

# ESTIMACIÓN DE COBERTURA ARBÓREA MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES MULTIESPECTRALES DE ALTA RESOLUCIÓN

## TREE CROWN COVER ESTIMATION USING HIGH RESOLUTION MULTISPECTRAL SATELLITE IMAGES

J. Rene Valdez-Lazalde, Manuel de J. González-Guillén y Héctor M. de los Santos-Posadas

Programa Forestal. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. (valdez@colpos.mx)

### RESUMEN

Para evaluar la utilidad de imágenes de alta resolución espacial, se compararon mediciones directas en campo como densitómetro esférico, muestreo de intersección de líneas y estimadores de razón y regresión, con procedimientos que utilizan imágenes satelitales de alta y mediana resolución espacial (Ikonos, QuickBird-2, SPOT-4 y LANDSAT-7) para estimar el porcentaje de cobertura de copa arbórea en un pinar ubicado en el ejido San Rafael Ixtapalucan, Municipio de Tlahuapan, Estado de Puebla, México. Las imágenes Ikonos y QuickBird son adecuadas técnicamente para determinar el porcentaje de cobertura de copa en este tipo de vegetación. Sin embargo, es conveniente considerar los costos de la compra de las imágenes y que se requiere de personal capacitado para su uso.

**Palabras clave:** Medición de cobertura arbórea, percepción remota Ikonos, QuickBird, servicios ambientales.

### INTRODUCCIÓN

A finales de 2003 el Gobierno Mexicano, a través de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), inició la operación del Programa de Pago de Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH), que consiste en otorgar una compensación económica (Diario Oficial de la Federación, 2003) a los dueños y poseedores<sup>1</sup> de bosques y selvas del país que decidan manejar sus áreas forestales arboladas para proveer servicios hidrológicos.

Un requisito indispensable para que un área reciba la compensación económica del PSAH es mantener, en los cinco años que dura el contrato, un mínimo de 80% de cobertura de copa arbórea (Diario Oficial de la Federación, 2003). Este requisito crea la necesidad de estimar de manera expedita el porcentaje de cobertura

Recibido: Marzo, 2005. Aprobado: Enero, 2006.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 40: 383-394. 2006.

### ABSTRACT

In order to evaluate the usefulness of high resolution spatial images, Direct field measurement procedures, such as spherical densitometer, line intersection sampling, and ratio and regression estimators, were compared with procedures that use high and medium spatial resolution satellite images (Ikonos, QuickBird-2, SPOT-4 and LANDSAT-7) to estimate the percentage of tree crown cover in a pine stand located in the ejido San Rafael Ixtapalucan, Municipality of Tlahuapan, State of Puebla, México. The Ikonos and QuickBird images are technically adequate to determine the percentage of tree crown cover in this type of vegetation. To use them, however, it is advisable to consider the costs of acquiring the images, and that skilled personal is required.

**Key words:** Crown cover measurement, remote sensing, Ikonos, QuickBird, environmental services.

### INTRODUCTION

At the end of 2003 the Mexican government, through the National Forest Commission (CONAFOR), launched the Program of Payment of Environmental Water Services (PSAH), which consists of granting an economic incentive (*Diario Oficial de la Federación*, 2003) to the owners and holders<sup>1</sup> of forests and jungles of the country who decide to manage their forested areas to provide water services.

One essential requirement for an area to receive the economic incentive from PSAH is that, for the five years the contract lasts, a minimum of 80% tree crown cover be maintained (*Diario Oficial de la Federación*, 2003). This requirement creates the need to estimate quickly and efficiently the percentage of tree crown cover of a forest mass to decide whether or not the proposed area can be granted support; besides, that area may be distant and difficult to reach. It is also

<sup>1</sup> Aquellos que opten por no aprovechar los recursos maderables del área y sí conservarla para fomentar la captación de agua y regulación del ciclo hidrológico en beneficio de las comunidades aledañas con más de 5000 habitantes ♦ Those who chose not to harvest lumber and, instead, preserve the area to promote rainwater capture and regulation of the water cycle, benefiting surrounding communities with 5000 inhabitants or more.

de copas de una masa forestal para decidir si se apoya o no un área propuesta, la cual puede estar localizada en zonas alejadas y de difícil acceso. Además, es necesario monitorear la cobertura de manera regular durante el periodo de apoyo del PSAH.

Es posible estimar el porcentaje de cobertura arbórea mediante la medición directa en campo (Williams *et al.*, 2003). Desafortunadamente, esto requiere un importante esfuerzo humano y recursos económicos, y considerables inversiones monetarias y de tiempo. Frecuentemente esos recursos están fuera del alcance de los programas que requieren la información (Jamalabad y Abkar, 2004).

Existen métodos alternativos indirectos que usan imágenes captadas mediante sensores remotos en plataformas satelitales o aviones. Estas técnicas surgieron en la década de 1970 con el satélite LANDSAT, para monitorear regularmente los recursos naturales terrestres. Hasta hoy se ha materializado sólo una pequeña parte de las expectativas iniciales (Franklin, 2001). Sin embargo, hay esfuerzos para que la percepción remota satelital provea datos e información para facilitar la planificación y el manejo de recursos forestales (Pu *et al.*, 2003; Mallinis *et al.*, 2004; Mäkelä y Pekkarinen, 2004; Jamalabad y Abkar, 2004). La aparición de nuevos sensores remotos satelitales con mejor resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal (Ikonos, QuickBird, SPOT), mantiene la posibilidad de usar esa tecnología para el manejo de recursos forestales, especialmente cuando hay restricciones de tiempo y de personal para el trabajo de campo.

El objetivo del presente estudio fue comparar la estimación del porcentaje de cobertura de copas en un bosque de pino, mediante procedimientos basados en mediciones en campo y usando imágenes satelitales de alta y mediana resolución espacial (Ikonos, QuickBird-2, SPOT-4 y LANDSAT-7). A diferencia de estudios anteriores, en este trabajo se usan dos imágenes de alta resolución espacial (< 2.5 m) Ikonos y QuickBird, y no se usan ecuaciones de regresión para estimar la cobertura de copas en función de la información espectral captada por los sensores. La cobertura de copas de los árboles se estima de manera indirecta mediante la clasificación de los datos contenidos en la imagen. Se pretende aportar elementos técnicos que sean confrontados con otros socioeconómicos para decidir la manera más conveniente de estimar el porcentaje de cobertura de copa arbórea.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El análisis comparativo se realizó con datos de un predio ejidal de aproximadamente 250 ha, con un bosque maduro de pino (*Pinus*

necessary to monitor the cover regularly during the period of PSAH support.

It is possible to estimate the percentage of crown cover by direct measurement in the field (Williams *et al.*, 2003). Unfortunately, this requires an important human effort and economic resources, meaning considerable investment in time and money. In many cases, these resources are not affordable for the programs that require the information (Jamalabad and Abkar, 2004).

There are indirect alternative methods that use images captured by remote sensors on satellite platforms or on airplanes. These techniques emerged in the 1970s with the LANDSAT satellite to monitor regularly natural resources on land. To date, only a small part of the initial expectations have materialized (Franklin, 2001). Efforts are being made, however, towards enabling remote satellite perception to provide data and information to facilitate planning and management of forest resources (Pu *et al.*, 2003; Mallinis *et al.*, 2004; Mäkelä and Pekkarinen, 2004; Jamalabad and Abkar, 2004). The appearance of new remote satellite sensors with better spatial, spectral, radiometric and temporal resolution (Ikonos, QuickBird, SPOT), maintains the possibility of using that technology for management of forest resources, especially when there are limitations of time and personnel for field work.

The objective of this study was to compare estimations of crown cover in a pine forest using procedures based on field measurements and utilizing high and medium spatial resolution satellite images (Ikonos, QuickBird-1, SPOT-4 and LANDSAT-7). Unlike previous work, in this study two high spatial resolution (< 2.5 m) images (Ikonos and QuickBird) are used, and regression equations are not used to estimate crown cover in function of the spectral information captured by the sensors. Tree crown cover is estimated indirectly by means of the classification of data contained in the image. The aim is to contribute technical elements that can be confronted with other socio-economic elements to decide the most convenient way to estimate tree crown cover percentage.

## MATERIALS AND METHODS

### Study area

The comparative analysis was conducted with data from a plot approximately 250 ha, belonging to an *ejido*, with a mature pine forest (*Pinus montezumae* Lamb.). Although the composition of the mass is pure, there are *Alnus* spp and *Quercus* spp trees in the lower strata of the canopy. The soil of the tract is humic Andosol and ocreite Andosol. Climate is cool, subhumid with summer rains, and the winter precipitation is less than 5% of the total yearly rainfall

*montezumae* Lamb.). Aunque la composición de la masa es pura, existen árboles de *Alnus* spp. y *Quercus* spp. en los estratos inferiores del dosel. El suelo del predio es un Andosol húmico y Andosol ocrizo. El clima es semifrío, subhúmedo con lluvias en verano y una precipitación invernal menor de 5% de la precipitación anual (INEGI, 1987). La altitud varía entre 2800 a 3000 m, la fisiografía es accidentada y se ubica en las faldas del volcán Iztaccihuatl, en el ejido San Rafael Ixtapalucan, municipio de Tlahuapan, Puebla, México. El predio se seleccionó considerando que fue uno de los beneficiados por el PSAH en 2003, y por contar con imágenes de satélite de diferente resolución espacial que cubren el área en estudio.

#### Bases de datos utilizadas y métodos de análisis

##### Datos de campo

Inicialmente se identificaron de manera dirigida líneas de muestreo de dimensiones variables (*i.e.* diferente longitud) sobre la escena QuickBird (Figura 1), tratando de captar las diferentes condiciones de cobertura de copas y en dirección perpendicular a las principales formaciones montañosas en el predio. Se creó un archivo digital de puntos para visualizar espacialmente la distribución de las parcelas a muestrear en cada línea de muestreo. Este mapa se superpuso en las imágenes de satélite para identificar claramente la

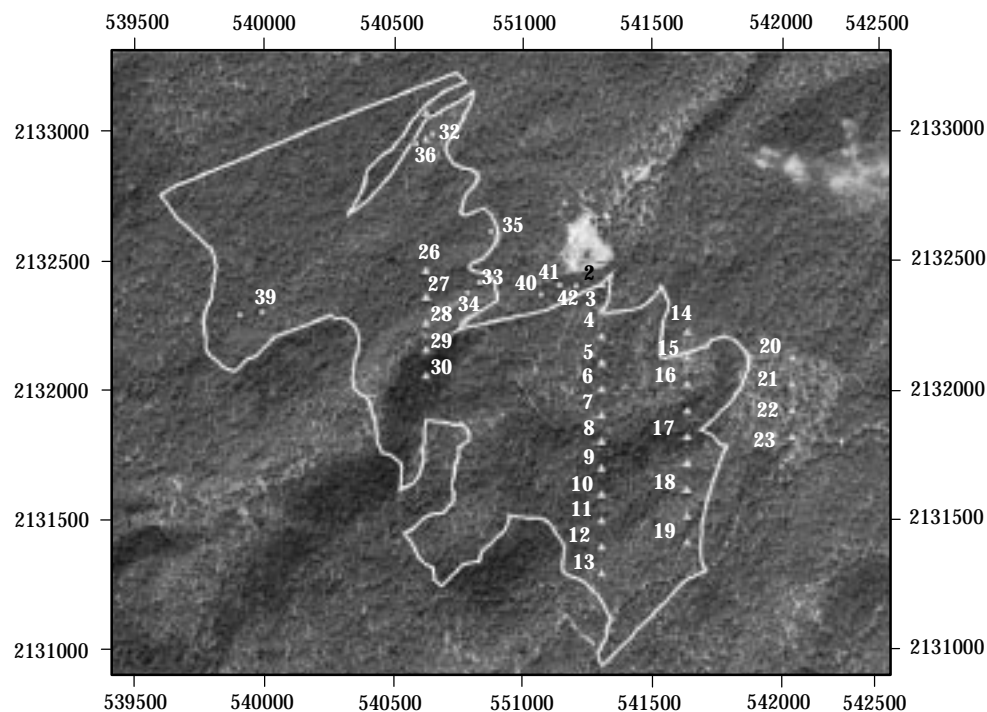
(INEGI, 1987). Altitude varies between 2800 and 3000 m, physiography is irregular, located on the slopes of the volcano Iztaccihuatl in the ejido San Rafael Ixtapalucan, municipality of Tlahuapan, Puebla, México. The plot was selected considering that it was benefited by PSAH in 2003, and because satellite images of different spatial resolutions that cover the study area were available.

#### Data bases used and methods of analysis

##### Field data

Initially sample lines of variable dimensions (*i.e.* different length) were identified in a directed form over the QuickBird scene (Figure 1), attempting to capture the different conditions of crown cover, and in a direction perpendicular to the principal mountain formations in the plot. A digital file of points was created to visualize spatially the distribution of the plots to be sampled in each sample line. This map was superimposed over the satellite images to clearly identify the position of the sample plots and to facilitate their location in the field with a global positioning system (GPS).

Along the four sample lines, initially 31 sample plots of crown cover were located at intervals of 100 or 200 m each, depending on the variability of the crown cover observed in the images (triangles, Figure 1). In areas of high variability sample plots were positioned



**Figura 1.** Sector de la imagen QuickBird que muestra el límite del predio y la ubicación de las parcelas de muestreo. Las parcelas 33-42 (cuadrados) fueron muestreadas en una segunda etapa para validar los resultados y estimar la cobertura de copas mediante los métodos de estimadores de razón y regresión.

**Figure 1.** Sector of the QuickBird image that shows the tract limits and location of sample plots. The plots 33-42 (squares) were sampled in a second phase to validate the results and estimate crown cover using the ratio and regression methods.

posición de las parcelas de muestreo, y facilitar su localización en el campo con un receptor del sistema de posicionamiento global (GPS).

Sobre las cuatro líneas de muestreo se ubicaron inicialmente 31 parcelas de muestreo de cobertura de copas a intervalos de 100 o 200 m cada una, dependiendo de la variabilidad de la cobertura de copas observada en las imágenes (triángulos, Figura 1). En áreas de alta variabilidad se posicionaron parcelas de muestreo cada 100 m, mientras que en las de poca variabilidad fue cada 200 m. En cada parcela de muestreo se estimó la cobertura de copa arbórea mediante tres métodos: 1) densitómetro esférico, 2) intersección de líneas y 3) estimadores de razón y regresión. Estas 31 parcelas se definieron como una muestra preliminar y con base en ellas se definió el tamaño de muestra definitivo. El análisis de los datos recolectados indicó que la muestra requerida para estimar la cobertura con un error de 10% fue menor a las 31 parcelas muestreadas (Cuadro 1). Sin embargo se decidió utilizar todos los datos para aumentar la precisión de las estimaciones.

**Densitómetro esférico**

El valor estimado de la cobertura de las copas fue el promedio de cinco mediciones obtenidas con un densitómetro esférico (Forestry Supplier's, 2005). Se realizó una medición en el centro de la parcela y cuatro a intervalos de 90 grados de separación angular y a una distancia horizontal de cinco metros a partir del centro de la parcela.

**Intersección de líneas**

Se colocó un extremo de una cinta de 15 m de longitud en el centro de la parcela de muestreo, se extendió en dirección norte, y se registró el porcentaje de cinta cubierta por las copas de los árboles; este procedimiento se repitió hacia el sur, este y oeste. Luego se calculó el promedio de las cuatro mediciones, valor registrado como el porcentaje de cobertura de copas para cada parcela (Williams *et al.*, 2003). Los datos de cobertura de copas obtenidos con los métodos densitómetro esférico e intersección de líneas se usaron para

every 100 m, while in those with little variability they were positioned every 200 m. In each sample plot, crown cover was estimated using three methods: 1) spherical densitometer, 2) line intersection and 3) ratio and regression estimators. These 31 plots were defined as a preliminary sample and based on these plots, the size of the definite sample was defined. Analysis of the collected data showed that the sample required for the cover estimation with a 10% error was less than the 31 sampled plots (Table 2). However, it was decided to use all of the data to increase the precision of the estimations.

**Spherical densitometer**

The estimated value of crown cover was the average of five measurements obtained with a spherical densitometer Forestry Suppliers, 2005. Measurements were taken at the center of the plot and at four intervals of 90 degree angles at a horizontal distance of five meters from the center of the plot.

**Line intersection**

The end of a 15-meter tape was placed at the center of the sample plot, extended toward the north, and the percentage of tape covered by tree crowns was recorded. This procedure was repeated toward the south, east and west. Averages of the four measurements were then calculated and the value recorded as percentage of crown cover for each plot (Williams *et al.*, 2003). The data on crown cover obtained from the spherical densitometer and line intersection methods were used to calculate the percentage of cover with a simple randomized sampling approach. In both cases, a percentage of cover per site is estimated.

**Ratio and regression estimators**

Estimators of ratio and regression are used to estimate a parameter of interest, normally difficult to measure, using a function that depends on another parameter that is easily measured. In this case, the average

**Cuadro 1. Medias de cobertura de copas, intervalos de confianza y tamaños muestrales para un límite de error de 10% en intersección de líneas y densitómetro para 31 y 24 sitios de muestreo.**

**Table 1. Means of crown cover, confidence intervals and sample size for an error limit of 10% in line interception and densitometer for 31 and 24 sample sites.**

Método / Tamaño de la muestra	Media (%)	Varianza	Límite superior (90%)	Límite inferior (90%)	Límite superior (95%)	Límite inferior (95%)	Límite superior (99%)	Límite inferior (99%)	Tamaño muestral estimado (90%)	Tamaño muestral estimado (95%)	Tamaño muestral estimado (99%)
<b>Intersección de líneas</b>											
31	67	14	73	61	75	60	77	57	13	18	32
24	69	17	76	62	77	61	80	58	12	16	30
<b>Densitómetro</b>											
31	74	8	79	69	80	69	82	67	7	10	19
24	74	13	81	68	82	67	84	65	9	13	23

calcular el porcentaje de cobertura con un enfoque de muestreo simple aleatorio. En ambos casos, se estima un porcentaje de cobertura por sitio.

**Estimadores de razón y regresión**

Los estimadores de razón y regresión se utilizan para estimar un parámetro de interés, normalmente difícil de medir, mediante una función que depende de otro parámetro de fácil medición. En este caso, el porcentaje promedio de la cobertura de copas (relativamente difícil de medir) se puede estimar usando la relación entre la cobertura de copas (CC) y el área basal (AB) por sitio, que es una variable fácil de medir en campo. Dada la alta correlación entre el porcentaje de CC y el AB de un sitio, ésta última se puede muestrear más intensamente sobre la superficie forestal elegida, y así estimar con menor esfuerzo la CC.

Por la alta relación encontrada en este estudio entre AB y CC ( $R^2=0.97$ ; Figura 2) fue posible intensificar el muestreo del AB y medir cobertura en diversas condiciones de cada rodal, sin perder precisión. Este tipo de estrategia se conoce como muestreo en dos fases. Durante la primera fase sólo se mide AB en  $n'$  sitios o parcelas, y en la segunda fase se mide el AB y la CC en  $n$  sitios. Los datos obtenidos se pueden analizar usando estimadores de razón y de regresión, los cuales permiten construir intervalos de confianza de menor amplitud que los obtenidos con una muestra aleatoria. Los estimadores de razón utilizan como valor estimado de la proporción entre la variable auxiliar (AB) y la CC a  $\hat{R}$ , que se expresa como

$$\hat{R} = \frac{\sum_{i=1}^n CC}{\sum_{i=1}^n AB}$$

, por lo que la estimación de la media poblacional del

estimador de razón se expresa como  $\overline{CC}_R = \hat{R} \times \bar{x}'$ , donde

$$\bar{x}' = \frac{1}{n'} \sum_{i=1}^{n'} AB_i'$$

es la media de la primera fase donde sólo se midió el

AB sobre  $n'$  parcelas. De manera similar, para el estimador de regresión, la estimación de la cobertura promedio es

$$\overline{CC}_r = \overline{CC} + b \left[ \frac{1}{n'} \sum_{i=1}^{n'} AB_i' - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AB_i \right]$$

, donde  $b$  es la tasa de cambio

de la cobertura respecto al área basal y  $\overline{CC}$  es el promedio de CC estimado en la segunda fase.

Para implementar el muestreo en dos fases con estimadores de razón y regresión se usaron parcelas de radio variable (De Vries, 1986), pero en vez de modelos de volumen de la forma: *Volumen = función (diámetro normal)*, se utilizó un modelo de la forma: *Área de copa = función (sección normal)*. Para generar este modelo se usó una muestra de 134 árboles de *Pinus montezumae* de todas las clases diamétricas encontradas en el área en estudio (diámetros de 5 a 90 cm). En los árboles muestreados se midió su diámetro normal y se obtuvieron los diámetros de copa promediando las mediciones de los diámetros de copa medidos en dirección norte-sur y este-oeste.

percentage of crown cover (relatively difficult to measure) can be estimated using the relationship between crown cover (CC) and the basal area (AB) per site, which is a variable that is easy to measure in the field. Given the high correlation between percentage of CC and AB of a site, the latter can be sampled more intensely over the selected forest surface, and thus estimate CC with less effort.

Because of the high correlation found in our study between AB and CC ( $R^2=0.97$ ; Figure 2), it was possible to intensify sampling of AB and to measure cover in diverse conditions of each stand without loss of precision. This type of strategy is known as two-phase sampling. During the first phase only AB is measured in  $n'$  sites or plots, and in the record phase AB and CC are measured in  $n$  sites. The data obtained can be analyzed using ratio and regression estimators, which allow construction of confidence intervals of lesser amplitude than those obtained with a random sample. The ratio estimators use as the estimated value of the proportion between the auxiliary variable (AB) and CC at  $\hat{R}$ , which is expressed as

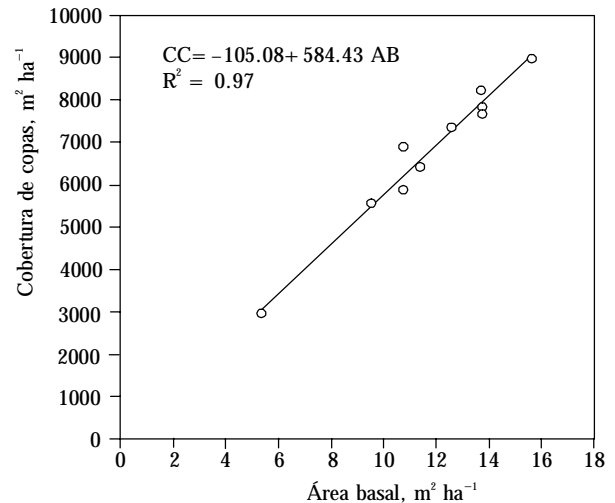
$$\hat{R} = \frac{\sum_{i=1}^n CC}{\sum_{i=1}^n AB}$$

, so that the estimation of the population mean of the

ratio estimator is expressed as  $\overline{CC}_R = \hat{R} \times \bar{x}'$ , where  $\bar{x}' = \frac{1}{n'} \sum_{i=1}^{n'} AB_i'$

is the mean of the first phase where only AB was measured in  $n'$  plots. In a similar way, for the regression estimator, estimation of

average cover is  $\overline{CC}_r = \overline{CC} + b \left[ \frac{1}{n'} \sum_{i=1}^{n'} AB_i' - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AB_i \right]$ , where  $b$  is



**Figura 2. Ajuste de regresión lineal entre cobertura de copas (m² ha⁻¹), CC, y área basal (m² ha⁻¹), AB, para las diez parcelas de muestreo de la segunda fase (para los estimadores de razón y regresión).**

**Figure 2. Adjustment of linear regression between crown cover (m² ha⁻¹) CC and basal area (m² ha⁻¹), AB, for the ten sample plots of the second phase (for estimators of ratio and regression).**

Con estos datos se ajustó un modelo de regresión lineal: área de copa ( $m^2$ ) =  $7.9 + 488.90$  sección normal ( $m^2$ ), ( $R^2=0.89$ ), con ambos parámetros altamente significativos ( $p \leq 0.01$ ). Este modelo se usó para estimar el área de copas por ha, como se calcularía el volumen total por ha en un muestreo con el relascopio de Bitterlich, usando 10 parcelas ( $n=10$ ) en la segunda fase de muestreo, donde se midió simultáneamente la variable auxiliar AB ( $m^2 ha^{-1}$ ) y la variable de interés cobertura de copas ( $m^2 ha^{-1}$ ). Las otras parcelas de campo ( $n'=31$ , mostrados como triángulos en la Figura 1) corresponden a la primer fase del muestreo donde sólo se midió AB mediante el relascopio. El factor de multiplicación del relascopio fue 0.6 para lograr mayor precisión en las mediciones.

**Imágenes de satélite**

Se utilizaron cuatro imágenes satelitales: tres captadas en el primer cuatrimestre de 2003, y una en marzo de 2004 (Cuadro 2). Los datos de campo se obtuvieron en agosto y septiembre de 2004. Aunque utilizar imágenes de fechas diferentes no es lo ideal, se consideró aceptable en este caso debido al lento crecimiento de la especie en el bosque estudiado. Esta explicación es también válida para la fecha de obtención de la información de campo.

La CONAFOR proporcionó para su análisis las imágenes Ikonos, QuickBird-2 y LANDSAT-7 ETM+. La imagen SPOT-4 HRVIR se obtuvo del Gobierno Federal de México. Los cuatro tipos de imágenes utilizadas fueron adquiridas con un sensor de tipo multiespectral, pero con una resolución espacial diferente. La imagen LANDSAT-7 ETM+ se compone de siete bandas espectrales situadas en distintas zonas del espectro electromagnético, mientras que las imágenes Ikonos, QuickBird-2 y SPOT-4 HRVIR tienen cuatro bandas situadas en bandas espectrales muy similares pero no iguales. En el Cuadro 2 se muestra algunas características importantes asociadas con estas imágenes.

**Preprocesamiento de las imágenes**

Las imágenes se visualizaron y analizaron con el paquete ERDAS IMAGINE 8.7 (Leyca Geosystems, 2003). Inicialmente se discriminó de manera visual las diferentes condiciones de

the change rate of the cover with respect to the basal area and  $\bar{CC}$  is the average of  $CC$  estimated in the second phase.

To implement sampling in two phases with ratio and regression estimators, plots of variable radii were used (De Vries, 1986), but instead of models of form  $Volume = function (normal\ diameter)$ , a form model:  $crown\ area = function (normal\ section)$  was used. To generate this model, a sample of 134 *Pinus montezumae* trees from all of the diametric classes found in the study area (diameters of 5 to 90 cm) was used. In sampled trees, diameter at breast height was measured and crown diameters were obtained by averaging the measurements of crown diameters measured north-south and east-west.

With these data, a linear regression model was adjusted:  $crown\ area (m^2) = 7.9 + 488.90$  normal section ( $m^2$ ), ( $R^2=0.89$ ), with both parameters highly significant ( $p \leq 0.01$ ). This model was used to estimate the crown area per ha, in the same way as total volume per ha would be calculated in a sample with the Bitterlich relascope, using 10 plots ( $n=10$ ), in the second phase of sampling where the auxiliary variable AB ( $m^2 ha^{-1}$ ) and the variable of interest crown cover ( $m^2 ha^{-1}$ ), were measured simultaneously. The remaining field plots ( $n'=31$ , shown as triangles in Figure 1) correspond to the first phase of sampling where only AB was measured with the relascope. The multiplication factor of the relascope was 0.6, to achieve greater precision in the measurements.

**Satellite images**

Four satellite images were used: three captured in the first quarter of 2003 and one in March 2004 (Table 2). The field data were obtained in August and September 2004. Although use of images on different dates is not ideal, it is considered acceptable in this case because of the slow growth of the species in the forest studied. This explanation is also valid for the date field information was obtained.

CONAFOR provided the Ikonos, QuickBird-2 and LANDSAT-7 ETM+ images for analysis. The SPOT-4 HRVIR Image was acquired from the federal government of México. The four types of images used were obtained with a multispectral-type sensor, but with a different spatial resolution. The LANDSAT-7 ETM+ image is composed of seven spectral bands situated in different areas of the electromagnetic spectrum, while the Ikonos, QuickBird-2 and SPOT-4

**Cuadro 2. Resoluciones espacial, radiométrica y temporal, área cubierta por las escenas, costo por  $km^2$  y fecha de adquisición de las escenas de las imágenes utilizadas en el estudio.**

**Table 2. Spatial, radiometric and temporal resolutions, area covered by scenes, cost per  $km^2$  and date of acquisition of image scenes used in the study.**

Plataforma/Sensor	Resolución espacial (m)	Resolución radiométrica (bits)	Resolución temporal (días)	Área cubierta por escena (km)	Costo (US\$/ $km^2$ )	Fecha de adquisición de la escena
Ikonos	1.0	11	1.5	13 × 13	21.5	01-02-2003
QuickBird-2	2.4	11	1 a 4	22 × 22	22.0	03-17-2003
SPOT-4/HRVIR	20	8	26	60 × 60	0.64	03-26-2004
LANDSAT-7/ETM+	30	8	16	185 × 185	0.022	05-17-2003

ETM+ = Enhanced Thematic Mapper Plus; HRVIR = Haute Resolution Visible e Infrared.

cobertura identificables, lo cual fue fundamental para reconocer las áreas y definir la localización de las parcelas de muestreo en campo.

Para hacer compatibles las mediciones, las cuatro imágenes usadas fueron corregidas entre ellas usando como base la imagen QuickBird, adquirida con un nivel de procesamiento estándar. Esto implicó que la imagen había tenido corrección radiométrica y del sensor, y había sido georectificada usando la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM), Datum WGS84, Zona 14 Norte (Digital Globe, 2005). Jensen (1996) y Franklin (2001) detallan el uso y la pertinencia del procedimiento de registro de imagen a imagen. Este procedimiento se usa para hacer ajustes entre dos o más imágenes de geometría similar que cubren la misma área geográfica para hacer coincidir los elementos geográficos existentes; esta condición es necesaria para obtener resultados comparables entre las imágenes usadas.

El procedimiento de registro de imagen a imagen, al igual que la rectificación de imagen a mapa, requiere identificar puntos de control. La diferencia es que en el primer caso los puntos de control se identifican sobre la imagen base, mientras que en el segundo se identifican sobre un mapa. En este trabajo se utilizaron 12 puntos de control para registrar el fragmento correspondiente al área en estudio de la imagen Ikonos, nueve en SPOT y ocho en LANDSAT, mediante ecuaciones polinomiales de segundo orden. Los errores cuadráticos medios fueron 3.56, 1.48 y 0.96 píxeles, para las imágenes Ikonos, SPOT y LANDSAT. En todos los casos se usó el método del vecino más próximo para remuestrear los valores digitales de las imágenes originales.

#### **Estimaciones del porcentaje de cobertura de copas mediante clasificación**

Para estimar el porcentaje de cobertura de copas se clasificaron las cuatro imágenes (Ikonos, QuickBird, SPOT y LANDSAT) separadamente en tres categorías de tipo de cobertura: arbolada, no arbolada y sombra. Para ello se usó el algoritmo de clasificación no supervisada ISODATA del software ERDAS IMAGINE 8.7 (Leyca Geosystems, 2003). Inicialmente se obtuvieron 15 clases espectrales para las imágenes QuickBird e Ikonos y 10 clases para las imágenes LANDSAT y SPOT. Este número inicial de clases se consideró adecuado después de realizar varios ensayos, basados en la regla empírica que consiste en multiplicar el valor correspondiente al número de clases deseadas por un factor de 3 o 4. Luego se etiquetó cada clase espectral en la categoría correspondiente (arbolado, no arbolado o sombra) mediante un análisis visual detallado de las imágenes QuickBird e Ikonos, además de una ortofotografía del área. Finalmente se calculó el área correspondiente a cada categoría y se estimó el porcentaje de cobertura de copas para el predio. La categoría de cobertura sombra fue importante para calcular el porcentaje de cobertura de copa, ya que el valor final se influye considerablemente en función a qué categoría primaria (arbolada o no) se adicione el área identificada como cubierta por sombras.

HRVIR images have four bands located in very similar, but not equal, spectral bands. Some important characteristics associated with these images are shown in Table 2.

#### **Image pre-processing**

The images used were visualized and analyzed with the software ERDAS IMAGINE 8.7 (Leyca Geosystems, 2003). Initially, the different conditions of identifiable cover were discriminated visually; this was fundamental for the recognition of areas and definition of sample plot location in the field.

To make measurements compatible, the four images used were co-recorded using as the base the QuickBird image acquired with a standard level of processing. This implied that the image had had radiometric and sensor correction, and had been georectified using the Universal Transverse Mercator projection (UTM), Datum WGS 84, Zone 14 North (DigitalGlobe, 2005). Jensen (1996) and Franklin (2001) detail the use and relevance of the procedure of image to image registration. This procedure is used to make adjustments between two or more images of similar geometry that cover the same geographic area in order to make the existing geographic elements coincide; this condition is necessary to obtain results that are comparable among the images used.

The procedure of image to image registration, like that of image to map rectification, requires the identification of control points. The difference lies in that, in the first case, the points of control are identified over the base image, while in the second case, they are identified on a map. In this study 12 points of control were used to record the fragment that corresponds to the area study of the Ikonos image, nine in SPOT and eight in LANDSAT, using second order polynomial equations. Mean quadratic errors were 3.56, 1.48 and 0.96 pixels for Ikonos, SPOT and LANDSAT images. In all of the cases, the method of closest neighbor was used to re-sample the digital values of the original images.

#### **Estimations of percentage of crown cover using classification**

To estimate the percentage of crown cover, four images (Ikonos, QuickBird, SPOT and LANDSAT) were classified separately in three categories of cover type: with trees, without trees, shade. To this end, the non-supervised classification algorithm was used, of the software ERDAS IMAGINE 8.7 (Leyca Geosystems, 2003). Initially, 15 spectral classes for the QuickBird and Ikonos images and 10 classes for the LANDSAT and SPOT images were obtained. This initial number of classes was considered sufficient after conducting several tests, based on the empirical rule which consists in multiplying the value corresponding to the number of classes desired by a factor of 3 or 4. Each spectral class was then labeled in the corresponding category (with trees, without trees, or shade) using a detailed visual analysis of the QuickBird and Ikonos images, as well as an orthophotograph of the area. Finally, the area corresponding to each category was calculated and percentage of crown cover was estimated for the tract. The category shade cover was important to calculate percentage of crown cover since the final value is considerably affected

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Estimación de cobertura de copas con datos de campo

En el Cuadro 1 se muestran los valores promedio de cobertura de copas estimados mediante los métodos de muestreo de densitómetro esférico y de intersección de líneas. La cobertura fue 67 y 69% para el método de intersección de líneas, cuando se usan 31 y 24 parcelas de muestreo. Mediante el método de densitómetro se estimó 74% de cobertura de copas, independientemente del tamaño de muestra considerado. Para ambos métodos, 31 parcelas de muestreo fueron suficientes para construir, con 90 a 99% de confiabilidad, intervalos de confianza sobre la media bajo el diseño de muestreo completamente al azar. Admitiendo un error de 10%, el número de parcelas de muestreo pudo haberse reducido a 13 o menos (Cuadro 1).

En el Cuadro 3 se muestran las estimaciones de cobertura de copas obtenidas mediante estimadores de razón y regresión. Los valores son muy similares, en media, a los obtenidos con densitómetro esférico e intersección de líneas, la cual se usa para decidir si el productor es apoyado o no por el PSAH de la CONAFOR. Sin embargo, los intervalos de confianza al 95% son más estrechos para las medias estimadas por razón y por regresión, lo que indica mayor precisión. Usando el coeficiente de correlación del AB y de la cobertura ( $R^2=0.97$ ) así como las proporciones de costos por sitio para estimar el tamaño de muestra, se encontró que en el peor de los casos (v.gr: mismo costo unitario de la primera y segunda fases del muestreo), por cada 31 sitios de muestreo de AB se requieren sólo ocho sitios auxiliares con AB y cobertura de copas. Consecuentemente, los 31 puntos de muestreo fueron suficientes para estimar el parámetro

in function of to which primary category (with or without trees) the area identified as shaded is added.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Crown cover estimation with field data

The crown cover average values estimated with the spherical densitometer and line intersection methods are shown in Table 2. Cover was 67 and 69% for the line intersection method when 31 and 24 sample plots are used. With the densitometer method, crown cover was estimated at 74%, regardless of the sample size. For both methods, 31 sample plots were more than enough to construct confidence intervals with 90 to 99% reliability, confidence intervals over the mean, under the completely randomized sampling design. Admitting a ten percent error, the number of sample plots could have been reduced to 13 or fewer (Table 1).

The crown cover estimations obtained with ratio and regression estimators are shown in Table 3. The values are very similar, in mean, to those obtained with the spherical densitometer and line intersection, which is used to decide if the producer is to be supported or not by PSAH of CONAFOR. However, the confidence intervals at 95% are narrower for means estimated by ratio and regression, indicating greater precision. Using the coefficient of correlation of AB and cover ( $R^2=0.97$ ), as well as the proportions of costs per site to estimate the sample size, it was found that in the worst case (for example, the same unitary cost of the first and second phases of sampling), for each of the 31 sampling sites with AB only eight auxiliary sites are required with AB and crown cover. Consequently, the 31 sampling points were sufficient to estimate the parameter of interest with a statistical error of 1% over its mean. Furthermore, the costs of

**Cuadro 3. Medias de cobertura de copas ( $m^2 ha^{-1}$ ) e intervalos de confianza para los valores estimados mediante los métodos de razón y regresión.**

**Table 3. Percentage of crown cover, means of crown cover ( $m^2 ha^{-1}$ ) and confidence intervals for the values estimated with the ratio and regression methods.**

Método / Tamaño de la muestra	Media	Varianza	Límite inferior (90%)	Límite superior (90%)	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)	Límite inferior (99%)	Límite superior (99%)
Razón								
31	7073	113584	6500	7646	6399	7747	6163	7983
24	7338		6765	7911	6664	8012	6428	8248
Regresión								
31	7078	100761	6538	7617	6443	7713	6221	7935
24	6768		6228	7307	6133	7403	5911	7625

de interés con un error estadístico de 1% sobre su media. Además, los costos de medir el área basal usando un relascope (como se hizo en el muestreo) son más bajos y no disminuye la precisión. Se puede comparar los resultados obtenidos mediante el uso de métodos directos de campo y los obtenidos con las imágenes usando los datos de los Cuadros 1 y 3.

### Estimación de cobertura de copas mediante clasificación de imágenes

Los resultados de las estimaciones del porcentaje de cobertura de copas obtenidos mediante clasificación no supervisada de las imágenes, se muestran en el Cuadro 4. En las Figuras 3 a 6 se muestran los detalles gráficos.

Las estimaciones obtenidas del análisis de las imágenes Ikonos y QuickBird son muy similares a las obtenidas mediante las técnicas de campo cuando no contabiliza la categoría de sombras. Con la imagen Ikonos analizada, 13.66% del área fue etiquetada como sombra, mientras con QuickBird, SPOT y LANDSAT, el área ocupada por sombras fue 7.2, 8.12 y 5.81%. El análisis detallado de las imágenes Ikonos y QuickBird confirma que las sombras detectadas corresponden en su mayoría a espacios sin vegetación, pues de existir arbolado en esos espacios se hubieran clasificado en la clase vegetación, dado que la masa es coetánea.

Contar las sombras registradas en la imagen como áreas con vegetación puede ser una opción adecuada para estimar la cobertura de copas cuando las áreas tienen condiciones especiales, como cañadas o pendientes muy fuertes. Sin embargo, en áreas relativamente planas es muy probable que sean áreas sin cubierta arbolada y la sombra de arbolado adyacente se refleje en el piso forestal. Un estudio detallado del efecto de las sombras para estimar la cobertura arbórea en diversas condiciones fisiográficas y tipos de vegetación sería necesario, pero no fue el objetivo de la presente investigación.

Con base en lo anterior, y analizando las Figuras 5 y 6, además de la imagen QuickBird (Figura 1), se puede sugerir que las imágenes Ikonos y QuickBird son más adecuadas para estimar la cobertura de copa para este tipo de masas cuando no hay datos de campo. Contrariamente, las imágenes SPOT y LANDSAT fueron menor útiles. Ésto se manifiesta al observar en los resultados obtenidos con estas imágenes áreas de gran tamaño cubiertas de masa arbórea, y además espacios relativamente grandes etiquetados como áreas sin vegetación o sombras. Tales condiciones son incorrectas, dado que no se observaron así en campo ni en las imágenes de alta resolución (Figura 1). El factor fundamental que define la utilidad reducida de estas

measuring basal area using a relascope (as was done in the sampling) are lower and precision is not diminished. The results obtained with direct field methods can be compared with those obtained with the images, using the data from Tables 1 and 3.

### Crown cover estimation using image classification

The results of the estimations of crown cover percentage obtained using non-supervised classification of the images are shown in Table 4; Figures 3 to 6 show the details graphically.

The estimations obtained from the analysis of the Ikonos and QuickBird images are very similar to those obtained using field techniques when the category of shade is not included in the calculation. With the Ikonos image analyzed, 13.66% of the area was labeled as shade, while for QuickBird, SPOT and LANDSAT, the area occupied by shade was 7.2, 8.12 and 5.81%. The detailed analysis of the Ikonos and QuickBird images confirms that the shade detected corresponded mostly to spaces without vegetation, since if trees had existed in these spaces, they would have been classified in the vegetation class, given that the mass is coetaneous.

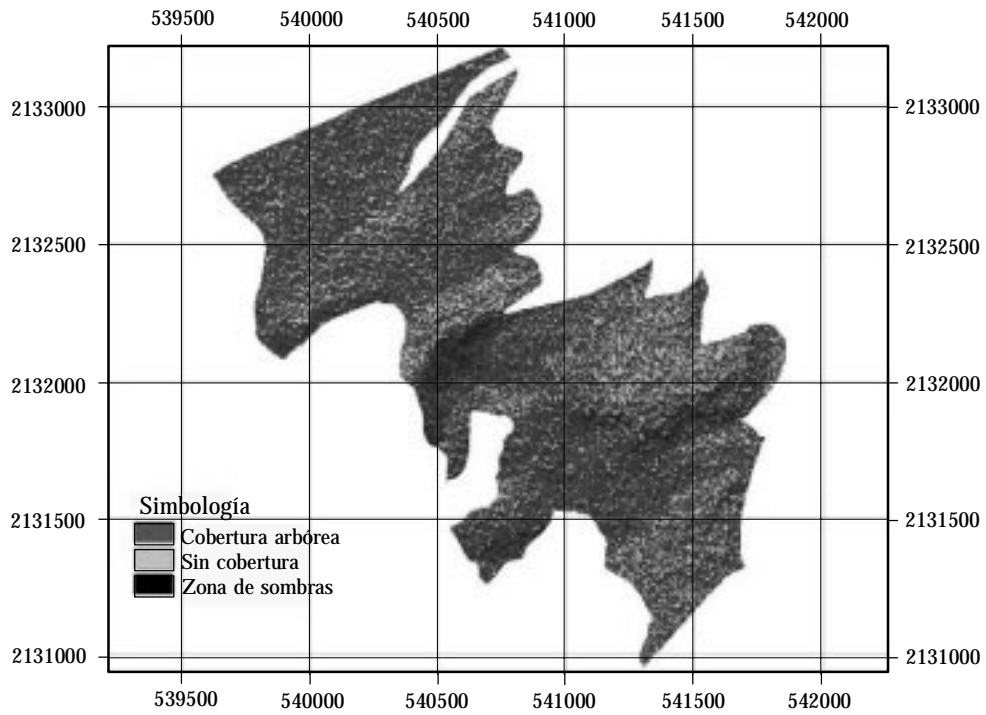
To count the shade registered in the image as areas with vegetation can be a suitable option for estimating crown cover when the areas have special conditions, such as chasms or very steep slopes. In areas that are relatively flat, however, it is very likely that they are indeed areas without tree cover and that adjacent tree shade is reflected on the forest floor. A detailed study of the effect of shade in estimating tree cover in diverse physiographic conditions and types of vegetation would be necessary, but this was not the objective of our study.

Based on the above and on the analysis of Figures 5 and 6 as well as the QuickBird image (Figure 1), it can be suggested that the Ikonos and QuickBird images are more suitable for estimating crown cover for this type of masses when field data are not available. In contrast, SPOT and LANDSAT images were less useful.

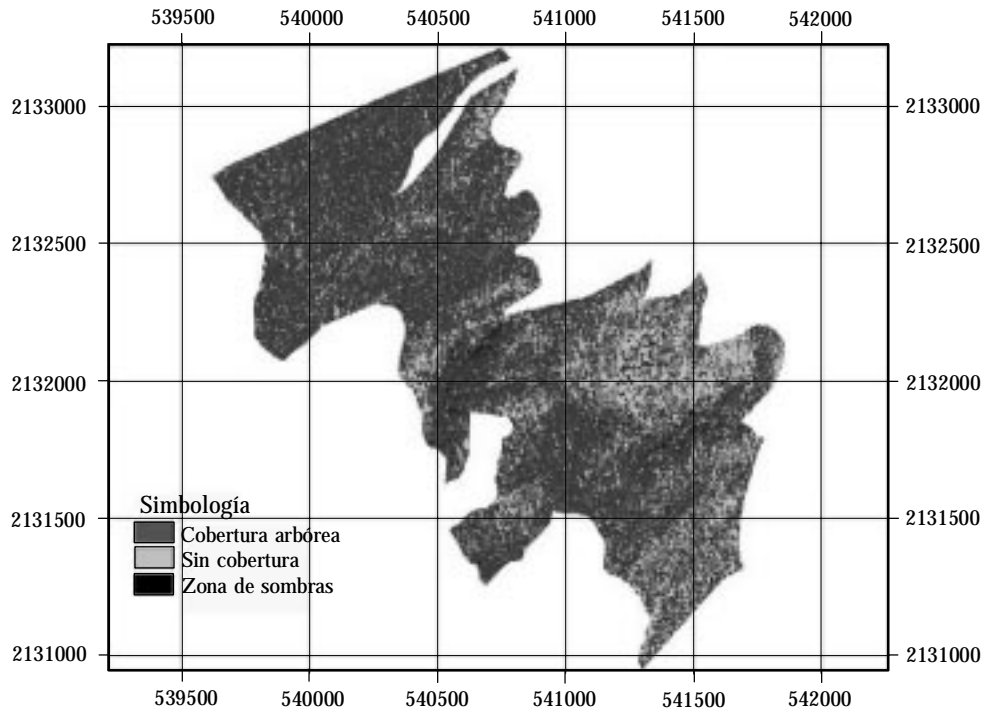
**Cuadro 4. Porcentajes de cobertura de copas obtenidos para las diferentes imágenes de satélite.**

**Table 4. Percentages of crown cover obtained for the different satellite images.**

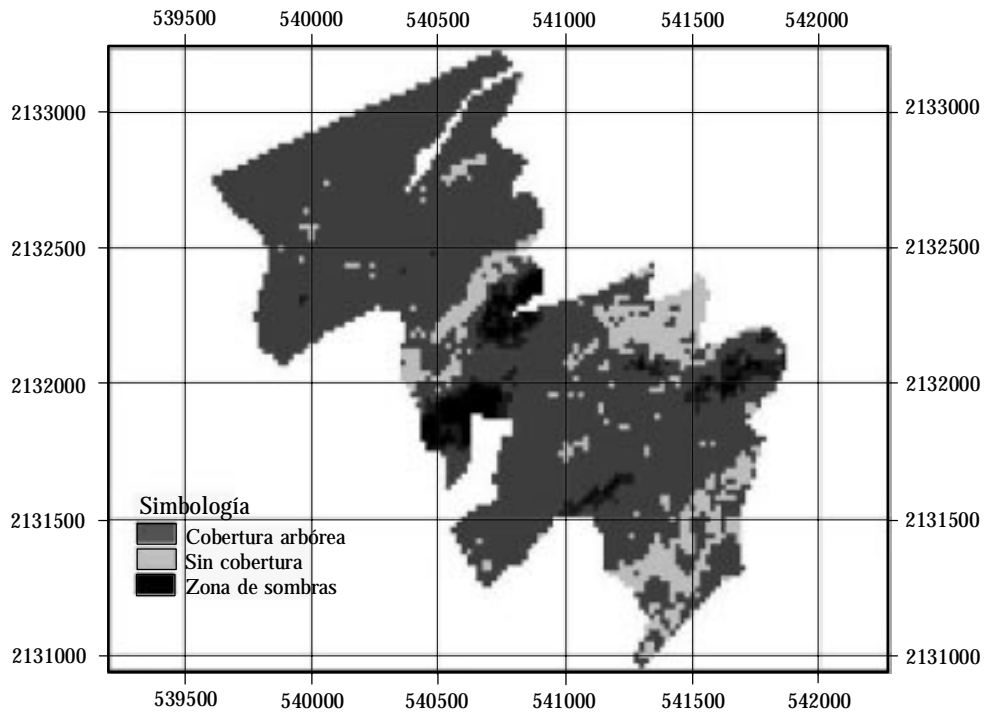
Plataforma/ Sensor	% Cobertura de copas		
	Sin sombra	Con sombra	Sin vegetación
Ikonos	66.00	79.66	20.33
QuickBird-2	70.75	77.95	22.05
SPOT-4 / HRVIR	78.76	86.88	13.12
LANDSAT-7/ETM	83.29	89.10	10.90



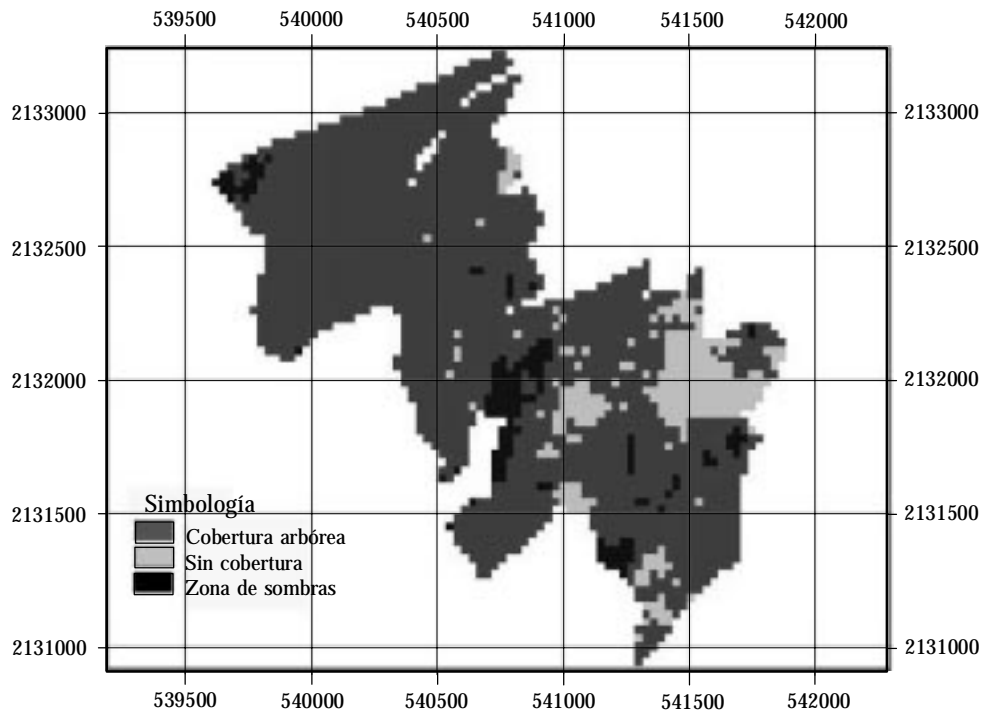
**Figura 3. Cobertura de copas obtenida mediante clasificación de la imagen Ikonos.**  
**Figure 3. Crown cover obtained by classification of the Ikonos image.**



**Figura 4. Cobertura de copas obtenida mediante clasificación de la imagen QuickBird.**  
**Figure 4. Crown cover obtained by classification of the QuickBird image.**



**Figura 5. Cobertura de copas obtenida mediante clasificación de la imagen SPOT-4 HRVIR.**  
**Figure 5. Crown cover obtained by classification of the SPOT-4 HRVIR image.**



**Figura 6. Cobertura de copas obtenida mediante clasificación de la imagen LANDSAT-7 ETM+.**  
**Figure 6. Crown cover obtained by classification of the LANDSAT-7 ETM+ image.**

imágenes es su moderada resolución espacial, ya que los datos captados por este tipo de sensores generalizan demasiado la condición de la cobertura de copas. Así, las estimaciones se alejan considerablemente de la condición real. Además, con las imágenes SPOT y LANDSAT se sobreestima la cobertura vegetal comparado con los datos obtenidos con métodos de campo.

### CONCLUSIONES

El análisis realizado mostró que las imágenes de alta resolución Ikonos y QuickBird son adecuadas para determinar rápida y expeditamente el porcentaje de cobertura de copas en áreas con vegetación de pino, cuando no se cuenta con información de campo o ésta es muy reducida. Contrariamente, las imágenes SPOT y LANDSAT dieron estimaciones que difieren considerablemente de los valores obtenidos con métodos de medición en campo. El presente análisis es para una condición muy específica, bosque de pino, en un predio de superficie muy reducida. Aunque el análisis puede servir de guía para mejorar la toma de decisiones en el futuro en este tipo de vegetación, no debe considerarse fundamental para decisiones en predios con masas forestales diferentes.

### AGRADECIMIENTOS

Al personal técnico de las Gerencias de Planeación y Evaluación y de Silvicultura y Manejo por proporcionar las imágenes, y a la CONAFOR por asignar recursos para este estudio.

### LITERATURA CITADA

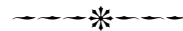
- De Vries, P. G. 1986. *Sampling Theory for Forest Inventory: A Teach-Yourself Course*. Springer-Verlag. 399 p.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2003. Reglas de operación para el otorgamiento de pagos del Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), México. 3 de octubre 2003.
- Digital Globe. 2005. QuickBird Imagery Products, Product Guide. Logmont, Colorado, USA. 68 p.
- Forestry Suppliers, Inc. 2005. *Forestry, Engineering, Environmental Science Catalog 55*. Jackson, MS. 652 p.
- Franklin, S. E. 2001. *Remote Sensing for Sustainable Forest Management*. Lewis Publishers. 407 p.
- INEGI. 1987. *Síntesis geográfica, nomenclátor y anexo cartográfico del Estado de Puebla*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México, D.F. 56 p.
- Jamalabad, M. S., and A. A. Abkar. 2004. Forest canopy density monitoring using satellite data. *In: Proceedings of the XXth International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) Congress, Commission 7, Istanbul, Turkey*. (Versión Digital).

This is evident when observing, in the results obtained with these images, large areas covered with masses of tree cover, and also relatively large spaces labeled as areas without vegetation or shadows. Such conditions are incorrect, since they were not observed in this way in the field nor in the high resolution images (Figure 1). The fundamental factor that defines the low degree of usefulness of these images is their moderate spatial resolution, since the data captured by this type of sensors over-generalize the crown cover condition. Thus, the estimations are considerably distant from real conditions. Moreover, using SPOT and LANDSAT images plant cover is overestimated as compared with data obtained with field methods.

### CONCLUSIONS

The analysis performed showed that the high resolution Ikonos and QuickBird images are suitable to determine rapidly and efficiently the percentage of crown cover in areas with pine vegetation when field information is not available or is scarce. In contrast, SPOT and LANDSAT furnished estimations that differed considerably from the values obtained by field measurement methods. This study analyzes a very specific condition, pine forest, in a very small plot. Although the analysis can serve as a guide for future decision-making regarding this type of vegetation, it should not be considered fundamental for decisions about plots with different forest masses.

—End of the English version—



- Jensen, J. R. 1996. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Prentice Hall. New Jersey, USA. 318 p.
- Leyca Geosystems. 2003. ERDAS IMAGINE 8.7. Documentos técnicos en formato digital.
- Mäkelä, H., and A. Pekkarinen. 2004. Estimation of forest stand volumes by Landsat TM imagery and stand-level field-inventory data. *For. Ecol. Manag.* 196: 245-255.
- Mallinis, G., N. Koutsias, A. Makras, and M. Karteris. 2004. Forest parameters estimation in a European Mediterranean landscape using remotely sensed data. *For. Sci.* 50(4):450-460.
- Pu, R., B. Xu, and P. Gong. 2003. Oakwood crown closure estimation by unmixing Landsat TM data. *Int. J. Remote Sensing* 24(22): 4433-4445.
- Williams, M.S., P. L. Patterson, and H. T. Mowrer. 2003. Comparison of ground sampling methods for estimating canopy cover. *Forest Sci.* 49(2): 235-245.