



Utilización de imágenes de satélite en el manejo forestal del noreste de México

Using satellite images for forest management in northeast Mexico

Lucio Ancira-Sánchez^{1,*} y Eduardo Javier Treviño Garza²

¹ Departamento de Ecología y Recursos Naturales.
Centro Universitario de la Costa Sur. Universidad de
Guadalajara. Guadalajara, México.

² Departamento de Silvicultura y Manejo Forestal.
Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Au-
tónoma de Nuevo León. Nuevo León, México.
ejtrevin@fcf.uanl.mx

* Autor de correspondencia. lucio.ancira@cucusur.udg.mx

RESUMEN

Este trabajo presenta una alternativa metodológica para la generación de información usada en la planificación de las actividades forestales. Se tomó como sitio de experimentación un predio forestal ubicado al sur del estado Nuevo León. Las metodologías se basaron en el empleo de imágenes de satélite de alta resolución las cuales han sido validadas utilizando los materiales tradicionales (fotografías aéreas) que sirvieron para describir la distribución de los recursos forestales del área y para hacer una comparación en cuanto a la calidad de la información obtenida de estos dos materiales. Estos materiales fueron procesados con el apoyo de equipo y software especializado que se encuentra en el Laboratorio de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica de la Facultad de Ciencias Forestales de la UANL. Se realizó una comparación de la rodalización efectuada sobre la ortofoto y en la imagen de satélite, con cubrimiento para el área de estudio, encontrando que la efectuada sobre la imagen de satélite presentó calidad suficiente para identificar mejor la composición de especies y la estructura de edades. El uso de imágenes de satélite de alta resolución para la elaboración de la cartografía forestal ofrece ventajas sobre las ortofotos, en especial por la resolución espectral, que facilita en algunos casos la rodalización, presentan la posibilidad de obtenerse repetidamente, se pueden procesar digitalmente y obtener otras variables como los índices de vegetación.

PALABRAS CLAVE: comparación, fotografías aéreas, ortofotos, percepción remota, rodalización.

ABSTRACT

This work presents a methodological alternative for the generation of information used in the planning of forestry activities. A forest venue located in the south of the state of Nuevo Leon was taken as a site of research. The methodologies were based on the use of high-resolution satellite images which have been validated using the traditional materials (aerial photos) which served to describe the distribution of forest resources of the area and to make a comparison with regard to the quality of information obtained from these two materials. These materials were processed with the support of computer and specialized software from the Laboratory of Remote Sensing and Geographic Information Systems located in the Division of Forest Sciences of the UANL (Universidad Autonoma de Nuevo Leon). A comparison of the forest standing was made on the orthophoto and on the satellite image, with coverage for the area of study, finding that the one carried out on the satellite image presented sufficient quality to better identify the species composition and age structure. The use of high-resolution satellite images for the development of the forest mapping offers advantages over the orthophotos, in particular by the spectral resolution, which makes the forest standing in some cases easier, have the potential to be obtained repeatedly, can be processed digitally and obtain other variations such as vegetation indices.

KEY WORDS: comparison, aerial photographs, orthophotos, remote sensing, forest stand generation.

INTRODUCCIÓN

El manejo forestal es un proceso que involucra la toma de decisiones en las fases de organización, planeación, administración y control de operaciones que son llevadas a cabo en una propiedad forestal para alcanzar objetivos específicos en forma eficiente (Hann y Bare, 1982). Los ecosistemas forestales proporcionan una variedad de bienes y servicios que la sociedad demanda. Entre los principales satisfactores que proporciona el bosque se pueden mencionar: madera, forraje para la fauna y ganado, producción de agua, belleza escénica para la recreación, fauna cinegética, peces, entre otros, así como diversos bienes intangibles de los cuales se pueden mencionar la captura de carbono, la protección del suelo y la conservación de la biodiversidad.

Actualmente, debido a la magnitud e importancia de los recursos forestales, se ha hecho indispensable el uso de nuevas tecnologías de análisis geográfico como herramienta de apoyo en la planeación, ejecución e integración de inventarios, así como en el análisis ecológico, silvícola, socioeconómico y en la formulación de programas de manejo forestal (González, 2003). Así mismo, cabe mencionar, que para la planificación de las actividades forestales se cuenta con valiosas fuentes de información sobre los rasgos geográficos de la superficie terrestre tales como las fotografías aéreas y los mapas temáticos que nos apoyan en la toma de decisiones. Sin embargo, en algunos casos esta información que proporcionan, no está actualizada ni posee la escala apropiada.

Para solucionar este problema, se propone como una alternativa al uso de las fotografías aéreas, utilizar imágenes de satélite de alta resolución. La resolución espacial que brindan estas últimas se ha incrementado prometiendo ser una fuente confiable de información con el detalle requerido para optimizar la planificación forestal.

La evaluación, clasificación y registro cartográfico de los diferentes tipos de vegetación así como la actualización de su cartografía, son prerrequisitos indispensables de cualquier tipo de manejo forestal, sobre todo para los programas de manejo intensivo (Aguirre, 2002). Las imá-

genes de satélite pueden cubrir un importante campo de aplicación, dada la posibilidad que tienen para observar los cambios ocurridos en la vegetación y la capacidad de estos sensores de poder representar periódicamente un área geográfica determinada (Treviño, 1992). Dentro de los elementos de cambio en la dasonomía, surgen las herramientas de la geomática, las cuales, vinculadas con bases dasométricas y ecológicas, permiten planear, manejar y evaluar los recursos forestales. Esto reduce considerablemente los costos, sin menoscabar la precisión de los estimadores de diagnóstico y utilización del ecosistema, enriqueciendo sus bases de datos, entre muchas otras aplicaciones.

En los diversos estudios forestales que se someten ante la autoridad, es común encontrar deficiencias particularmente en el ámbito cartográfico, ya que se elaboran mapas basados en fotografía aérea u ortofotos de baja resolución espacial. Por otro lado, se observan intentos que tienden hacia las innovaciones en tecnología geomática, pero carecen de homogeneidad en la integración y manejo de datos, así como en su aplicación al mundo real (Pompa y Treviño, 2003). Ante esta situación se propone emplear imágenes de satélite de alta resolución espacial proporcionadas por el sensor del satélite *Quick Bird*, para realizar la división dasocrática en predios forestales. Con ello se obtiene una delimitación más precisa de los diferentes rodales, ya que es posible observar la composición florística a nivel de géneros, la altura de la cobertura vegetal y se puede apreciar claramente el límite de la frontera agrícola.

Las imágenes de satélite han tenido una gran diversidad de aplicaciones en el sector forestal, sobre todo en la elaboración de la cartografía, en el reconocimiento de rodales y la identificación de diversos tipos de bosques. Así mismo, se han empleado en la determinación de las etapas de crecimiento, en estudios de la regeneración y la determinación de las etapas sucesionales y en la evaluación tanto de la incidencia de incendios forestales, como de los cambios ocurridos en la vegetación (Treviño, 2001).

Con disponibilidad a partir de 1998 de imágenes con resolución de 1 m se ha posibilitado la diferenciación de



clases de edades dentro del bosque (Franklin *et al.*, 2001) y la separación de especies (Masato, 2004). Las imágenes de satélite han sido empleadas para detectar cambios de uso del suelo en grandes áreas (Treviño *et al.*, 1996). Por su parte, la alta resolución de las imágenes Ikonos permiten ver cambios a escalas pequeñas (Haverkamp y Poulsen, 2003) lo que permitirá la planeación urbana. Las imágenes Ikonos se han empleado de la misma manera para evaluar la clasificación en bosques degradados (Prabhakar *et al.*, 2006), cuantificar la cantidad de sombras del dosel de la selva (Asner y Warner, 2002) o clasificar áreas donde la vegetación forma un complejo mosaico de diferentes tipos de vegetación (Widayati *et al.*, 2002), labores que en el pasado estaban restringidas dada la mezcla de información que se provocaba por la baja resolución de otros sensores. La geometría del sensor del satélite Ikonos ha permitido el producir sin dificultad ortoimágenes (Jacobsen, 2003; Guevara *et al.*, 2002) que han servido para la cartografía a escalas 1: 25 000 y 1: 10 000.

Treviño (1992), Correa y Treviño (1994), García *et al.*, (1999) y Bazaldúa-Piña (1997) han utilizado imágenes de satélite en la elaboración de cartografía de la vegetación para la zona montañosa de la Sierra Madre Oriental, en detección de cambios de uso del suelo que han sufrido áreas determinadas a través del tiempo, así como, para conocer el estado de la vegetación, su clasificación y para monitoreo de hábitat de fauna silvestre. La metodología del procesamiento digital de imágenes de satélite también se ha usado para determinar sitios con diferentes grados de productividad de las zonas boscosas de *Pinus cembroides* (Castillo y Treviño, 1997), en la caracterización de áreas agrícolas con problemas de salinidad (Verástegui *et al.*, 1997) y para detectar cambios en la cobertura vegetal ocasionada por incendios (Rullán, 2002), así como para modelar la peligrosidad de ocurrencia de incendios forestales (Muñoz, 2001). Por otra parte, Salinas y Treviño (2002), realizaron un análisis multitemporal mediante el empleo de imágenes de satélite para determinar las tasas de cambio del uso del suelo que han tenido lugar en una subcuenca de la zona centro del Estado de Tamaulipas, México.

Las fotografías aéreas han sido utilizadas tradicionalmente en el manejo de los recursos forestales, algunos autores consideran que, aún con el advenimiento de las imágenes de satélite difícilmente serán sustituidas a corto plazo, incluso serán complementarias por la familiaridad del técnico con estas; destacan por su nivel de resolución apropiados para la planeación y uso de los recursos forestales. Sin embargo, se siguen usando de manera habitual delineando áreas de vegetación homogénea mediante características de tono, textura y topografía de la imagen, desaprovechando las oportunidades que ofrecen las nuevas tecnologías (Pompa y Treviño, 2003).

Hoy en día es posible la transformación de información impresa a digital a través de procesos de escaneo. Existen múltiples programas sofisticados, de costos accesibles que producen ortofotos a partir de las fotografías aéreas digitalizadas, apoyados en modelos digitales de elevación, puntos de enlace y puntos de control de la superficie terrestre. La ortofoto se puede definir como una fotografía aérea digital de la que se han eliminado las deformaciones causadas por la óptica de la cámara y por el desplazamiento del relieve. Por estas características, las ortofotos se consideran como una fuente de datos que combina las características propias de la fotografía aérea con cualidades geométricas cartográficas (Muñoz y Treviño, 2000).

La planificación del manejo forestal requiere una amplia gama de información que no solo involucra la propia vegetación del bosque (composición de la especie, edades, etc.), sino también las características del terreno (elevación, pendiente, etc.), vías de acceso y límites de propiedad de tierra. Esta información espacial normalmente se encuentra disponible en formato de mapas, fotografías aéreas e imágenes de satélite.

Pompa y Treviño (2003), utilizaron imágenes Landsat-TM para desarrollar una clasificación de estados sucesionales forestales que pueden ser integrados a un SIG, así como el uso de los SIG para combinar fotografías aéreas y datos de campo en las áreas de aprovechamiento para identificar y cuantificar los disturbios causados al suelo,

en estimaciones de área basal mediante la relación entre medidas de campo con algunas variables ecofisiográficas en un modelo de regresión. Actualmente, existen una gran variedad de trabajos y proyectos sobre temas forestales los cuales involucran el uso de SIG e imágenes de satélite, cada uno de ellos tratando de entender las interrelaciones entre los factores de medio físico y la biota propia del lugar (Bazaldúa-Piña, 1997; Masato, 2004; Treviño, 2001; Pompa y Treviño, 2003; González, 2003), con el objetivo de minimizar el grado de impacto en sus masas forestales, quedando de manifiesto que, la principal ventaja del uso de sensores remotos en el manejo forestal es la facilidad de evaluar los tipos de uso de suelo y cobertura vegetal, orientando los trabajos de campo durante el desarrollo de inventarios, así como la sistematización de información para que esta sea verídica, oportuna y confiable.

OBJETIVOS

Objetivo General

Proponer nuevas tecnologías en el uso de sensores remotos de alta resolución para generar información dasométrica para el manejo forestal.

Objetivos particulares

- Incorporar el uso de imágenes de satélite de alta resolución como alternativa a la fotografía aérea para generar información dasométrica.
- Emplear fotografías aéreas para comparar los resultados obtenidos con la imagen de satélite.
- Utilizar información del inventario forestal para obtener existencias volumétricas mediante ponderación con fotografías aéreas e imágenes de satélite y comparar resultados obtenidos con ambos materiales.
- Integrar la información obtenida por las técnicas anteriores dentro de un SIG para analizarla, procesarla y emplearla para la elaboración del Programa de Manejo del área de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Selección del área de estudio

Se seleccionó un área de alta producción forestal de los ejidos Alfonso Corona del Rosal y Pablillo, que se ubican en el municipio de Galeana, al suroeste del estado de Nuevo León, ocupando en total una superficie de 21 209 ha. Geográficamente se localizan entre los 24° 27' y los 24° 39' de latitud norte y entre los 99° 54' y los 100° 05' de longitud Oeste (Fig. 1).

El clima en esta zona es templado, la temperatura media anual es de 15 °C y la mayor incidencia de precipitación pluvial ocurre en el mes de septiembre, con lluvias que van de 110 mm a 120 mm. La topografía es irregular, con un gradiente altitudinal de 1850 metros, presentándose la menor altitud a los 1300 m snm y la mayor altitud a los 3150 msnm. Los tipos de vegetación que se encuentran en el área son muy variados, predominando los chaparrales en distintos grados de

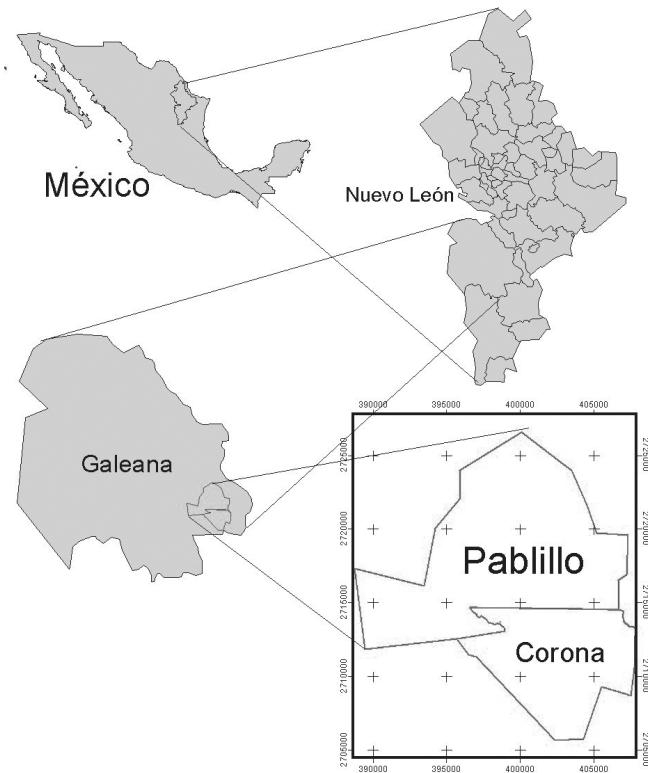


FIGURA 1. Ubicación del área de Estudio.



asociación con bosques de clima templado y algunos matorrales. Se encuentran, además, bosques puros de pino, cuya especie dominante es *Pinus pseudostrobus* y bosques mezclados de pino-encino en diversos grados de asociación y, por último, áreas en donde se practica la agricultura de temporal y la inducción de pastizales para el pastoreo de ganado (Ucodefo, 1995 y 1997).

Trabajo de campo

Para la realización del inventario forestal en ambos predios se llevó a cabo un muestreo estratificado aleatorio. Para facilitar los trabajos operativos de campo en la realización del inventario forestal se procedió primero a trabajar con el Ejido Alfonso Corona del Rosal. Se utilizó el mapa de vegetación actualizado elaborado por Muñoz (2001), el cual se compone de 35 diferentes tipos de vegetación y uso del suelo; sin embargo, para fines prácticos se modificó y se redujo solo a 7 clases de las cuales 6 corresponden a los principales tipos de vegetación con potencial maderable (bosque de pino, pino-encino, encino-pino, pino-chaparral, encino-chaparral y encino-pino-chaparral) y una a otros tipos de vegetación sin potencial maderable y otros usos del suelo.

Para calcular el tamaño de muestra (n) para cada estrato se realizó un premuestreo, levantándose 5 sitios circulares de 500 m^2 en cada estrato, los cuales se distribuyeron de forma aleatoria. Para la obtención de las coordenadas de los centros de los sitios para cada estrato se utilizó el mapa que se obtuvo de la estratificación (6 tipos de vegetación) del predio y se desplegó en el programa Arc View GIS® versión 3.1. Se obtuvieron los cuadrantes con las coordenadas en UTM que encierran a los estratos, estas coordenadas se capturaron en el programa Excel y se corrieron con el comando “aleatoria” para obtener 5 coordenadas en X y 5 en Y. Enseguida, estas coordenadas se insertaron dentro del mapa georeferido para determinar su validez, es decir, si se colocaban dentro de los estratos establecidos y para observar si tenían buena accesibilidad para lo cual se contó con una cubierta de caminos (Fig. 2).

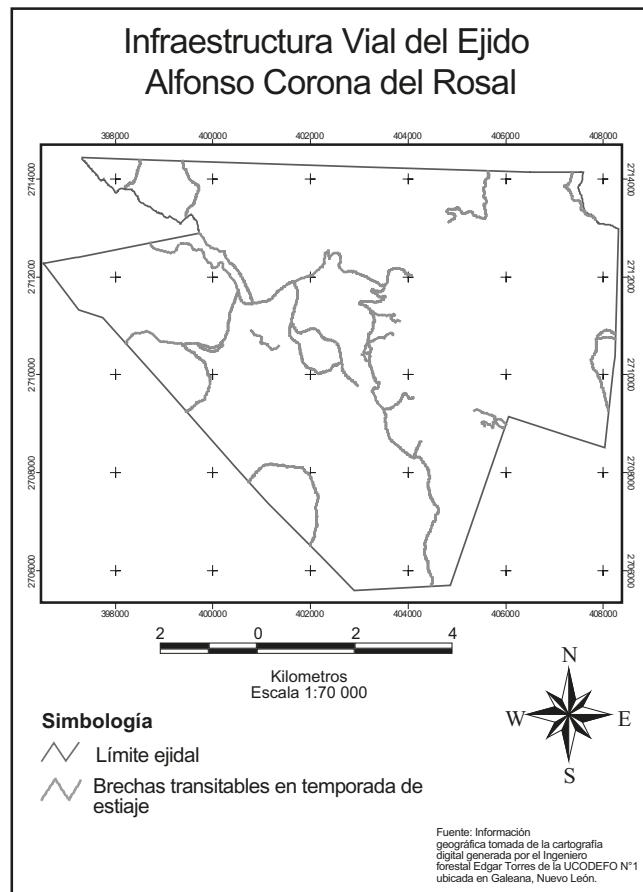


FIGURA 2. Mapa de caminos del ejido Corona del Rosal.

Para la localización de los centros de los sitios en el campo se apoyó con un Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

Una vez realizado el premuestreo se calculó el tamaño de muestra mediante la siguiente fórmula:

$$n = \frac{t^2 * Sx\%^2}{S\bar{x}\%^2}$$

Donde:

- n = tamaño de muestra
- t = valor t de *Student* (con 2 grados de libertad y un valor de probabilidad de 90%)
- $Sx\%$ = coeficiente de variación
- $S\bar{x}\%$ = error estándar porcentual

Los resultados obtenidos para este cálculo son los siguientes:

TABLA 1. Resultados para el cálculo de tamaño de muestra(n) para el ejido Alfonso Corona del Rosal.

Estrato	VOL. PROM. (M ³ /HA)	DESV. EST. /SIT.	COEF. VAR.	ERR. EST. ABS.	ERR. EST. PORC.	NUM. SIT.	NUM. SIT. LEV.	INTEN. APLIC.
B-E-P-CH	182,11	132,06	72,52	59,06	32,43	20	5	1
B-E-CH	48,6	9,66	19,86	4,32	8,88	20	10	1,1
B-P	81,86	33,87	41,38	15,15	18,5	20	20	0,1
B-E-P	224,19	123,31	55	55,15	24,6	20	20	0,1
B-P-E	267,84	81,11	30,28	36,28	13,54	20	20	0,21
B-P-CH	237,6	143,61	60,44	64,23	27,03	20	20	0,11

VOL.: Volumen
ABS.: Absoluto

PROM.: Promedio
PORC.: Porcentual

DESV.: Desviación
NUM.: Número

EST.: Estándar
SIT.: Sitio

COEF.: Coeficiente
LEV.: Levantado

VAR.: Variación
INTEN.: Intensidad

ERR.: Error
APLIC.: Aplicada

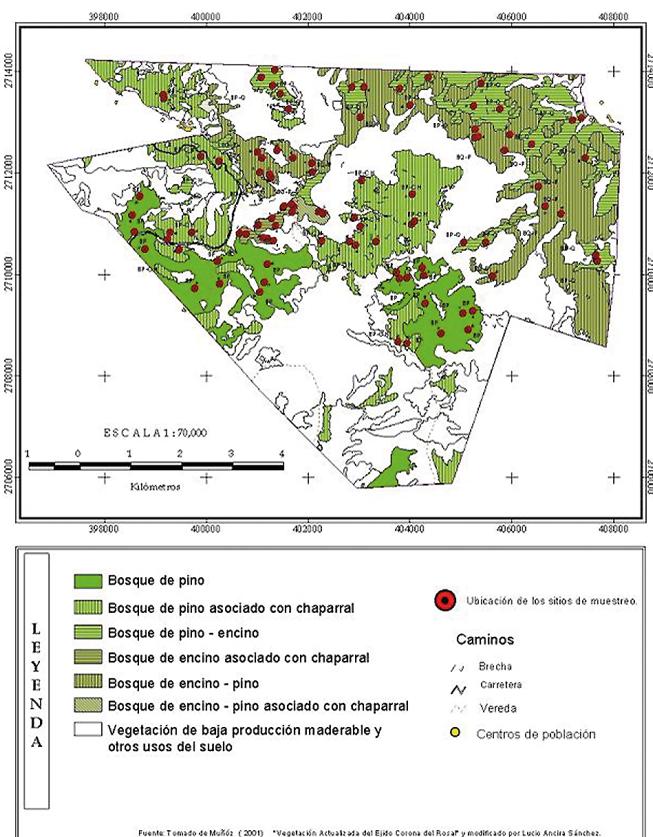
Se contempló un total de 95 sitios para llevar a cabo el inventario forestal en el ejido Corona del Rosal. Para la ubicación y localización de los sitios de muestreo se procedió de la misma manera que en los sitios del premuestreo. Las coordenadas de los centros de los sitios de muestreo se ubicaron en el mapa estratificado del predio (Fig. 3).

En lo que respecta al inventario forestal del ejido Pablillo, se utilizó la misma metodología que en el predio del Ejido Alfonso Corona del Rosal. De igual forma se obtuvieron 6 estratos con potencial maderable y uno con vegetación sin potencial maderable, a través de la clasificación de la imagen de satélite Landsat ETM de 2001, utilizando el método de máxima probabilidad en el programa Erdas Imagine® 8.7. y con apoyo del mapa de vegetación de Muñoz (2001). Los estratos corresponden a los siguientes tipos de vegetación: bosque de pino-encino, bosque de pino-chaparral, bosque de pino, bosque de encino, bosque de encino-pino y bosque de abies-encino-pino.

Se realizó el premuestreo forestal que consistió en levantar 5 sitios circulares de 500 m² en cada uno de los estratos, obteniéndose los resultados de la tabla 2.

El tamaño de muestra que se obtuvo para realizar el inventario forestal en el ejido Pablillo fue de 120 sitios (Fig. 4).

Trabajo de laboratorio: Ortofotos e interpretación de fotografía aérea.



Mapa de estratos (tipos de vegetación) y ubicación de los sitios de muestreo en el Ejido Corona del Rosal

FIGURA 3. Mapa de ubicación de los sitios de muestreo en el Ejido Alfonso Corona del Rosal.



TABLA 2. Resultados para el cálculo de tamaño de muestra (n), para el ejido Pablillo.

Estrato	VOL. PROM. (M ³ /HA)	DESV. EST. SIT.	COEF. VAR.	ERR. EST. ABS.	ERR. EST. PORC.	NUM. SIT.	NUM. SIT. LEV.	INTEN. APLIC.
B-A-E-P	9,05	6,15	58,6	2,75	26,2	20	20	0,30
B-P	4,44	2,01	44,26	0,89	19,79	20	20	0,16
B-P-CH	5,37	1,65	29,99	0,73	13,41	20	20	0,05
B-P-E	8,98	4,91	52,49	2,19	23,47	20	20	0,08
B-E	5,46	3,97	77,55	1,77	34,68	20	20	0,29
B-E-P	7,14	2,44	33,85	1,09	15,14	20	20	0,04

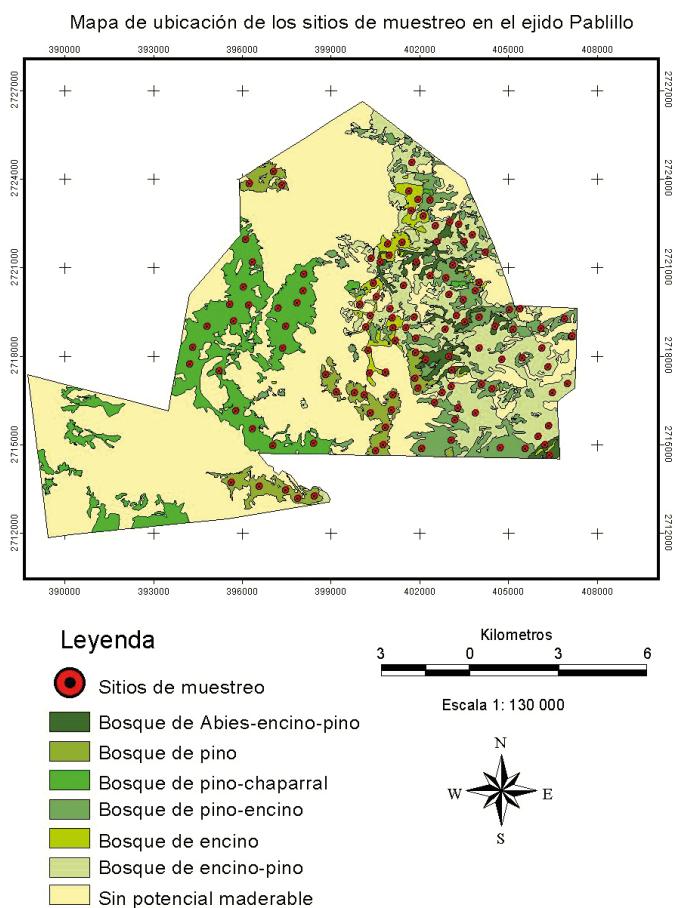
VOL.: Volumen
ABS.: AbsolutoPROM.: Promedio
PORC.: PorcentualDESV.: Desviación
NUM.: NúmeroEST.: Estándar
SIT.: SitioCOEF.: Coeficiente
LEV.: LevantadoVAR.: Variación
INTEN.: IntensidadERR.: Error
APLIC.: Aplicada

FIGURA 4. Mapa de ubicación de los sitios de muestreo en el ejido Pablillo.

Mediante las técnicas de fotointerpretación y fotogrametría se realizó la interpretación de las fotografías aéreas que cubren el área de estudio para poder obtener los mapas de vegetación y de rodales. En primer término, se llevó a cabo la producción de ortofotos digitales para realizar la rodalización y actualizar la carta de vegetación y uso del suelo, editada en 1975 por el Inegi con cubrimiento para los dos predios. Las dimensiones de las fotografías utilizadas son de 23 cm x 23 cm, a una escala nominal de 1:75 000 y fechas de vuelo de enero de 1996 y agosto de 1999. Se digitalizaron 3 fotografías correspondientes a la zona G-14-10 con línea de vuelo 156, fotos número 7, 8 y 9 y otras 3 fotografías aéreas correspondientes a la zona G14-11 con línea de vuelo 157 y fotos 7, 8 y 9. La resolución bajo la cual se escanearon las fotos aéreas fue de 1905 puntos por pulgada (dpi) para obtener una resolución espacial de 1 metro, similar a la resolución espacial de la Imagen satelital.

El proceso de digitalización consistió en escanear las fotografías aéreas mediante el scanner A3, marca Epson Expression, modelo 1640XL, una vez escaneadas las fotografías aéreas se procesaron a través del paquete Geomatica® versión 9, modulo OrthoEngine, donde se realizó la corrección y georeferenciación de las fotografías aéreas digitalizadas que consistió básicamente en:

- Importar la imagen de la fotografía aérea digitalizada.
- Elegir del modelo matemático que permitiera corregir las distorsiones de la fotografía adquiridas en el momento que fue tomada debido a la estructura de la cámara.
- Elegir del tipo de sistema de coordenadas en la que se proyectaría la imagen.
- Calibrar la cámara, es decir, ingresar los datos de las características de la cámara, así como la escala de la fotografía, el grado de curvatura, el radio de curvatura en metros, además, se señala la distancia de las marcas fiduciarias, en milímetros, con respecto a la marca inferior izquierda.
- Ingresar puntos de control (coordenadas UTM y la altitud) del terreno de forma manual, o bien obtener de mapas temáticos, de GPS y mediante la tableta digitalizadora o de manera automática, utilizando imágenes georeferidas o modelos de datos vectoriales. Estos crearon las relaciones entre la imagen cruda y el terreno (El error medio cuadrático permitido fue de hasta 15 píxeles, considerando un tamaño de píxel de 1m).
- Ingresar puntos de enlace manualmente, los puntos de enlace consisten en indicar dos puntos mínimos por fotografía que se ubiquen en el área de traslape para generar relaciones entre las imágenes para que estas se puedan ligar.
- Correr modelos matemáticos generados hasta ese momento con los puntos de control y los puntos de enlace. Este proceso fue aprobado por el *software* antes de continuar con los siguientes pasos.
- Utilizar un Modelo Digital de Elevación del Terreno (MDET) que cubriera el área de las fotografías.
- Pasar la imagen por un proceso de ortorectificación, usando un riguroso modelo matemático y el modelo digital de elevación para corregir distorsiones de la imagen y georeferirla.
- Por último unir varias imágenes (Mosaico), que permitieran cubrir el área de estudio.

A cada fotografía aérea digital que fue procesada con el *software* antes mencionado, se le indicaron las marcas

fiduciarias, así como 20 puntos de control obtenidos de cartas topográficas y puntos de enlace para cada fotografía como se muestra en la figura 5.

Una vez obtenida la ortofoto que cubría los dos predios, que se logró mediante la unión de cada una de las 6 fotografías aéreas corregidas y georeferidas, se procedió a realizar la interpretación visual que consistió en emplear algunos criterios tales como: la textura (grano grueso, grano fino), la tonalidad de la cobertura vegetal, geoforma del relieve terrestre, exposición, pendiente y las formas de las copas de los árboles que se pudieran distinguir con la escala de la ortofoto que fue de 1: 75 000.

Después de realizar la interpretación visual en la ortofoto con el programa Erdas® Imagine 8.7, que consistió en delimitar por medio de líneas los diferentes tipos de coberturas del área de estudio, el archivo generado (en formato vectorial) fue transferido al programa Arcinfo® para realizarle

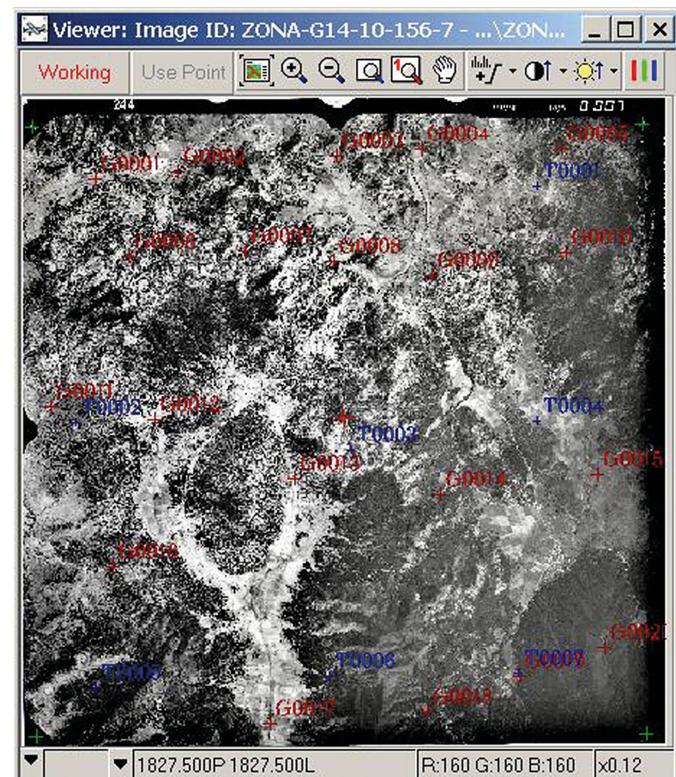


FIGURA 5. Fotografía aérea digital con marcas fiduciarias (verde), puntos de control (rojos) y puntos de enlace (azules) capturados.



un proceso de depuración o eliminación de los diferentes elementos que componían una cobertura vectorial, (arcos, nodos, polígonos y etiquetas) cuando la existencia de estos no tenía sentido. Luego se pasaron a etiquetar, en el mismo programa, cada uno de los polígonos que integraban la cobertura vectorial mediante un código numérico. Por último, la cobertura fue desplegada en el programa Arc View GIS® versión 3.2., para su edición. Para obtener las superficies de cada estrato se exportó la base de datos tabular del vector al programa Excel; en el cuál por medio de una tabla dinámica se obtuvieron las superficies de cada estrato.

Procesamiento digital de imágenes e interpretación visual

Los métodos digitales para procesar las imágenes de satélite se dividen en tres grupos de procesos, los cuales implican la corrección, mejoramiento y extracción de información de los datos que existen. El primer grupo de procesamientos sirve para corregir la distorsión que se presenta en los datos durante la realización de la toma. Estas correcciones de tipo geométrico se realizaron en la imagen de satélite que se empleó en el presente trabajo para referenciarla adecuadamente. Se utilizó una imagen de satélite pancromática de alta resolución de 60 cm por 60 cm por píxel, la cual se

tomó el 25 de septiembre del 2005, con el satélite QuickBird (USA). La imagen presentaba un ligero desplazamiento de aproximadamente 20 metros con respecto a las coordenadas del límite de los predios, el cual fue corregido utilizando el programa Erdas Imagine® versión 8.7, mediante un modelo polinomial de grado 7. Se cortó la imagen que cubre específicamente el área de los predios y se realizó una interpretación visual con el fin de separar los rodales.

Los criterios utilizados para separar los tipos de vegetación con potencial maderable y no maderables en ambos predios, empleando la imagen satelital, fueron similares en comparación con la ortofoto, sin embargo, la imagen presentaba algunas ventajas, por ejemplo la alta resolución, permitiendo apreciar la forma y tamaño de las copas de los árboles y diferenciar la altura de la cobertura vegetal. Por consiguiente, los criterios utilizados para identificar las especies a nivel de género en adición a los empleados en la ortofoto, fueron la forma de las copas, el tamaño, la tonalidad de la cobertura vegetal, altura aparente de la vegetación, geoforma del relieve terrestre, exposición y pendiente. Mediante un conocimiento preciso de algunas áreas que se visitaron durante el inventario forestal, se pudo identificar la composición de géneros, al observar esa misma área en la imagen satelital, tal como lo muestra la figura 6.

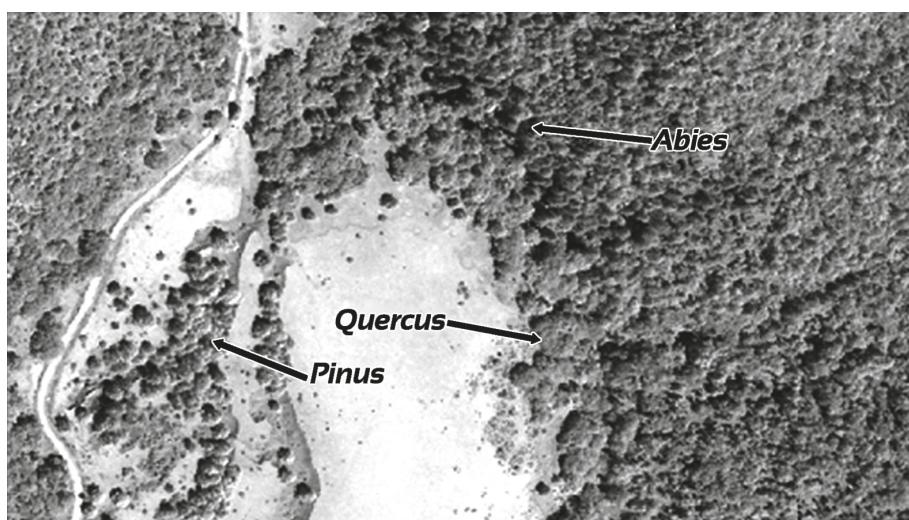


FIGURA 6. Recorte de una fracción de la imagen de satélite de alta resolución dentro del ejido Pablillo, utilizada en el presente trabajo, donde se identifica a nivel de género tres elementos florísticos.

RESULTADOS

Como resultado de la interpretación visual realizada sobre la ortofoto que se generó y sobre la imagen de satélite adquirida, se obtuvo la división dasocrática a nivel de estrato con cubrimiento para los dos predios. Del inventario forestal que se aplicó a ambos predios se obtuvieron el área basal (G) por hectárea y el volumen de madera en metros cúbicos rollo total árbol (m^3 rtा) por hectárea por cada estrato. Los valores anteriores se extrapolaron a la superficie de cada estrato y así se obtuvieron las existencias totales de área basal y volumen para cada predio forestal. Lo anterior permitió hacer una comparación con las cantidades del recurso calculado a partir de la estratificación obtenida en ambos materiales (Tablas 3 y 4).

Resultados para el ejido Alfonso Corona del Rosal

Como resultado de la interpretación visual de la ortofoto se obtuvo la división dasocrática para cada ejido (Fig. 7).

Como producto final de la interpretación visual de la ortofoto y la imagen satelital se obtuvieron mapas de rodales o estratos para el ejido Alfonso Corona del Rosal (Fig. 8).

Las superficies obtenidas de cada estrato, las estimaciones de área basal (G) y volumen en metros cúbicos rollo total árbol (m^3 rtा) por hectárea mediante el procesamiento de los datos del inventario forestal en el programa Excel con ambos materiales se presentan en la siguiente tabla (Tabla 3).

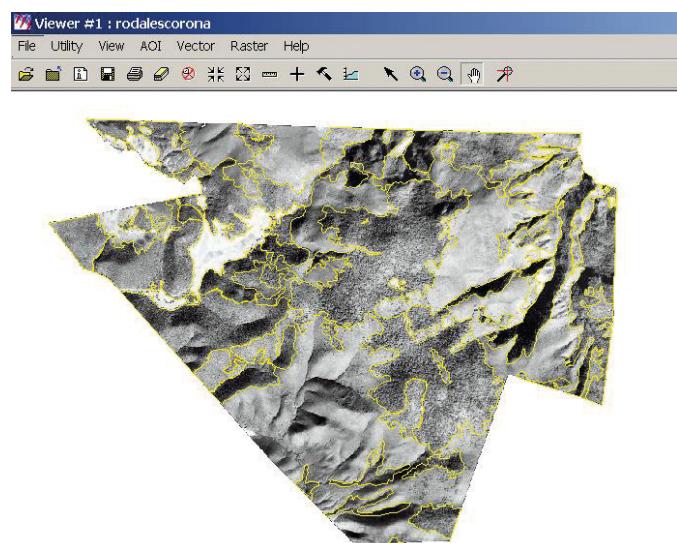


FIGURA 7. División dasocrática de las superficies arboladas del ejido Corona del Rosal.

Cincuenta y siete punto cinco por ciento de la superficie del ejido corresponde a los tipos de vegetación con potencial maderable como resultado de la rodalización con base en la ortofoto. Las superficies obtenidas para cada uno de los estratos mediante la rodalización en la imagen de satélite, presentan el mismo orden en magnitud de los valores que los resultados obtenidos con la ortofoto. De la rodalización que se obtuvo en la imagen de satélite,

TABLA 3. Superficies que cubren los seis estratos obtenidos con base en la rodalización sobre ortofoto e imagen satelital y las existencias totales de área basal y volumen para el ejido Alfonso Corona del Rosal.

Estratos	Superficie (ha)		G (m^2)		V(m^3 rtा)	
	Ortofoto	Imagen SAT.	Ortofoto	Imagen SAT.	Ortofoto	Imagen SAT.
Bosque de encino-pino	590,93	504,11	914,98	780,55	6443,65	5496,97
Bosque de encino-chaparral	93,34	284,17	37,33	113,63	181,35	552,10
Bosque de encino-pino-chaparral	35,70	94,66	59,56	157,91	578,72	1534,38
Bosque de pino	917,42	856,21	883,45	824,51	6381,36	5955,62
Bosque de pino-encino	878,00	851,86	1444,33	1401,33	14192,80	13770,24
Bosque de pino-chaparral	1306,06	998,54	1253,33	958,23	9832,54	7517,41
TOTAL	3821,45	3589,55	4592,97	4236,16	37610,41	34826,72



54% de la superficie corresponde a vegetación con potencial maderable, es decir, hay una diferencia en 3,5% con respecto a los resultados obtenidos en la ortofoto, por consiguiente, la superficie de la vegetación con potencial

maderable en la ortofoto podría estar sobreestimada en 231,89 ha, lo cual repercute en la sobreestimación de los demás parámetros al hacer la extrapolación de las estimaciones de la cantidad del recurso por superficie. Así mismo,

TABLA 4. Superficies que cubren los seis estratos obtenidos en base a la rodalización en la ortofoto e imagen satelital y las existencias totales de área basal y volumen para el ejido Pablillo.

Estratos	Superficie (ha)		G (m ²)		V(m ³ rta)	
	Ortofoto	Imagen SAT.	Ortofoto	Imagen SAT.	Ortofoto	Imagen SAT.
Bosque de abies-encino-pino	786,57	329,31	867,82	363,33	7544,45	3158,61
Bosque de encino	330,59	341,07	259,01	267,22	1241,30	1280,65
Bosque de encino-pino	1534,18	2156,01	1913,49	2689,07	12526,78	17604,11
Bosque de pino	582,33	611,27	498,87	523,67	2565,93	2693,45
Bosque de pino-chaparral	3868,03	1826,87	3300,35	1558,76	19615,03	9264,19
Bosque de pino-encino	1061,18	1138,18	1143,15	1226,10	8695,86	9326,85
TOTAL	8162,88	6402,71	7982,69	6628,15	52189,35	43327,86

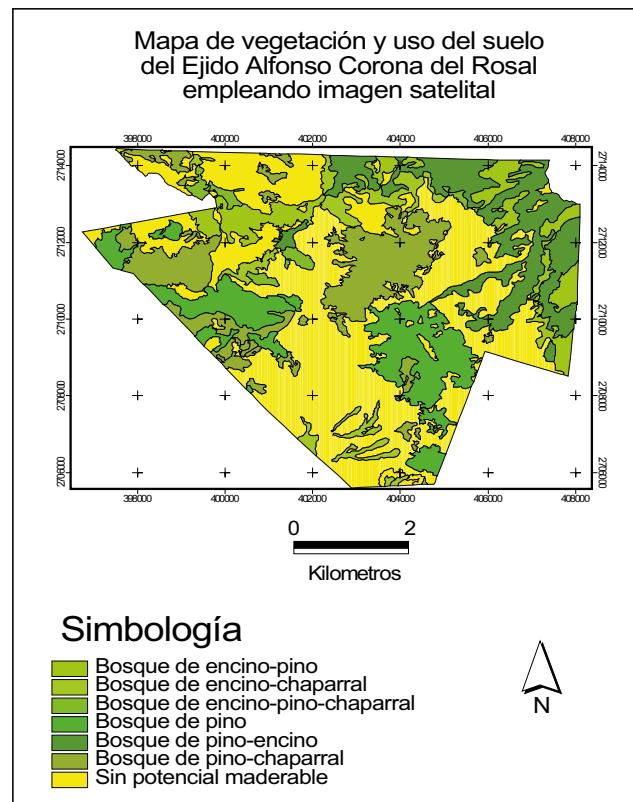
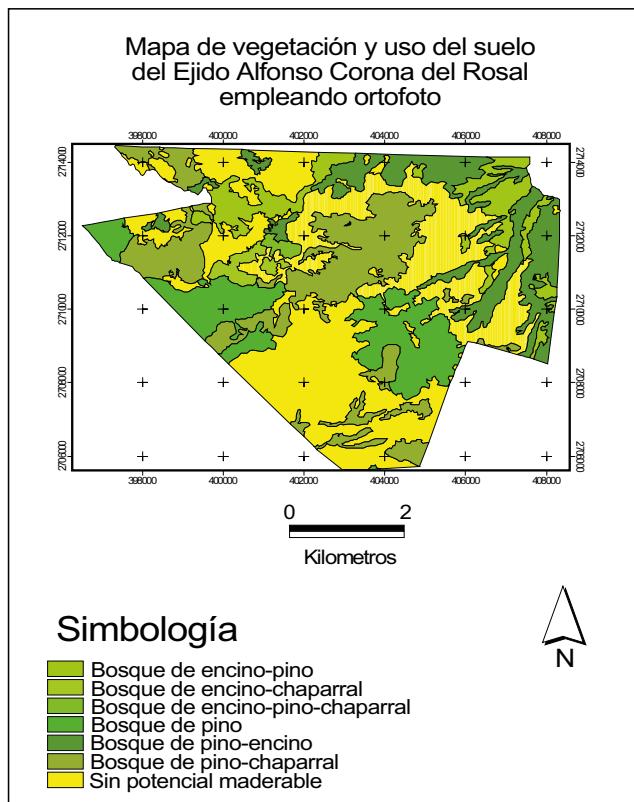


FIGURA 8. Mapa de Estratos resultado de la rodalización en la ortofoto e imagen de satélite.

el área basal podría estar sobreestimada en 356,82 m² y el volumen en 2783,7 m³ con respecto a la estimación con este material (imagen satelital).

Resultados para el ejido Pablillo

El ejido Pablillo limita al sur con el ejido Alfonso Corona del Rosal, por lo tanto, presenta condiciones ambientales similares y de igual forma se procedió a aplicar la misma metodología para obtener la división dasocrática en ambos materiales (ortofoto e imagen de satélite) y la caracterización dasométrica para hacer la comparación, además, estos resultados se compararon con los obtenidos en el ejido Alfonso Corona del Rosal. En primer término, se obtuvo la rodalización o estratificación sobre la ortofoto e imagen satelital (Fig. 9).

Empleando la ortofoto se obtuvieron 7 clases de tipos de vegetación o estratos, de las cuales una corresponde a vegetación sin potencial maderable y otros usos del suelo y las otras 6 a los diferentes tipos de vegetación con potencial maderable. Sin embargo, cuando se utilizó la imagen satelital se obtuvieron 8 clases de tipos de vegetación de las cuales uno correspondió a vegetación sin potencial maderable u otros usos del suelo (Tabla 4). El estrato que no fue identificado en la ortofoto no se incluyó en tabla por no tener su homólogo para fines comparativos.

Al igual que en el caso del ejido Alfonso Corona del Rosal, el estrato con potencial maderable que ocupó mayor superficie fue el bosque de pino-chaparral (empleando la ortofoto) el cual está compuesto principalmente por *Pinus cembroides* asociado con *Juniperus flacida*. Sin embargo, en el Ejido Pablillo se encontró un

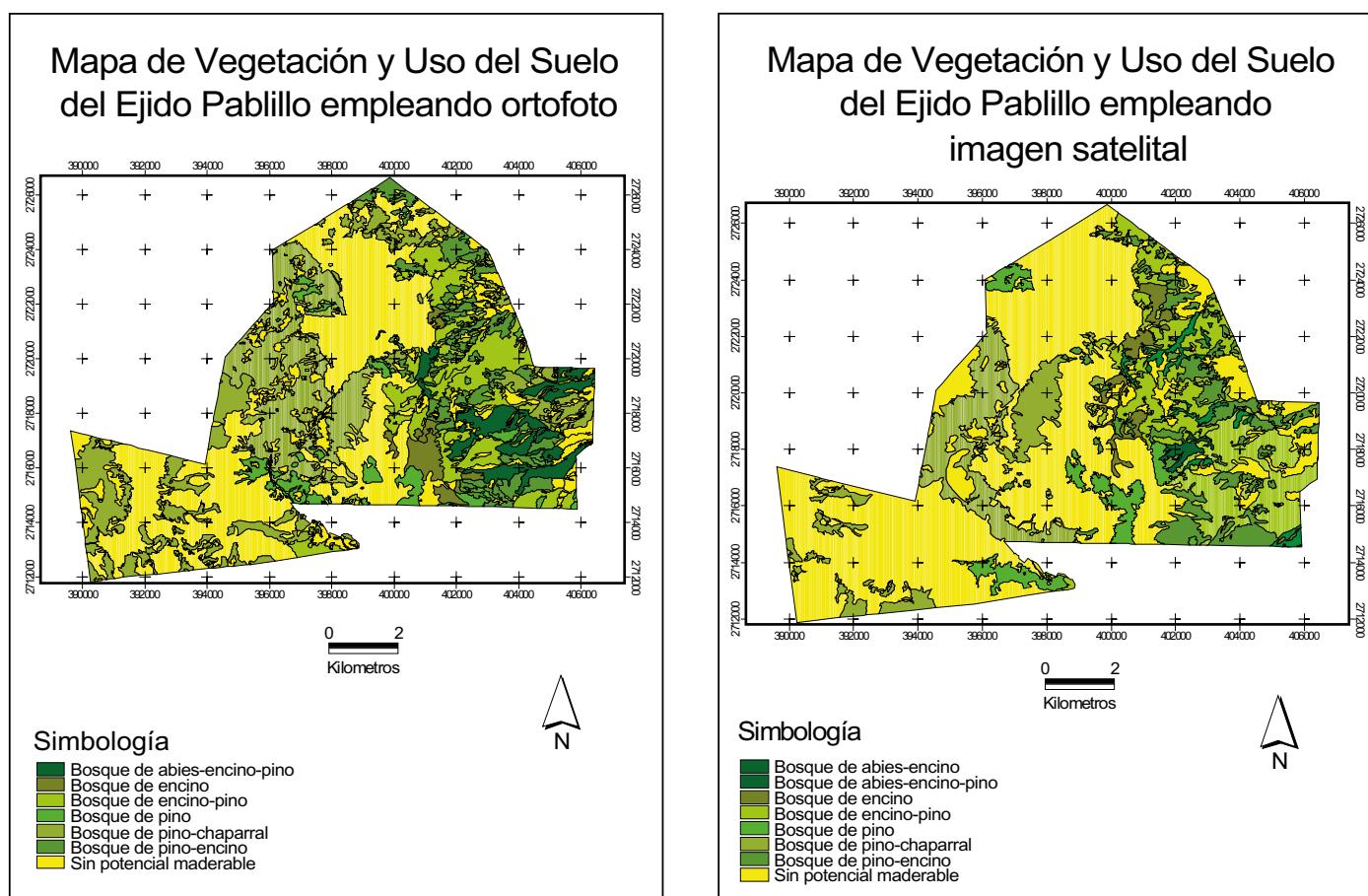


Figura 9. Mapa de rodales (cobertura vegetal) resultado de la interpretación visual sobre ambos materiales



género diferente de importancia forestal, el género *Abies*, cuya distribución obedece a exposiciones norte, geofomas cóncavas y forma asociaciones con los géneros *Quercus* y *Pinus*. Con la imagen pancromática de alta resolución se obtuvo una rodalización más fina, sin embargo, las superficies para cada estrato variaron con respecto a las obtenidas con la rodalización en la ortofoto, para este caso, el bosque de encino-pino resultó el de mayor superficie.

DISCUSIÓN

Como análisis de los resultados obtenidos con ambos materiales, para el Ejido Alfonso Corona del Rosal se encontró que la superficie con potencial maderable obtenida por la digitalización sobre la ortofoto, fue mayor en 231,9 ha con respecto a la obtenida con la digitalización sobre la imagen de satélite, así mismo, el área basal fue mayor en 356,81 m² y el volumen en 2783,69 m³ rta. En lo que respecta al Ejido Pablillo, la superficie con potencial maderable obtenida por la digitalización sobre la ortofoto superó en 1760,17 ha a la obtenida con la digitalización sobre la imagen de satélite, así mismo, el área basal en 1354,56 m² y el volumen en 8861,49 m³ rta.

Considerando que la imagen de satélite brinda más claridad en la identificación de los objetos que se encuentran en la superficie, esto podría traducirse en una sobreestimación de la cantidad y el valor de los recursos forestales. Lo anterior puede ocasionar conflictos, debido a que si se tiene planeado trazar brechas para extraer un volumen de madera que no es el real, podría ocasionar un desequilibrio en relación con el costo beneficio del producto a obtener con respecto a la inversión en infraestructura vial.

De acuerdo con los resultados obtenidos con respecto a las superficies de cada estrato en ambos ejidos, se observó que el tipo de cubertura vegetal compuesta por bosque de pino asociado con chaparral es el que mantiene la mayor diferencia, superando en 307,52 ha la obtenida con la ortofoto a la calculada con la imagen de satélite para el Ejido Alfonso Corona del Rosal. Esta diferencia fue más notoria en el Ejido Pablillo, encontrándose una diferencia

de 2041,16 ha de estos cálculos para el mismo tipo de estrato. Esto podría significar que este tipo de vegetación provoca confusión a la hora de realizar su delimitación sobre ambos materiales y sobre todo por el hecho de obtenerse de forma repetida.

Las imágenes de satélite tienen costos muy elevados, sin embargo, ofrecen varias ventajas de las cuales se pueden mencionar la periodicidad de las tomas, la alta resolución, lo cual permite tener más precisión en la rodalización de áreas forestales. Además, la imagen de satélite, por su carácter multiespectral, permite hacer varios análisis y extraer información de un área que mediante la interpretación visual no se posibilita; como es el caso de las clasificaciones supervisada y no supervisada que apoyan en la identificación de superficies con base en el comportamiento espectral de los objetos que cubren las imágenes de satélite.

CONCLUSIONES

Se comparó la rodalización realizada sobre la ortofoto y en la imagen de satélite, encontrando que la efectuada sobre la imagen de satélite presentó calidad suficiente para identificar mejor la composición de especies y la estructura de edades. El uso de imágenes de satélite de alta resolución para la elaboración de la cartografía forestal ofrece ventajas sobre las ortofotos, en especial, por la resolución espacial que facilita en algunos casos la rodalización, se pueden procesar digitalmente y obtener otras variables como los índices de vegetación.

El empleo de materiales de baja resolución o escalas pequeñas para la elaboración de la división dasocrática en un área forestal, puede ocasionar una baja precisión en la determinación de superficies arboladas con potencial comercial, lo cual repercute en una sobreestimación de los recursos y por consiguiente una presión sobre el bosque y un desequilibrio económico entre el valor de los productos forestales reales y la inversión en infraestructura vial que se requiera en los predios para la extracción de dichos productos. En este sentido el uso de las imágenes de satélite de alta resolución presentan una alternativa viable en la planificación de las actividades forestales.

REFERENCIAS

- Aguirre Z., E. 2002. Evaluación de cambios de vegetación en la Sierra de San Carlos, Tamaulipas, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Forestales, UANL, Linares, N. L. 63 p.
- Asner, G. P. y S. Warner A. 2002. Canopy shadow in ikonos satellite observations of tropical forest and savannas. *Remote Sensing and Environmental.* 87 (2003): 521-533.
- Bazaldúa-Piña, A. 1997. Aplicación de la percepción remota en el monitoreo del hábitat del venado bura del desierto (*Odocoileus hemionus crooki*) en el sur de Nuevo León. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Forestales, UANL, Linares, N. L. 73 p.
- Castillo H., A y E. J. Treviño G. 1997. Determinación y cartografía de calidades de sitio en los bosques de *Pinus cembroides* Zucc en los municipios de Aramberri y Galeana, N.L. a través de imágenes de satélite, III Congreso Mexicano sobre Recursos Forestales, Linares, N. L. México.
- Correa T., B. y E. J. Treviño G. 1994: Evaluación y cuantificación de los cambios de uso del suelo mediante el uso de sensores remotos empleando imágenes de satélite en el municipio de Linares N. L., III Simposio Regional de Biología y Ecología, Linares. N. L. México p. 22
- Franklin, S. E., A. Wulder M. y R. Gerylo G. 2001. Texture analysis of Ikonos panchromatic data for dowglas-fir forest age class separability in British Columbia. *International Journal of Remote Sensing.* 22(13): 2627-2632.
- García A., M., E. J. Treviño G., C. M. Cantú A. y F. N. González S. 1999. Zonificación ecológica del Cerro "El Potosí" Galeana, Nuevo León. México. Investigaciones Geográficas, Instituto de Geografía, U.N.A.M. 38. (1999): 31-40.
- Guevara V., A. Reyes , A. Salcedo R. y W. Torres. 2002. Evaluación de la ortorectificación de imágenes Ikonos. http://www.asovig.org/Documentos/Guevara_Victor_Ikonos %20.pdf
- González, M. R. 2003. Alternativas de manejo forestal mediante el desarrollo de conocimiento específico de sitio. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Forestales, UANL, Linares, N. L. 154 p.
- Hann, D. W. y B. Bare. 1982. Manejo de bosques incoetáneos Trad. P. Rivero B. Universidad Autónoma Chapingo, Depto. Bosques. Boletín Técnico 4. 30 p.
- Haverkamp, D. y R. Poulsen. 2003. Change Detection Using Ikonos Imagery (en linea). http://www.Spaceimaging.com/whitepapers_pdfs/2003/change%20Detection%20Using%20Ikonos20%Imagery-ASPRS%202003.PDF
- Jacobsen, K. 2003: Auswertung von quickbird and ikonos-aufnahmen. http://www.ipi.uni-hannover.de/html/publikationen/2003/paper/Jac0903_dgpf.pdf
- Masato, K. 2004. Classifying tree species in a northern mixed forest using high-resolution ikonos data. *Journal of Forest Research.* 9 (1): 7-14.
- Muñoz R., C. A. 2001. Elaboración de un modelo espacial de peligro de incendios forestales. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales. UANL. Linares, N. L. México. 119 p.
- Muñoz R., C. A. y E. J. Treviño G. (2000). Evaluación de combustibles forestales a través de índices de vegetación y ortofotos. Aplicación en computadora personal. VIII Simposium Internacional de la Sociedad de Especialistas Latinoamericanos en Percepción Remota, Iguazú, Argentina Noviembre 6 – 10 de 2000.
- Pompa G., M.; E. J. Treviño G. 2003. Obtención de parámetros a nivel rodal utilizando información geoespacial de imágenes satelitales y ortofotos digitales. VI Congreso Mexicano de Recursos Forestales. San Luis Potosí. México p 194-196 del 5 al 7 de Noviembre de 2003.
- Prabhakar, R., E. Somanathan y B.S. Mehta. 2006. How degraded are Himalayan forests? *Current Science* 9(12):61-67.
- Rullán, S. C. 2002. Estudio bitemporal de la vegetación en una zona afectada por incendios en el municipio de Santiago, N. L. México. Tesis. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. División de Ingeniería y Arquitectura. Monterrey, N. L. México. P 93.
- Salinas C., W. E. y E. J. Treviño G. 2002. Impacto de la deforestación en el microclima de la cuenca del río Corona, Tamaulipas. Investigaciones Geográficas, Instituto de Geografía, U. N. A. M. 47 (2002): 59-76.
- Treviño G., E. J. 1992 "Verwendung von satellitenaufnahmen zur vegetationkartierung am beispiel der region "Sierra Madre Oriental" in Nordostmexiko". Göttinger Beiträge zur Land- und Forstwirtschaft in der Tropen und Subtropen. Heft 68, 150 p.



- Treviño G., E. J.; A. Akça; J. Navar Ch.; J. Jiménez P. y O. Aguirre C.1996. Detection of land use changes by satellite imagery in the municipality of Linares, N.L., Proceedings of Fifth International Conference on Desert Development, , Texas Tech University . Loobok, TX pp. 236-240.
- Treviño G., E. J. 2001. Estratificación de la información en el procesamiento digital de imágenes de satélite aplicado a la cartografía de los bosques *Pinus cembroides*. Investigaciones Geográficas, Instituto de Geografía, UNAM. 44: 54-63.
- Unidad de Conservación y Desarrollo Forestal (Ucodefo), Galeana, Nuevo León.1995. Programa de manejo forestal del ejido Pablillo municipio de Galeana, N. L. 180 p.
- Unidad de Conservación y Desarrollo Forestal (Ucodefo), Galeana, Nuevo León.1997. Programa de manejo forestal del ejido Alfonso Corona del Rosal municipio de Galeana, N. L. 150 p.

Verástegui Ch., J., E. J. Treviño G., R. Vázquez A., J. Pissanni y E. Olivares, 1997. Caracterización de un área agrícola con problemas de salinidad mediante el uso de imágenes Landsat TM. Presentación oral. VIII Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, Mérida Venezuela, 2-7.

Widayati, A., B. Verbist y A. Meijerink. 2002. Application of combined pixel-based and spatial. Based approaches for improved mixed vegetation classification using Ikonos <http://www.itc.nl/library/Papers/MEIJERINK.application.ACRS.2002.pdf>

Manuscrito recibido el 20 de febrero de 2013.

Aceptado el 7 de julio de 2014.

Este documento se debe citar como:

Ancira-Sánchez, L. y E.J. Treviño G. 2015. Utilización de imágenes de satélite en el manejo forestal del noreste de México. *Madera y Bosques* 21(1):77-91