre variables de campo y variables espectrales

La correlación de las variables de campo y las variables espectrales fue negativa; es decir, a mayor valor de la variable de campo el de la variable espectral es menor (Cuadro 3). Las correlaciones oscilan entre -0.36 y -0.77, destaca la Cob como la única variable de campo que presentó correlaciones menores o iguales a -0.50.

Cuadro 3. Matriz de correlación de las variables de campo vs. variables espectrales.

Variable Espectral	Variable de Campo				
	Ab (m ² ha ⁻¹)	Bt (Mg ha ⁻¹)	Cob (% ha ⁻¹)	Vol (m ³ ha ⁻¹)	IAF (m ² m ⁻²)
A	-0.64	-0.52	-0.44	-0.54	-0.61
V	-0.70	-0.64	-0.48	-0.66	-0.65
R	-0.55	-0.42	-0.36	-0.44	-0.56
NIR	-0.74	-0.77	-0.50	-0.77	-0.63
NDVI	-0.64	-0.71	-0.47	-0.70	-0.54

Ab = Área basal; Bt = Biomasa total; Cob = Cobertura de copa; Vol = Volumen; IAF = Índice de área foliar; A = Banda azul; V = Banda verde; R = Banda roja; NIR = Banda del infrarrojo cercano; NDVI = Índice de vegetación de diferencia normalizada.

Todas las correlaciones fueron altamente significativas (0.001).

La variable espectral con más alta correlación con las de campo fue la banda del NIR (Cuadro 3); por ello, fue considerada para formar parte de los modelos de regresión lineal múltiple. En general, el comportamiento de la banda

Given the high correlation that usually exists between the field variables and certain spectral variables (Aguirre-Salado *et al.*, 2009; Muñoz-Ruiz *et al.*, 2014), the data registered in the SPOT-6 served as a base to estimate, through interpolation, the values of the variables for the whole study area at pixel level, by means of ratio and regression estimators (Scheaffer *et al.*, 1986; Valdez-Lazalde *et al.*, 2006).

The best adjusted regression models were utilized to generate thematic maps of the variables of interest (BA, Bt, CC, Vol and LAI) with map algebra, using the ArcMap™ version 10.2 software.

Results and Discussion

Relationship between field and spectral variables

The correlation of the field variables and the spectral variables was negative; that is, the higher the value of the field variable, the lower the value of the spectral variable (Table 3). The correlations range between -0.36 and -0.77, and the CC stands out as the only field variable having correlations below or equal to -0.50.

Table 3. Correlation matrix of the field variables vs. spectral variables.

Spectral variable	Field variable				
	BA (m ² ha ⁻¹)	Bt (Mg ha ⁻¹)	CC (% ha ⁻¹)	Vol (m ³ ha ⁻¹)	LAI (m ² m ⁻²)
B	-0.64	-0.52	-0.44	-0.54	-0.61
G	-0.70	-0.64	-0.48	-0.66	-0.65
R	-0.55	-0.42	-0.36	-0.44	-0.56
NIR	-0.74	-0.77	-0.50	-0.77	-0.63
NDVI	-0.64	-0.71	-0.47	-0.70	-0.54

BA = Basal area; Bt = Total biomass; CC = Crown cover; Vol = Volume; LAI = Leaf area index; B = Blue band; G = Green band; R = Red band; NIR = Near infrared band; NDVI = Normalized difference vegetation index.

All the correlations were highly significant (0.001).



NIR consistió en que los valores altos de reflectancia se presentaron en áreas con vegetación densa y vigorosa. Valores bajos correspondieron a las áreas de condiciones de vegetación contrarias a la arriba descrita (poca vegetación o vegetación no vigorosa); además de, cuerpos de agua donde la reflectancia es absorbida por estos, o en zonas con alto contenido de humedad (Chuvienco, 1995). Las correlaciones más altas para Ab, Bt, Cob y Vol fueron con la banda NIR, con valores de -0.74, -0.77, -0.50 y -0.77, respectivamente; mientras que el IAF presentó la mayor correlación en la banda V, con un valor de -0.65.

Este tipo de tendencias negativas son similares a las citadas por Aguirre-Salado *et al.* (2011) para un bosque de *P. patula* bajo manejo, ubicado en un área aledaña a la que cubre el presente estudio. Dichos autores indican una correlación entre la banda NIR y el IAF de -0.92 y de -0.93 para Cob, mientras la banda V presenta una correlación de -0.40 y -0.39 en IAF y Cob, respectivamente.

La baja correlación registrada en la investigación que se documenta es debido a dos situaciones existentes en los sitios de muestreo: 1) no se consideraron sitios con suelo desnudo, con la finalidad de proporcionar al modelo tantas observaciones con tendencia a cero (Aguirre-Salado *et al.*, 2011); y 2) la alta diversidad de especies que tienen los sitios, ya que la banda NIR capta la estructura de las células y la humedad (Jensen, 2007).

Otro caso es el consignado por Muñoz-Ruiz *et al.* (2014) para los bosques templados del estado de Hidalgo, cuya banda V tuvo correlaciones de -0.43 con Ab, -0.31 con Cob y -0.47 con Vol; mientras que, la correlación de la banda NIR fue muy baja 0.03 con Ab, 0.15 con Cob y 0.03 con Vol. Y en los bosques mesófilos, para la banda V se tuvieron registros de -0.46 en Ab, 0.08 en Cob y -0.44 en Vol; y en la banda NIR -0.36 en Ab, 0.04 en Cob y -0.33 en Vol.

Estimaciones de variables mediante modelos de regresión

Dada la alta correlación de la banda NIR con las variables de campo, esta se consideró como variable independiente, para ajustar modelos de regresión lineal múltiple. Los mejores ajustes se lograron para los modelos que predicen las variables Ab, Bt y Vol con una R^2_{adj} de 0.66, cada una de ellas; y con un REMC de $5.82 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, 32 Mg ha^{-1} y $62.3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, respectivamente. La Cob presentó el ajuste más bajo con una R^2_{adj} de 0.27 y un REMC de 35.03 %. En el caso del IAF se obtuvo una R^2_{adj} de 0.51 y un REMC de $2.07 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (Cuadro 4).

The spectral variable that had the highest correlation with the field variables was the NIR band (Table 3); its incorporation into the multiple linear regression models was therefore considered. In general, the behavior of the NIR band consisted in showing high reflectance values for those areas with dense, vigorous vegetation. Low values corresponded to the opposite vegetation conditions (i.e. sparse or weak vegetation), as well as to water bodies, which absorb the reflectance, or areas with a high moisture content (Chuvienco, 1995). The highest correlations for BA, Bt, CC and Vol were obtained with the NIR band, the values being -0.74, -0.77, -0.50 and -0.77, respectively, while the highest correlation for LAI occurred in the G band, with a value of -0.65.

These negative tendencies are similar to those cited by Aguirre-Salado *et al.* (2011) for a *P. patula* forest under timber management, located in the vicinity of the area covered by the present study. These authors indicate a correlation of -0.92 and -0.93 for CC between the NIR band and the LAI, while the G band has a correlation of -0.40 and -0.39 for LAI and CC, respectively.

The low correlation recorded in the research that is documented is due to two situations at the sampling sites: 1) sites with bare soil were not considered, in order to provide the model with as many observations with zero tendency (Aguirre-Salado *et al.*, 2011); and 2) the high diversity of species that have the sites, since the NIR band captures the structure of the cells and the moisture (Jensen, 2007).

A different case was registered by Muñoz-Ruiz *et al.* (2014) in the temperate forests of the state of Hidalgo, where the G band had correlations of -0.43 for BA, -0.31 for CC and -0.47 for Vol, while the correlation with the NIR band was very low, with 0.03 for BA, 0.15 for CC and 0.03 for Vol. In the mesophile forests, the G band showed values of -0.46 for BA, 0.08 for CC and -0.44 for Vol, and the NIR band exhibited values of -0.36 for BA, 0.04 for CC and -0.33 for Vol.

Estimations of variables using regression models

Given the high correlation of the NIR band with the field variables, this was considered as an independent variable for purposes of adjusting multiple linear regression models. The best adjustments were attained for the models predicting the BA, Bt and Vol variables with a R^2_{adj} of 0.66 for each variable and a MSRE of $5.82 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, 32 Mg ha^{-1} and $62.3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, respectively. The CC had the lowest adjustment, with a R^2_{adj} of 0.27 and a MSRE of 35.03 %. A R^2_{adj} of 0.51 and a MSRE of $2.07 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ were obtained for the LAI (Table 4).



Cuadro 4. Modelos de regresión lineal múltiple para las variables de campo (VC), en Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo.

VC	R ² _{adj}	REMC	Estructura del modelo (Valor de los parámetros)
Ab	0.66	5.82	Ab = A ₀ +A ₁ *NIR+A ₂ *NDVI+A ₃ *A+A ₄ *R (A ₀ = -0.606, A ₁ = -15.533, A ₂ = 3.483, A ₃ = -30.917, A ₄ = 55.104)
Bt	0.66	32	Bt = A ₀ +A ₁ *NIR+A ₂ *NDVI+A ₃ *R+A ₄ *A (A ₀ = -5.173, A ₁ = -41.816, A ₂ = 7.715, A ₃ = 207.015, A ₄ = -74.645)
Cob	0.27	35.03	Cob = A ₀ +A ₁ *NIR+A ₂ *A (A ₀ = 16.978, A ₁ = -30.519, A ₂ = -112.236)
Vol	0.66	62.3	Vol = A ₀ +A ₁ *NIR+A ₂ *NDVI+A ₃ *R+A ₄ *A (A ₀ = -5.118, A ₁ = -60.095, A ₂ = 11.598, A ₃ = 241.120, A ₄ = -88.301)
IAF	0.51	2.07	IAF = A ₀ +A ₁ *NIR+A ₂ *NDVI (A ₀ = 3.020, A ₁ = -39.234, A ₂ = 9.712)

Ab = Área basal; Bt = Biomasa total; Cob = Cobertura de copa; Vol = Volumen; IAF = Índice de área foliar; A = Banda azul; R = Banda roja; NIR = Banda del infrarrojo cercano; NDVI = Índice de vegetación de diferencia normalizada; REMC = Raíz del error cuadrático medio; A₀, A₁, A₂, A₃, A₄ = Parámetros del modelo. Todos los parámetros fueron significativos (0.05).

Table 4. Multiple linear regression models for the field variables (FV), in Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo.

FV	R ² _{adj}	MSRE	Structure of the model (Value of the parameters)
BA	0.66	5.82	BA = A ₀ +A ₁ *NIR+A ₂ *NDVI+A ₃ *B+A ₄ *R (A ₀ = -0.606, A ₁ = -15.533, A ₂ = 3.483, A ₃ = -30.917, A ₄ = 55.104)
Bt	0.66	32	Bt = A ₀ +A ₁ *NIR+A ₂ *NDVI+A ₃ *R+A ₄ *B (A ₀ = -5.173, A ₁ = -41.816, A ₂ = 7.715, A ₃ = 207.015, A ₄ = -74.645)
CC	0.27	35.03	CC = A ₀ +A ₁ *NIR+A ₂ *B (A ₀ = 16.978, A ₁ = -30.519, A ₂ = -112.236)
Vol	0.66	62.3	Vol = A ₀ +A ₁ *NIR+A ₂ *NDVI+A ₃ *R+A ₄ *B (A ₀ = -5.118, A ₁ = -60.095, A ₂ = 11.598, A ₃ = 241.120, A ₄ = -88.301)
LAI	0.51	2.07	LAI = A ₀ +A ₁ *NIR+A ₂ *NDVI (A ₀ = 3.020, A ₁ = -39.234, A ₂ = 9.712)

BA = Basal area; Bt = Total biomass; CC = Crown cover; Vol = Volume; LAI = Leaf area index; B = Blue band; R = Red band; NIR = Near infrared band; NDVI = Normalized difference vegetation index; MSRE = Mean Square Root Error; A₀, A₁, A₂, A₃, A₄ = Parameters of the model. All the parameters were significant (0.05).



Cruz-Leyva *et al.* (2010) ajustaron modelos de regresión para predecir variables similares en bosques de *P. patula* y *P. teocote* bajo manejo, en en Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, a partir de datos del sensor SPOT 5; con buenos ajustes para predecir Ab ($R^2_{adj} = 0.96$). Lo anterior se explica debido a que en el modelo se incorporaron las variables cartográficas de altitud (msnm) y temperatura media anual, las cuales presentaron buena correlación con las variables espectrales. Velasco *et al.* (2010) estimaron el IAF en bosques de *Abies religiosa* en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca en Michoacán, con datos espectrales del sensor SPOT 4, su ajuste resultó menor ($R^2_{adj} = 0.61$ y un REMC = 0.493). Aguirre-Salado *et al.* (2011) citan modelos de regresión lineal para predecir IAF y Cob con datos de SPOT 5 HRG, en una superficie más pequeña pero aledaña al área de estudio, con buenos ajustes, aunque únicamente usaron la banda R: $R^2_{adj} = 0.92$ en IAF y $R^2_{adj} = 0.93$ en Cob.

A excepción del modelo para Cob, el resto de los modelos de regresión lineal múltiple, seleccionados mediante *STEPWISE*, presentaron un ajuste gráfico aceptable. Al graficar los valores observados vs. los predichos se observa una tendencia creciente; es decir, a mayor valor de los datos observados en campo, el de los predichos mediante percepción remota también es superior (Figura 2).

Cruz-Leyva *et al.* (2010) adjusted regression models to predict similar variables in *P. patula* and *P. teocote* forests under timber management, in Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, based on data of the SPOT-5 sensor, with good adjustments to produce the BA ($R^2_{adj} = 0.96$). This is because the cartographic variables of altitude (masl) and mean annual temperature had a good correlation with the spectral variables. Velasco *et al.* (2010) estimated the LAI in *Abies religiosa* forests of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve in Michoacán using spectral data of the SPOT-4 sensor; its adjustment turned out to be lower ($R^2_{adj} = 0.61$, with a MSRE = 0.493). Aguirre-Salado *et al.* (2011) used linear regression models to predict LAI and CC based on SPOT-5 HRG data, in a smaller surface area near the study area, with good adjustments although they only utilized the R band: $R^2_{adj} = 0.92$ for LAI and $R^2_{adj} = 0.93$ for CC.

Except for the model utilized for the CC, the rest of the multiple linear regression models, selected using *STEPWISE*, had an acceptable graphic adjustment. When charting the observed values vs. the predicted values, a rising tendency is observed, i.e. the higher the value of the data observed in field, the higher the value of the data predicted through remote sensing (Figure 2).

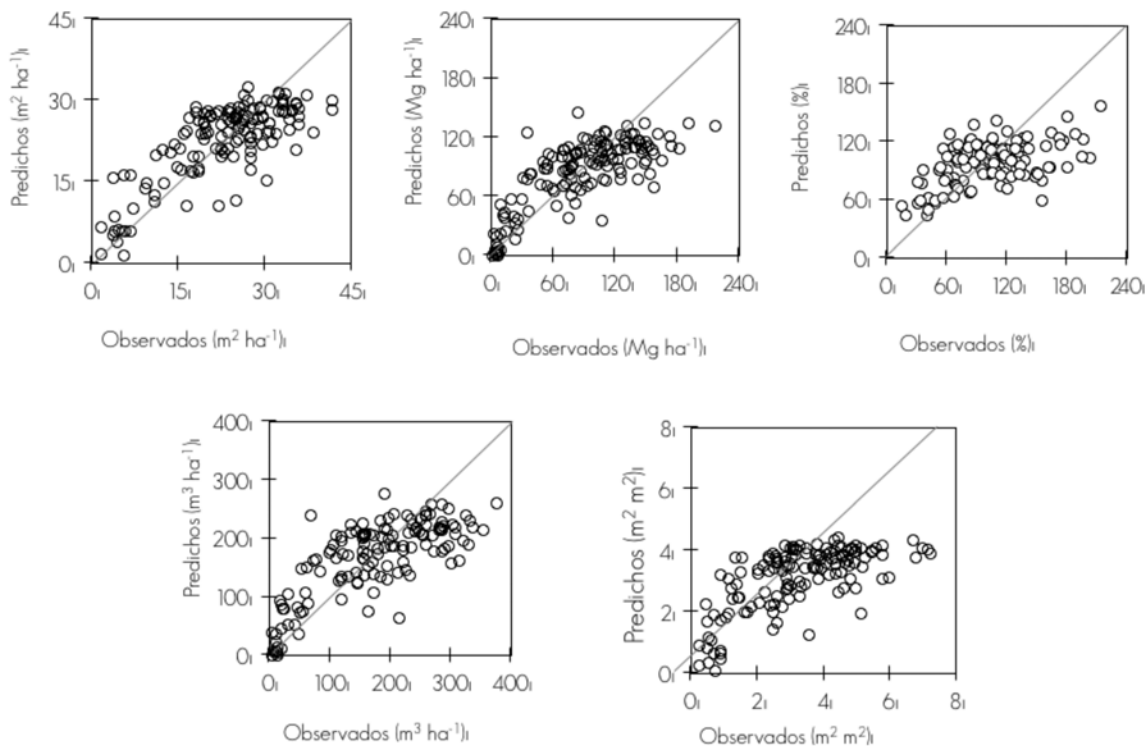


Figura 2. Diagrama de dispersión de observados vs predichos de area basal (Ab), biomasa total (Bt), cobertura de copa (Cob), volumen (Vol) e índice de area foliar (IAF).

Figure 2 Dispersion chart of observed vs. predicted data for the basal area (BA), total biomass (Bt), crown cover (CC), volume (Vol) and leaf area index (LAI).

La REMC que registraron los modelos de regresión lineal múltiple fueron de 5.82 m² ha⁻¹ en Ab, 32 Mg ha⁻¹ en Bt, 35.03 % en Cob, 62.30 m³ ha⁻¹ en Vol y 2.07 m² m⁻² en el IAF (Cuadro 4). Similares a los consignados por Aguirre-Salado *et al.* (2009), de 4.2 m² ha⁻¹ en Ab y 57.71 m³ ha⁻¹ en Vol con modelos de regresión lineal múltiple para *P. patula* en Hidalgo. Velasco *et al.* (2010) señalan un error de 0.493 m² m⁻² para IAF con regresiones múltiples en bosques de oyamel en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca en Michoacán. Aguirre-Salado *et al.* (2011) indican errores de 0.50 m² m⁻² en IAF y 5.71 % Cob, con modelos de regresión lineal simple para bosques de *P. patula* bajo manejo en Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo. Los valores de REMC con modelos de regresión lineal múltiple obtenidos por Muñoz-Ruiz *et al.* (2014) fueron de 6.70 m² ha⁻¹ en Ab, 41.45 m³ ha⁻¹ en Vol y 29.69 % en Cob, para los bosques templados y 8.5 m² ha⁻¹ en Ab, 29 % en Cob y 79.14 m³ ha⁻¹ en Vol para los bosques mesófilos del estado de Hidalgo.

The MSREs registered by the multiple linear regression models were 5.82 m² ha⁻¹ for BA, 32 Mg ha⁻¹ for Bt, 35.03 % for CC, 62.30 m³ ha⁻¹ for Vol and 2.07 m² m⁻² for LAI (Table 4); these values are similar to those recorded by Aguirre-Salado *et al.* (2009) --4.2 m² ha⁻¹ for BA and 57.71 m³ ha⁻¹ for Vol--, obtained with multiple linear regression models for *P. patula* in Hidalgo. Velasco *et al.* (2010) point out an error of 0.493 m² m⁻² in the LAI using multiple regression models for sacred fir forests of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve in Michoacán. Aguirre-Salado *et al.* (2011) indicate errors of 0.50 m² m⁻² for LAI and of 5.71 % for CC, using simple linear regression models for *P. patula* forests under timber management in Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo. The MSRE values obtained by Muñoz-Ruiz *et al.* (2014) with multiple linear regression models were 6.70 m² ha⁻¹ for BA, 41.45 m³ ha⁻¹ for Vol and 29.69 % for CC in temperate forests, and 8.5 m² ha⁻¹ for BA, 29 % for CC and 79.14 m³ ha⁻¹ for Vol in mesophile forests of the state of Hidalgo.

Estimación del inventario tradicional

El sistema de muestro simple aleatorio tuvo mayor precisión (error menor al 10 %), en las estimaciones de las variables dasométricas, obteniendo inventarios totales de 21 022.65 m² en Ab; 80 430.49 Mg en Bt; 102.28 % en promedio de Cob; 156 932.22 m³ en Vol; y 3.24 m² m⁻² en IAF (Cuadro 5).

Estimation of the traditional inventory

The simple random sampling system showed more precision (error below 10 %) in the estimations of the dasometric variables, obtaining total inventories of 21 022.65 m² for BA; 80 430.49 Mg for Bt; an average of 102.28 % for CC; 156 932.22 m³ for Vol; and 3.24 m² m⁻² for LAI (Table 5).

Cuadro 5. Estimaciones del inventario total para el bosque de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. bajo manejo en Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, mediante diferentes estrategias de análisis.

Variables dasométricas	MSA	ME	MERaz	MEReg
IC ± 95	1 404.59	2 525.29	1 929.44	985.98
Ab (m ²)	21 022.65	21 194.43	21 022.65	20 525.25
Precisión	6.68 %	11.91 %	9.18 %	4.80 %
IC ± 95	7 478.09	14 330.99	7 591.59	5 214.13
Bt (Mg)	80 430.49	89 563.61	80 430.49	77 764.82
Precisión	9.30 %	16.00 %	9.44 %	6.70 %
IC ± 95	6.65	16.77	6.89	5.83
Cob (%)	102.28	116.80	102.28	100.71
Precisión	6.50 %	14.35 %	6.73 %	5.79 %
IC ± 95	14 490.75	20 106.87	14 714.81	10 049.99
Vol (m ³)	156 932.22	156 579.84	156 932.22	151 740.36
Precisión	9.23 %	12.84 %	9.38 %	6.62 %
IC ± 95	0.27	0.25	0.27	0.22
IAF (m ² m ⁻²)	3.24	2.60	3.24	3.16
Precisión	8.32 %	9.63 %	8.49 %	6.90 %

MSA = Muestreo simple aleatorio; ME = Muestreo estratificado; MERaz = Muestreo con el estimador de razón; MEReg = Muestreo con el estimador de regresión; IC+ = Intervalo de confianza superior; IC- = Intervalo de confianza inferior.

Table 5. Total inventory estimations for the *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. forest under timber management in *Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo*, using different analysis strategies.

Dasometric variables	SRS	SS	SRatE	SRegE
CI ± 95	1 404.59	2 525.29	1 929.44	985.98
BA (m ²)	21 022.65	21 194.43	21 022.65	20 525.25
Precision	6.68 %	11.91 %	9.18 %	4.80 %
CI ± 95	7 478.09	14 330.99	7 591.59	5 214.13
Bt (Mg)	80 430.49	89 563.61	80 430.49	77 764.82
Precision	9.30 %	16.00 %	9.44 %	6.70 %
CI ± 95	6.65	16.77	6.89	5.83
CC (%)	102.28	116.80	102.28	100.71
Precision	6.50 %	14.35 %	6.73 %	5.79 %
CI ± 95	14 490.75	20 106.87	14 714.81	10 049.99
Vol (m ³)	156 932.22	156 579.84	156 932.22	151 740.36
Precision	9.23 %	12.84 %	9.38 %	6.62 %
CI ± 95	0.27	0.25	0.27	0.22
LAI (m ² m ⁻²)	3.24	2.60	3.24	3.16
Precision	8.32 %	9.63 %	8.49 %	6.90 %

SRS =Simple random sampling; SS =Stratified sampling; SRatE = Sampling with ratio estimator; SRegE =Sampling with regression estimator; CI+ =Upper confidence interval; CI- =Lower confidence interval.

Estos resultados son similares a los de Ortiz-Reyes *et al.* (2015) para la misma zona de estudio, pero calculados a partir de datos LiDAR. Dichos autores estimaron 20 787.40 m² de Ab; 104 037.86 Mg de Bt; 131.54 % de Cob promedio; y 163 436.48 m³ de Vol en una superficie de 913 ha. Para un área aledaña Aguirre-Salado *et al.* (2011) registraron un valor promedio de 80 % de Cob y 6 m² m⁻² de IAF en bosques maduros (20 - 24 años) de *P. patula*.

Las diferencias en las estimaciones de Cob y IAF descritas en los párrafos anteriores se deben, parcialmente, a las intervenciones silvícolas (cosechas totales o parciales en intensidades diferentes) que constantemente ocurren en el bosque sujeto de estudio. Además, es importante mencionar que las estimaciones de Bt y Vol se realizaron con modelos de regresión actualizados al 2015 para el área de trabajo.

Estimación del inventario total mediante los estimadores de razón y regresión

La mejor precisión en las estimaciones del inventario total para las variables de interés, se logró mediante la estrategia de análisis denominada estimador de regresión, la cual incorpora variables auxiliares espectrales conocidas en toda el área de estudio; es decir, toma en cuenta la variación existente en campo. Esta precisión es considerablemente mayor que la lograda con el inventario tradicional (Cuadro 5).

These results are similar to those obtained by Ortiz-Reyes *et al.* (2015) for the same study area, but they were calculated based on LiDAR data. These authors estimated 20 787.40 m² for BA; 104 037.86 Mg for Bt; an average of 131.54 % for CC, and 163 436.48 m³ for Vol in a surface area of 913 ha. For a neighboring area, Aguirre-Salado *et al.* (2011) registered an average value of 80 % for CC and of 6 m² m⁻² for LAI in mature *P. patula* forests (aged 20 - 24 years).

The differences in the estimations of CC and LAI described above are partially due to the constantly occurring forestry interventions (total or partial harvesting of different intensities) in the forest that was the subject of this study. Furthermore, it should be mentioned that the estimations of Bt and Vol were carried out using regression models updated as of 2015 for the work area.

Estimation of the total inventory using ratio and regression estimators

The best precision in the estimates of the total inventory for the variables of interest was obtained using the analysis strategy known as regression estimator, which incorporates auxiliary spectral variables known across the study area; i.e. it takes into account the existing in-field variation. The precision attained in this manner is considerably greater than the one resulting from the use of the traditional inventory method (Table 5).

Análisis comparativo de métodos de la estimación del inventario

Los inventarios totales mediante muestreo con el estimador de razón (MERaz) y muestreo con el estimador de regresión (MEReg) están dentro de la amplitud del intervalo de confianza del muestreo aleatorio. El MERaz es similar al obtenido mediante el MSA, este último es el que tiene mayor precisión para la estimación de los inventarios totales de las variables de campo. El MEReg presentó valores de precisión de 4.80 %, 6.70 %, 5.79 %, 6.62 %, 6.90 % en la estimación de Ab, Bt, Cob, Vol e IAF, respectivamente; y fue el más conservador de todos los inventarios realizados (Cuadro 5). Las estimaciones del MEReg no son problema, si las decisiones de manejo están basadas en estimaciones conservadoras y con ello la parte de sostenibilidad estaría asegurada (Aguirre-Salado *et al.*, 2009).

Los inventarios totales con precisión más alta son los estimados con los estimadores de razón y regresión, debido a que utilizan variables auxiliares, en el caso que se documenta son las variables espectrales que tienen mayor correlación con las variables dasométricas, y son conocidas en toda el área de estudio.

Comparative analysis of the inventory estimation methods

Total inventories estimated using sampling with a ratio estimator (SratE) and sampling with a regression estimator (SRegE) are within the confidence interval range of random sampling. SratE is similar to SRS, but the latter is more precise for the estimation of the total inventories of in-field variables. SRegE had precision values of 4.80 %, 6.70 %, 5.79 %, 6.62 % and 6.90 % in the estimation of BA, Bt, CC, Vol and LAI, respectively, and was the most conservative of all the inventories carried out (Table 5). SregE estimations are not a problem if the management decisions are based on conservative estimations, whereby sustainability would be ensured (Aguirre-Salado *et al.*, 2009).

The most accurate total inventories are those that are calculated using ratio and regression estimators, because they use auxiliary variables; in the case documented herein, the spectral variables show the highest correlation with the dasometric variables and are known across the study area.

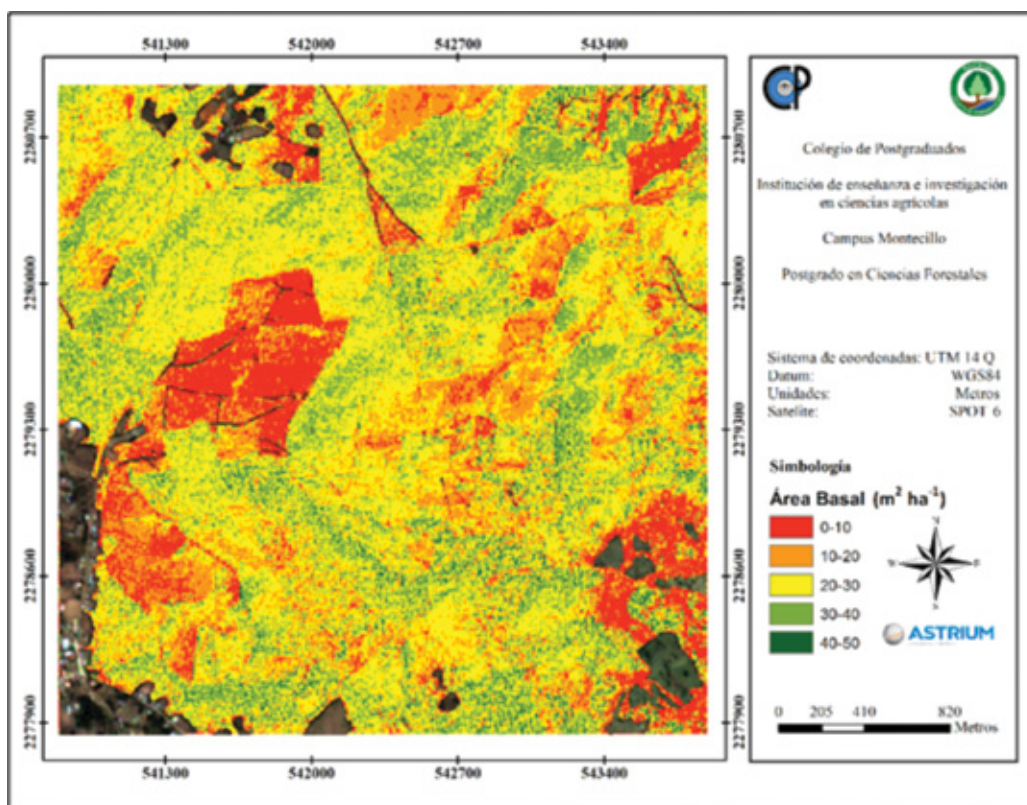


Figura 3. Área basal estimada mediante regresión lineal múltiple de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. bajo manejo en Zacualtipán, Hidalgo.

Figure 3. Basal area of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. under timber management in Zacualtipán, Hidalgo, estimated using multiple linear regression

Distribución espacial de las variables en el área de estudio

Al inventario mediante la regresión lineal múltiple le correspondieron los valores más bajos en la raíz del error medio cuadrático, y fue el seleccionado para el mapeo de las variables de área basal, biomasa total, cobertura de copa, volumen e índice de área foliar (Cuadro 4). Los resultados se presentan en las figuras 3, 4, 5, 6, y 7. En los mapas generados se excluyeron las poblaciones y áreas desprovistas de vegetación, ya que en ellas los valores de reflectancia son muy elevados y afectan la escala de las variables dasométricas, por tal motivo no incluyen en los mapas.

Spatial distribution of the variables in the study area

The inventory calculated using multiple linear regression model had the lowest values for the mean square root error and was selected for the mapping of the basal area, total biomass, crown cover, volume and leaf area index variables (Table 4). The results are shown in figures 3, 4, 5, 6 and 7. The maps thus generated exclude sparse populations and areas from which vegetation is absent because the reflectance values within them are very high and affect the scale of dasometric variables.

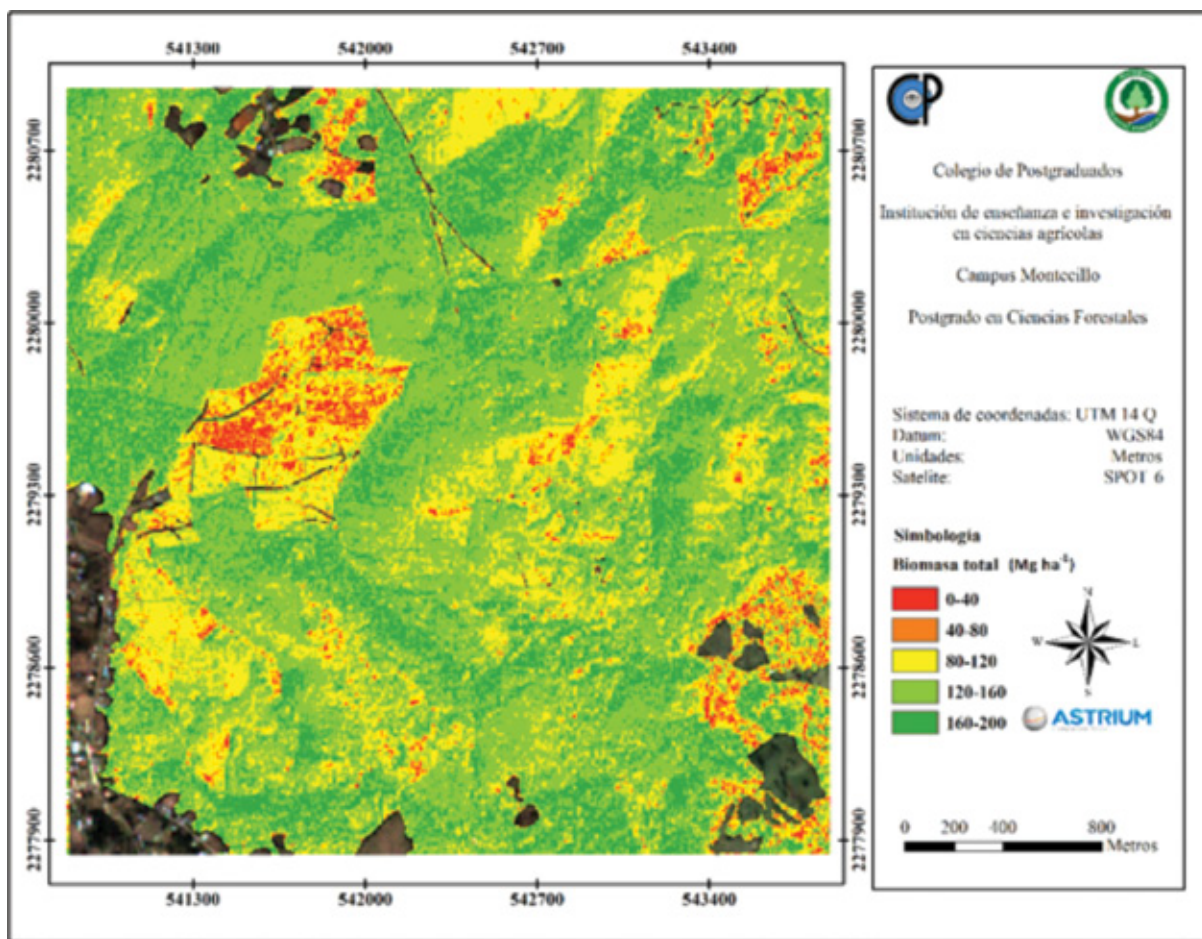


Figura 4. Biomasa total estimada mediante regresión lineal múltiple de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. bajo manejo en Zacualtipán, Hidalgo.

Figure 4. Total biomass of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. under timber management in Zacualtipán, Hidalgo, estimated using multiple linear regression.



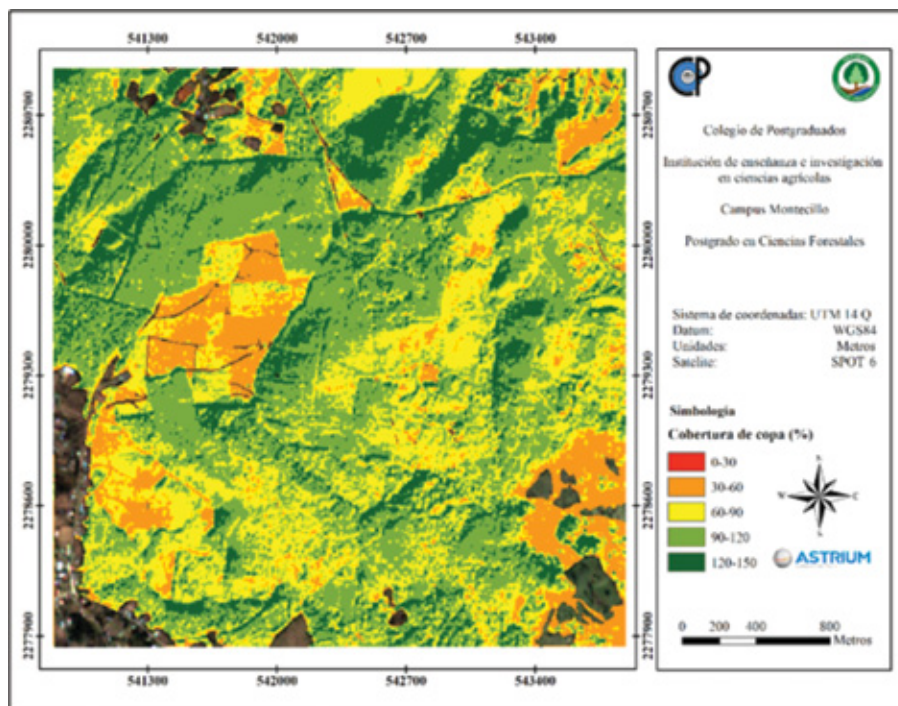


Figura 5. Cobertura de copa estimada mediante regresión lineal múltiple de *Pinus patula* Schiede ex Schtdl. & Cham. bajo manejo en Zacualtipán, Hidalgo.

Figure 5. Crown cover of *Pinus patula* Schiede ex Schtdl. & Cham. under timber management in Zacualtipán, Hidalgo, estimated using multiple linear regression.

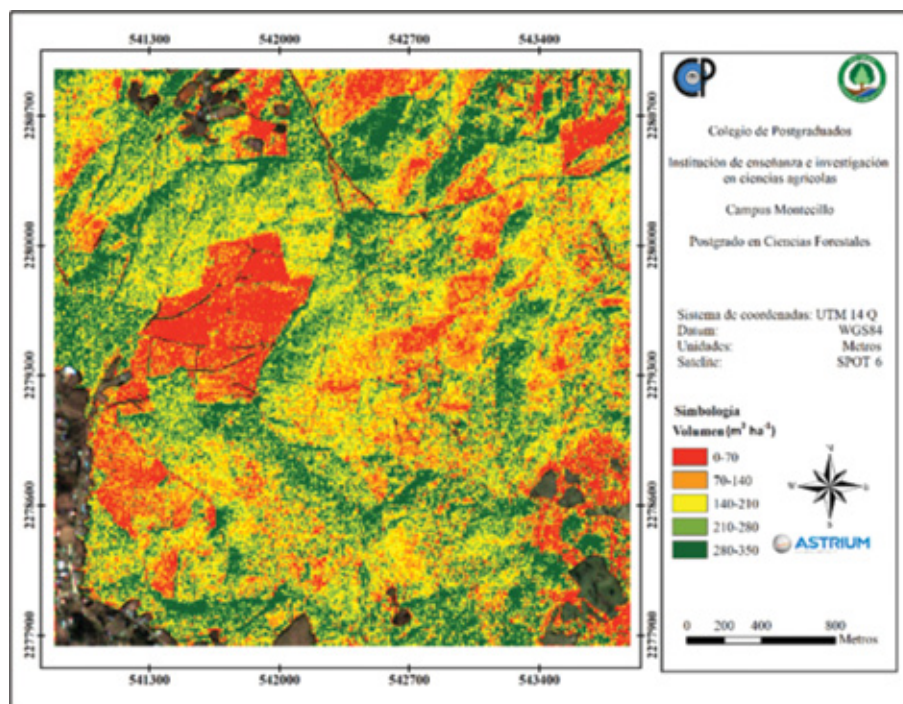


Figura 6. Volumen estimado mediante regresión lineal múltiple de *Pinus patula* Schiede ex Schtdl. & Cham. bajo manejo en Zacualtipán, Hidalgo.

Figure 6. Volume of *Pinus patula* Schiede ex Schtdl. & Cham. under timber management in Zacualtipán, Hidalgo, estimated using multiple linear regression.

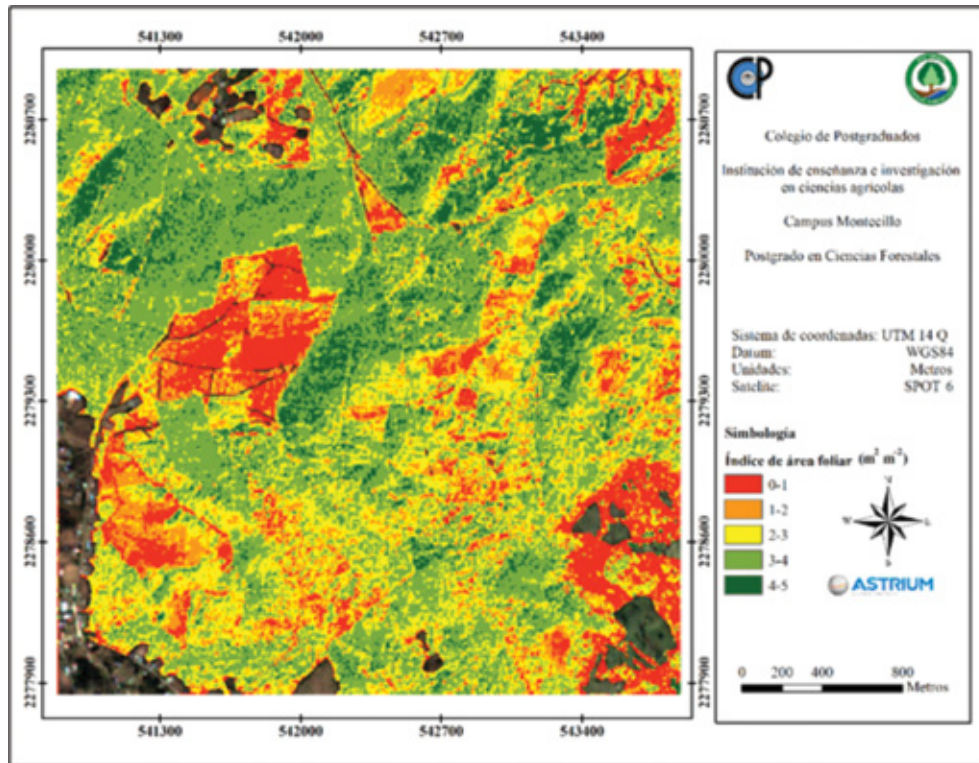


Figura 7. Índice de área foliar estimado mediante regresión lineal múltiple de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. bajo manejo en Zacualtipán, Hidalgo.

Figure 7. Leaf area index of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. under timber management in Zacualtipán, Hidalgo, estimated using multiple linear regression.

Conclusiones

La variable espectral del sensor SPOT 6 con mayor correlación con la mayoría de las variables de interés (área basal, biomasa total, cobertura de copa y volumen) fue la banda del infrarrojo cercano. Esta es una variable independiente constante en los modelos de regresión ajustados para la estimación de dichas variables. El índice de área foliar se correlaciona en mayor magnitud con la banda verde.

La cobertura de copa es la variable con la R^2_{adj} más baja. Los inventarios totales realizados con los estimadores de razón y regresión se localizan dentro del intervalo de confianza del inventario tradicional, sus resultados son muy confiables, con una precisión mayor al inventario tradicional.

El estimador de regresión presenta un intervalo de precisión entre 4.8 y 6.9 % en todas las variables evaluadas, comparativamente, el del inventario tradicional es de 6.5 a 9.3 %. El inventario asistido por datos espectrales permite generar mapas que muestran la variación espacial, a detalle, de la variable de interés y estimar valores para áreas que no son muestreadas en campo.

Conclusions

The spectral variable of the SPOT-6 sensor that had the highest correlation with most variables of interest (basal area, total biomass, crown cover and volume) was the near infrared band. This is a constant independent variable in regression models adjusted for the estimation of those variables. The leaf area index has a higher correlation with the green band.

The crown cover is the variable with the lowest R^2_{adj} . The total inventories carried out with ratio and regression estimators are located within the confidence interval of the traditional inventory; their results are very reliable and more accurate than those of the traditional inventory.

The regression estimator has a precision interval of 4.8 to 6.9 % for all the assessed variables, while the traditional inventory has a value of 6.5 to 9.3 %. The inventory assisted by spectral data allows generating maps that show the spatial variation of the variable of interest in detail, as well as estimating values for areas where no in-field sampling is carried out.



Agradecimientos

Al Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de EE.UU. por el financiamiento a través del Northern Research Station y el Programa de Paisajes Sustentables de la Agencia para el Desarrollo Internacional de EE.UU. Agradecemos también el apoyo de la Dra. Antonia Macedo Cruz como gestora de las imágenes satelitales del sensor SPOT 6 y por supuesto a la Estación de Recepción México Nueva Generación (ERMEX NG) por proveer las imágenes SPOT utilizadas.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Juan Esteban Torres-Vivar: muestreo en campo, análisis estadísticos, escritura del manuscrito; José René Valdez-Lazalde y Gregorio Ángeles-Pérez: diseño del estudio, definición de metodología, revisión y corrección del manuscrito; Héctor Manuel de los Santos-Posadas: definición de metodología, análisis estadísticos, revisión y corrección del manuscrito; Carlos Arturo Aguirre-Salado: revisión y corrección del manuscrito.

Referencias

- Aguirre-Salado, C. A., J. R. Valdez-Lazalde, G. Ángeles-Pérez, H. M. de los Santos-Posadas, y A. I. Aguirre-Salado. 2011. Mapeo del índice de área foliar y cobertura arbórea mediante fotografía hemisférica y datos Spot 5 HRC: regresión y k-nn. *Agrociencia* 45: 105-119.
- Aguirre-Salado, C. A., J. R. Valdez-Lazalde, G. Ángeles-Pérez, H. M. de los Santos-Posadas, R. Haapanen, y A. I. Aguirre-Salado. 2009. Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosques manejados de pino *patula* en Hidalgo, México. *Agrociencia* 43: 209-220.
- Ángeles-Pérez, G., C. Wayson, R. Birdsey, J. R. Valdez-Lazalde, H. M. de los Santos-Posadas y F.O. Plascencia-Escalante. 2012. Sitio intensivo de monitoreo de flujos de CO₂ a largo plazo en bosques bajo manejo en el centro de México. In: Paz, F. y R. M. Cuevas (eds.). Estado actual del conocimiento del ciclo del carbono y sus interacciones en México: Síntesis 2011. Programa Mexicano del Carbono, Universidad Autónoma del Estado de México e Instituto Nacional de Ecología. Texcoco, Edo. de Méx. México. pp. 793-797.
- Astrium. 2013. SPOT 6 & SPOT 7 Imagery User Guide. Toulouse, France. 120 p.
- Cano M., E. E., A. Velázquez M., J. J. Vargas H., C. Rodríguez F. y A. M. Fierros G. 2006. Área foliar específica en *Pinus patula*: efecto del tamaño del árbol, edad del follaje y posición en la copa. *Agrociencia* 30: 117-122.
- Chuvieco, E. 1995. Fundamentos de teledetección espacial. Ed. Ediciones Rialp. 2ª edición. Madrid, España. 224 p.
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). 2011. Inventario nacional forestal y de suelos: Manual y procedimientos para el muestreo de campo, Re-muestreo 2011. México, D.F., México. 141 p.
- Cruz-Leyva, I. A., J. R. Valdez-Lazalde, G. Ángeles-Pérez y H. M. de los Santos-Posadas. 2010. Modelación espacial de área basal y volumen de madera en bosques manejados de *Pinus patula* y *P. teocote* en el ejido Atopixco, Hidalgo. *Madera y Bosques* 16 (3): 75-97.
- Cruz M., Z. 2007. Sistema de ecuaciones para estimación y partición de biomasa aérea en Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo, México. Tesis de Maestría en Ciencias. DICIFO. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, Edo. de Méx., México. 50 p.
- INAFED (Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal). 2015. Secretaría de Gobernación. Enciclopedia de los municipios de México (EMM). Estado de Hidalgo: Zacualtipán de los Ángeles. Página web. <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM13hidalgo/index.html>. (16 de marzo de 2015).

Acknowledgements

The authors would like to express their gratitude to the Forestry Service of the Department of Agriculture of the United States of America for the funding provided through the Northern Research Station and the Sustainable Landscape Program of the U.S. Agency for International Development. Also, for the support received from Antonia Macedo Cruz, PhD, as manager of the satellite images of the SPOT-6 sensor and, of course, to the *Estación de Recepción México Nueva Generación*, ERMEX NG (Reception Station Mexico New Generation) for the SPOT images used in this study.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Contribution by author

Juan Esteban Torres-Vivar: field sampling, statistical analyses, drafting of the manuscript; José René Valdez-Lazalde and Gregorio Ángeles-Pérez: design of the study, definition of the methodology, revision and editing of the manuscript; Héctor Manuel de los Santos-Posadas: definition of the methodology, statistical analyses, revision and editing of the manuscript; Carlos Arturo Aguirre-Salado: revision and editing of the manuscript.

End of the English version



- Jensen, J. R. 2007. Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective. Prentice Hall. Second Edition. Upper Saddle River, NJ, USA. 592 p.
- Figueroa N., C. M., G. Ángeles P., A. Velázquez M., y H. M. De los Santos P. 2010. Estimación de Biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1(1): 105-112.
- Hawbaker, T. J., T. Gobakken, A. Lesak, E. Tromborg, K. Contrucci and V. Radeloff. 2010. Light Detection and Ranging based measures of mixed hardwood forest structure. *Forest Science* 56(3): 313-326.
- Merem, E. C. and Y. A. Twumasi. 2008. Using geospatial information technology in natural resources management: the case of urban land management in West Africa. *Sensors* 8: 607-619.
- Muñoz-Ruiz, M. A., J. R. Valdez-Lazalde, H. M. de los Santos-Posadas, G. Ángeles-Pérez, y A. I. Monterroso-Rivas. 2014. Inventario y mapeo del bosque templado de Hidalgo, México mediante datos del satélite SPOT y de campo. *Agrociencia* 48: 847-862.
- Ortiz-Reyes, A. D., J. R. Valdez-Lazalde, H. M. de los Santos-Posadas, G. Ángeles-Pérez, F. Paz-Pellat, y T. Martínez-Trinidad. 2015. Inventario y cartografía de variables del bosque con datos derivados de LiDAR: comparación de métodos. *Madera y Bosque* 21(3): 111-128.
- Scheaffer, L. R., W. Mendenhall and L. Ott. 1986. Elementary survey sampling. PWS Publishers. Boston, MA, USA. 320 p.
- Soriano-Luna, M. de los A., G. Ángeles-Pérez, T. Martínez-Trinidad, F. O. Plascencia-Escalante, y R. Razo-Zárate. 2015. Estimación de biomasa aérea por componentes estructurales en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia* 49: 423-438.
- Tanaka, S., T. Takahashi, T. Nishizono, F. Kitahara, H. Saito, T. Iehara, E. Kodani, and Y. Awaya. 2014. Stand volume estimation using the k-NN technique combined with forest inventory data, satellite image data and additional feature variables. *Remote Sensing* 7: 378-394.

Valdez-Lazalde, J. R., M. de J. González-Guillén, y H. M. de los Santos-Posadas. 2006. Estimación de cobertura arbórea mediante imágenes satelitales multiespectrales de alta resolución. *Agrociencia* 40: 383-394.

Velasco L., S., O. Champo J., Ma. L. España B., y F. Baret. 2010. Estimación del índice de área foliar en la reserva de la biósfera mariposa monarca. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33 (2): 169-174.



