



PÉRDIDA DE COBERTURA FORESTAL EN LA RESERVA DE LA BIÓSFERA MARIPOSA MONARCA, MICHOACÁN, MÉXICO (2006-2010)

FOREST COVER LOSS IN THE MONARCH BUTTERFLY BIOSPHERE RESERVE, MICHOACÁN, MEXICO (2006-2010)

Omar Champo-Jiménez; Luis Valderrama-Landeros; María Luisa España-Boquera¹

Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. IIAF Posta Veterinaria, km 4.5 Carretera Morelia-Zinapécuaro. Correo-e: boquera@umich.mx (¹Autor para correspondencia)

RESUMEN

En el presente trabajo se analiza la pérdida de cobertura forestal en la reserva de la Mariposa Monarca en el periodo entre 2006 y 2010, a partir de imágenes satelitales de alta resolución (10 m) SPOT. Las imágenes se calibraron, se corrigieron atmosféricamente y se sobrepusieron con puntos de control. En cada imagen se obtuvo un mapa de bosque y no bosque (con y sin vegetación arbórea aparente). Los mapas se validaron a partir de imágenes de muy alta resolución de las mismas fechas. Dentro de la zona de bosque, se distinguió entre oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltl. y Cham.) y pino, a partir de una clasificación supervisada y un criterio de altitud. La comparación de los mapas permitió establecer la pérdida de bosque de oyamel, se estimó en 2,227.00 ha en el periodo estudiado, que corresponde a una tasa de deforestación de 556.75 ha·año⁻¹. El mapa de cambios se comparó con los reportes de áreas afectadas por plagas, presentados por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y la Universidad Autónoma Chapingo en 2004, y los trabajos de saneamiento realizados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) entre 2005 y 2009.

Recibido: 13 de septiembre, 2010
Aceptado: 16 de marzo, 2012
doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.09.074
<http://www.chapingo.mx/revistas>

PALABRAS CLAVE:
Deforestación, WWF, Fondo Monarca, SEMAR, SPOT, RBMM.

ABSTRACT

This paper analyzes the loss of forest cover in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve in the period between 2006 and 2010 using high-resolution SPOT satellite imagery (10 m). The images were calibrated, atmospherically corrected and superimposed with control points. A map of forest and non-forest (with and without apparent tree vegetation) was constructed with each image. The maps were validated using very high-resolution images of the same dates. Within the forest area, the natural boundary between oyamel fir forest (*Abies religiosa* (Kunth) Schltl. and Cham.) and pine forest was set based on a supervised classification and an altitude criterion. Comparing the maps allowed us to establish the loss of oyamel fir forest in the period studied, which is estimated at 2,227.00 ha, which corresponds to a deforestation rate of 556.75 ha·year⁻¹. The change map was compared to reports identifying areas affected by pests presented by the National Forestry Commission and the Universidad Autónoma de Chapingo in 2004, and others detailing phytosanitary measures undertaken by the Ministry of Environment and Natural Resources between 2005 and 2009.

KEYWORDS: Deforestation, WWF, Monarch Fund, SEMAR, SPOT, MBBR.

INTRODUCCIÓN

La reserva de la biósfera Mariposa Monarca (RBMM) es una zona prioritaria para la conservación en México, pues en ella se presenta el fenómeno natural de la migración de esta mariposa (*Danaus plexippus* (Kunth) Schltl. y Cham) de gran belleza y peculiar ciclo de vida. En 1980 se estableció como zona de reserva y refugio de fauna silvestre, en 1986 se declaró área natural protegida, con una extensión de 16,100 ha, de las cuales 4,097 ha se consideraron áreas núcleo (Diario Oficial de la Federación [DOF], 1986), y en el año 2000 se le dio carácter de reserva

INTRODUCTION

The Monarch Butterfly Biosphere Reserve (MBBR) is a priority area for conservation in Mexico because it showcases the natural migration phenomenon of this butterfly (*Danaus plexippus* (Kunth) Schltl. and Cham), which is renowned for its great beauty and unique life cycle. In 1980 it was established as a reserve area and wildlife refuge, in 1986 it was declared a protected natural area, encompassing 16,100 ha, of which 4,097 are considered core areas (Official Journal of the Federation [hereafter referred to by its Spanish acronym DOF],

de la biósfera, con una superficie total de 56,259 ha y una zona núcleo de 13,551 ha (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2000).

La población de la región es fundamentalmente rural, con niveles significativos de pobreza y pobreza extrema. Los terrenos son en su mayoría propiedad de comunidades indígenas y ejidos. El aprovechamiento de los recursos forestales fue el eje rector de la economía regional hasta la declaración de reserva natural protegida, en 1986. A partir de este momento las condiciones de pobreza se agudizaron. Actualmente, un porcentaje elevado de comuneros, ejidatarios y jefes de familia sin derechos agrarios se emplean temporalmente fuera de la región, aunque sus familias continúan habitando allí, desarrollando agricultura y ganadería de subsistencia. En muchas comunidades la migración representa la principal fuente de ingresos. El turismo no ha logrado ser una actividad económicamente importante, debido a la restricción de acceso a los santuarios y a una infraestructura turística bastante limitada (Brenner, 2006; DeFries Hansen, Turner, Reid & Liu, 2007; Mannigel, 2008; Merino & Hernández, 2004; Naughton Buck & Brandon, 2005).

Con el fin de paliar la afectación a las comunidades por la ampliación de la zona núcleo con el decreto de 2000 se creó el Fondo para la Conservación de la Mariposa Monarca con capital aportado por la fundación privada estadounidense World Wildlife Fund (WWF), el gobierno mexicano y los gobiernos estatales de Michoacán y estado de México, donde se encuentra la reserva (Honey-Roses et al., 2004). Con los intereses generados por este capital, se realizan pagos compensatorios a los ejidatarios que cumplen con su compromiso de no cortar árboles (Honey, López, Rendón, Peralta, & Galindo, 2009; Missrie & Nelson, 2007). Si bien se trata de apoyos muy pequeños, la mayoría de los 38 ejidos de la zona núcleo están participando en dicho Fondo y respetando sus compromisos, en la medida de lo posible. Sin embargo, a pesar de esfuerzos importantes, como construcción de barreras y zanjas para impedir el paso de camiones, en muchas ocasiones no se puede frenar la tala indiscriminada por parte de grupos de talamontes armados (a veces ajenos a la región y algunos supuestamente ligados al narcotráfico), debido a la falta de capacidad de respuesta de las autoridades (Brenner, 2006, Honey 2009; Honey-Rosés et al., 2004; World Wildlife Fund México [WWF], 2004, 2006).

Ante esta situación y sin un plan de manejo forestal integral para toda la reserva (sólo hay planes de manejo parciales, inadecuados o mal aplicados), el deterioro del bosque es evidente (Navarrete, Ramírez & Pérez, 2011). A la pérdida de masa forestal se suma el envejecimiento de los árboles y la falta de renuevos, lo que trae como consecuencia mayor susceptibilidad a ataques de plagas (Nagendra, 2008). Desde el año 2004 se reporta un informe de zonas afectadas por descortezadores, barrenadores y

1986), and in 2000 it was given the status of a biosphere reserve, with a total area of 56,259 ha and a core area of 13,551 ha (Official Journal of the Federation [DOF], 2000).

The region's population is mostly rural, with significant levels of poverty and extreme poverty. The land is mostly owned by indigenous communities and ejidos (communally owned and operated farmlands). The use of forest resources was the linchpin of the regional economy until the area's declaration as a protected nature reserve in 1986. From this time onwards the poverty situation has worsened. Currently, a high percentage of *comuneros* (members of an agrarian community similar to an ejido), ejido members and household heads without agrarian rights are employed temporarily outside the region, but their families continue to live there, engaging in subsistence agriculture and livestock farming. In many communities, migration provides the main source of income. Tourism has failed to become an economically important activity due to the restricted access to the sanctuaries and the rather limited tourist infrastructure (Brenner, 2006; DeFries Hansen, Turner, Reid & Liu, 2007; Mannigel, 2008; Merino & Hernández, 2004; Naughton Buck & Brandon, 2005).

In order to mitigate the impact on communities caused by expanding the core area with the 2000 decree, the Monarch Butterfly Conservation Fund was created with capital contributed by the World Wildlife Fund (WWF), a private U.S. foundation, the Mexican government and the state governments of Michoacán and Mexico, where the reserve is located (Honey-Roses et al., 2004). With the interest generated by this capital, compensation payments are made to ejido members that fulfill their commitment to not cut down trees (Honey et al., 2009; Missrie and Nelson, 2007). While the payments are very low, most of the 38 core area ejidos are participating in the Fund and abiding by their commitments, insofar as possible. However, despite significant efforts, such as building barriers and ditches to prevent the passage of trucks, often indiscriminate logging by groups of armed loggers (sometimes from outside the region and some allegedly linked to drug trafficking) cannot be curbed due to the authorities' failure to respond adequately (Brenner, 2006, Honey 2009; Honey-Rosés et al., 2004; World Wildlife Fund México [WWF], 2004, 2006).

Given this situation and the lack of a comprehensive forest management plan for the entire reserve (there are only partial, inadequate or poorly applied management plans), the deterioration of the forest is evident (Navarrete, Ramírez & Pérez, 2011). The forest loss is compounded by the aging of the trees and the lack of saplings, which results in increased susceptibility to attack by pests (Nagendra, 2008). Since 2004 there have been reports of areas affected by bark beetles and dwarf mistletoes (*Dendroctonus mexicanus*, *Dendroctonus adjunctus*, *Scolytus mundus* and *Arceuthobium abietis religiosa*, respectively), with different degrees of severity (National Forestry Commission

muérdago enano (*Dendroctonus mexicanus*, *Dendroctonus adjunctus*, *Scolytus mundus* y *Arceuthobium abietis religiosa*, respectivamente), con diferentes grados de afectación (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR] y la Universidad Autónoma de Chapingo [UACH], 2004).

En los años siguientes, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) autorizó algunas labores de saneamiento, que fueron difíciles de implementar y no resultaron suficientes, ya que la hibernación de las mariposas entre octubre y febrero, y la época de lluvias, entre junio y octubre, dejan un periodo muy corto para la realización de trabajos forestales. La situación es aún más difícil en las zonas controladas por grupos armados, las cuales resultan inaccesibles.

Dada la complejidad del tema, contar con información actualizada, objetiva y confiable sobre el estado del bosque, como la que pueden proporcionar los datos satelitales, resulta de suma importancia para valorar el problema y tomar decisiones. Brower et al. (2002), a partir de fotografías aéreas de tres fechas, estimaron una degradación de 12,225 ha en el periodo 1971-1999. Para estos mismos años, Ramírez et al. (2003) estimaron únicamente 3,006 ha, empleando fotografías de escala mayor e imágenes satelitales. La WWF reportó pérdidas de 141.3 ha en el periodo 2001-2003, 479.0 ha en 2003-2005, 576.4 ha durante 2005-2006 y 1,539.0 ha entre octubre 2004 y febrero 2006 en la zona núcleo y 8,240.0 ha, en la zona de amortiguamiento, para este último periodo. Además se calculan 329.08 ha de bosque con diferentes grados de afectación entre 2006 y 2007 (Honey-Rosés et al., 2004; WWF, 2004, 2006, 2007).

El objetivo de este trabajo es estimar la pérdida de bosque en la reserva en el periodo marzo 2006-febrero 2010, a partir del análisis comparativo de dos imágenes SPOT de estas fechas. En 2006 se agravó el ataque de las plagas detectadas en la zona y en febrero 2010 se produjeron fenómenos meteorológicos atípicos, con viento y lluvias intensas, que dieron lugar a la caída de numerosos árboles y a deslaves dentro del bosque, lo que evidenció el mal estado del mismo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

La RBMM se localiza en el límite de los estados de Michoacán y México. Tiene una extensión de 56,259 ha, con una zona núcleo de 13,551 ha. La reserva pertenece a la provincia fisiográfica Sierra Transversal Mexicana, que marca el extremo sur de la Altiplanicie Mexicana y la separa de la depresión del Balsas (Comisión Forestal del estado de Michoacán [COFOM], 2001). Posee un sistema montañoso discontinuo, con predominio de pendientes fuertes que dan lugar a cambios contrastados en altitud

[CONAFOR] and the Universidad Autónoma de Chapingo [UACH], 2004).

In subsequent years, the Ministry of Environment and Natural Resources (SEMARNAT) authorized some forest health work, which was both difficult to undertake and insufficient, because the butterflies overwinter between October and February, and because the rainy season falls between June and October, leaving a very short time for carrying out forestry work. The situation is even more difficult in areas controlled by armed groups, which are, as a result, inaccessible.

Given the complexity of the subject, having up-to-date, objective and reliable information on the state of the forest, as can be provided by satellite data, is extremely important in order to be able to assess the problem and make decisions. Brower et al. (2002), from aerial photographs taken on three dates, estimate a degradation of 12,225 ha in the period 1971-1999. For these same years, Ramírez et al. (2003) estimated only 3,006 ha, using larger-scale photographs and satellite images. The WWF reports losses of 141.3 ha in the period 2001-2003, 479.0 ha in 2003-2005, 576.4 ha in 2005-2006 and 1,539.0 ha between October 2004 and February 2006 in the core area and 8,240.0 ha in the buffer zone for this same period. It also estimates 329.08 ha of forest with varying levels of damage between 2006 and 2007 (Honey-Rosés et al., 2004; WWF, 2004, 2006, 2007).

The aim of this paper is to estimate forest loss in the reserve in the period March 2006-February 2010 through comparative analysis of two SPOT images from these dates. In 2006, the pest attack detected in the area worsened and in February 2010 atypical weather in the form of wind and heavy rains occurred, knocking down many trees and triggering landslides in the forest, which gave proof of its poor condition.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The MBBR is located on the border of the states of Michoacán and Mexico. It covers an area of 56,259 ha, with a core area of 13,551 ha. The reserve belongs to the Trans-Mexican Volcanic Belt physiographic province, which marks the southern end of the Mexican Plateau and separates it from the Balsas depression (Michoacán State Forestry Commission [hereafter referred to by its Spanish acronym COFOM], 2001). It has a discontinuous mountain system, dominated by steep slopes which give rise to contrasting changes in altitude (1,800 to 3,200 m) and exposure. In general, above 2,250 m there is constant moisture that keeps the soil cool. The frequency of frost (20 to 25 days per year) and hail limits crop development. It is a major river catchment area. The mean annual temperature is 18 °C or higher in 17 % of the area, mainly to

(1,800 a 3,200 m) y exposición. En general, por arriba de los 2,250 m hay una humedad constante que mantiene frío el suelo. La frecuencia de heladas (20 a 25 días por año) y granizadas es limitante para el desarrollo de cultivos. Es una zona importante de captación fluvial. La temperatura media anual es de 18 °C o más en el 17 % del área, principalmente al oriente y sur, y entre 6 °C y 16 °C en el 83 % del área. (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas [CONANP], 2001, COFOM, 2001).

La zona se caracteriza por la predominancia de *Abies religiosa* [(Kunth) Schtdl. y Cham.], comúnmente conocido como oyamel, que constituye el hábitat característico de la mariposa monarca. También se encuentran especies de *Pinus*, *Quercus*, *Juniperus* y *Cupressus* (Giménez, Ramírez, & Pinto, 2003).

Imágenes

Para construir los mapas de vegetación de las dos fechas estudiadas, se utilizaron dos imágenes SPOT multibanda de 10 m de resolución espacial (datos proporcionados por la Secretaría de Marina Armada de México (SEMAR), en el marco del convenio firmado entre la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) y la Estación de Recepción México de la constelación SPOT (ERMEXS), ERMEXS-UMSNH 2010), de fechas 10/03/2006 y 14/02/2010.

Datos de referencia

Para validar los mapas construidos, se utilizaron como referencia, imágenes de muy alta resolución, de fechas cercanas a las de las imágenes multibanda: para 2006, se utilizaron las imágenes Global Map (de 0.4 m), que aparecen en el servidor GoogleEarth, disponible en línea; para 2010 se utilizó la imagen pancromática SPOT (de 2.5 m), tomada simultáneamente con la multibanda y proporcionada también por la SEMAR. Asimismo, se utilizó el mapa de la serie cartográfica Monarca, Vegetación y Cubierta de Suelo 2006, generado por el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) para la RBMM, con interpretación visual de imágenes Aster y Landsat ETM+ (Ramírez, Miranda, & Zabaleta, 2006).

Se analizó el informe de diagnóstico fitosanitario forestal en 4,800 ha arboladas en la RBMM, en el estado de Michoacán elaborado por la CONAFOR y la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) en 2004, y el listado de las notificaciones de saneamiento emitidas por la SEMARNAT, entre 2005 y 2009, ambos proporcionados por la dirección de la RBMM. El informe de CONAFOR-UACH contiene las coordenadas de los perímetros de las áreas diagnosticadas (en total, 4,800 ha), sus características fitosanitarias y el mapa correspondiente, en el que se señalan los polígonos visitados, distinguiendo entre infectados y sanos. Este mapa se digitalizó y se extrajeron los vectores asociados a los polígonos reportados. En el listado de SEMARNAT

the east and south, and between 6 °C and 16 °C in 83 % of the area. (National Commission of Protected Natural Areas [hereafter referred to by its Spanish acronym CONANP], 2001, COFOM, 2001).

The area is characterized by the dominance of *Abies religiosa* [(Kunth) Schtdl. and Cham.], commonly known as oyamel fir, which is the characteristic habit of the monarch butterfly. Species of *Pinus*, *Quercus*, *Juniperus* and *Cupressus* are also found in the area (Giménez, Ramírez, & Pinto, 2003).

Imagery

To construct vegetation maps from the two dates studied, two multiband 10-m spatial resolution SPOT images were used [data provided by the Mexican navy (hereafter referred to by its Spanish acronym SEMAR), under the agreement signed between the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) and the Mexico Receiving Station of the SPOT constellation (ERMEXS) ERMEXS-UMSNH 2010], dated 10/03/2006 and 14/02/2010.

Reference Data

To validate the maps constructed, very high-resolution images, taken close in time to the multiband images, were used as references: for 2006, Global Map images (0.4 m), which appear in the Google Earth server, available online, were used; for 2010, the SPOT panchromatic image (2.5 m), taken simultaneously with the multiband image and also provided by SEMAR, was used. Also, the map of the cartographic series Monarch, Vegetation and Land Cover 2006, generated by the Institute of Geography of the Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) for the MBBR, with visual interpretation of Aster and Landsat ETM+ images, was used (Ramírez, Miranda, & Zabaleta, 2006).

The diagnostic forest health report on 4,800 wooded ha in the MBBR, located in the state of Michoacán, prepared by CONAFOR and the Universidad Autónoma Chapingo (UACH) in 2004, and the list of phytosanitary notifications issued by SEMARNAT, between 2005 and 2009, both provided by MBBR management, were analyzed. The CONAFOR-UACH report contains the coordinates of the perimeters of the areas diagnosed, their phytosanitary characteristics and the corresponding map, which identifies the sites visited, distinguishing between infected and healthy areas. This map was digitized and the vectors associated with the reported sites were extracted. Geographical references do not appear in the SEMARNAT list, only the names of the properties, the cubic meters of wood extracted, the species and hectares affected.

Construction of forest/non-forest maps

The analysis focused on estimating forest areas lost, so a distinction was made between two types of cover:

no aparecen referencias geográficas, sólo los nombres de los predios, los metros cúbicos de madera extraída, la especie y las hectáreas afectadas.

Construcción de los mapas bosque/no-bosque

El análisis se enfocó en la estimación de la desaparición de zonas de bosque, por lo que se distinguió entre dos clases de cobertura: arbolado y sin vegetación arbórea aparente, que se identificaron como bosque y no bosque. No se consideraron diferentes grados de degradación porque no es necesario que se pierdan todos los árboles para afectar a las mariposas en sus sitios de hibernación, ya que la remoción de algunos árboles modifica sustancialmente las condiciones microclimáticas requeridas para su supervivencia (Brower et al., 2009; WWF, 2004). Por otra parte, la resolución espacial de las imágenes SPOT (10 m) permite la detección de pequeños claros aislados, por lo que no es necesario que se trate de grandes áreas para que se contabilicen.

Las imágenes se calibraron a partir de las ganancias de los sensores (datos proporcionados por Spotimage) (Jones & Vaughan, 2010) para corregir el efecto de los equipos en las mediciones radiométricas y pasar los números digitales brutos a radianzas; asimismo, se corrigieron atmosféricamente para pasar de radianzas a reflectancias, eliminando el efecto de la atmósfera y de la curva de irradianza solar (Matthew et al., 2003). La imagen del año 2010 presenta algunas nubes ($\leq 10\%$ de la zona de estudio) que se cubrieron con una máscara. Con el fin de garantizar la superposición de los mapas construidos para cada fecha, se utilizaron 757 puntos de control, para hacer coincidir geoméricamente las dos imágenes, con un error menor de 1 píxel (función *Adjust*, algoritmo *Nearest Neighbor* de ArcGis, ArcMap).

Para el total de la reserva (56,259 ha), excepto las zonas cubiertas por nubes en 2010, se construyeron los mapas de las zonas de bosque de las dos imágenes multi-banda, a partir de regiones de interés (o zonas de entrenamiento) seleccionadas cuidadosamente en las imágenes de referencia. En cada imagen se tomaron dos juegos de dos regiones de interés (bosque y no-bosque), con más de 10,000 píxeles cada una. Con un juego de regiones se realizó una clasificación supervisada, aplicando el algoritmo de máxima verosimilitud (ENVI, *Classification-Supervised-Maximum likelihood*), con la cual el sistema etiquetó cada píxel como bosque o no bosque, según a qué región de interés se parecía más. En cada caso se eliminó ligeramente (para no perder zonas pequeñas de deforestación) el efecto “sal y pimienta” (presencia de píxeles aislados), con dos iteraciones de un filtro *majority* (ENVI, *Post-classification-Majority/minority*), con una ventana de 3 x 3 píxeles. El segundo juego de regiones se utilizó para validar la clasificación, contabilizando el número de píxeles de cada región correctamente clasificados, a partir del

wooded and without apparent tree vegetation, which were identified as forest and non-forest. Different degrees of degradation were not considered because it is not necessary that all trees be lost to affect the butterflies in their overwintering sites, since the removal of just some trees substantially changes the microclimatic conditions required for their survival (Brower et al., 2009; WWF, 2004). On the other hand, the spatial resolution of the SPOT images (10 m) allows detection of small isolated clearings, so it is not necessary for there to be large areas in order to account for them.

The images were calibrated from the sensor gains (data provided by Spotimage) (Jones & Vaughan, 2010) to correct the effect of the equipment on the radiometric measurements and convert raw digital numbers to radiances; additionally, they were atmospherically corrected to convert from radiances to reflectances, eliminating the effect of the atmosphere and the solar irradiance curve (Matthew et al., 2003). The year 2010 image shows some clouds ($\leq 10\%$ of the study area) which are covered with a mask. In order to ensure the overlap of the maps constructed for each date, 757 control points were used to match the two images geometrically, with an error of less than 1 pixel (Adjust function, ArcGis Nearest Neighbor algorithm, ArcMap).

For the total reserve (56,259 ha), except the areas covered by clouds in 2010, the forest area maps of the two multiband images were constructed from regions of interest (or training areas) carefully selected in the reference images. In each image, two sets of two regions of interest (forest and non-forest), each with more than 10,000 pixels, were taken. With a set of regions, a supervised classification was performed by applying the maximum likelihood algorithm (ENVI, *Classification-Supervised-Maximum likelihood*), with which the system labeled each pixel as forest or non-forest, depending on which region of interest appeared more. In each case the “salt and pepper” effect (presence of isolated pixels) was reduced slightly (to avoid losing small areas of deforestation) using two iterations of a majority filter (ENVI, *Post-classification-Majority/minority*), with a kernel of 3 x 3 pixels. The second set of regions was used to validate the classification, taking into account the number of pixels of each region correctly classified, based on the analysis of the corresponding confusion matrix (ENVI, *Post-classification-Confusion matrix-roi*) (Campbell, 2002; Mather, 2001; Tso & Mather, 2001).

Delimitation of the oyamel fir area

In order to determine the potential oyamel fir boundary, for use in deforestation calculations, the area classified as forest in the 2006 image was sub-classified to distinguish the oyamel fir from the pine. Two new regions of interest, of close to 5,000 pixels each, representative of the oyamel fir and pine, were taken from the MBBR vegetation map constructed by UNAM (Ramírez et al., 2006) and a supervised

análisis de la matriz de confusión correspondiente (ENVI, *Post-classification-Confusion matrix-roi*) (Campbell, 2002; Mather, 2001; Tso & Mather, 2001).

Delimitación de la zona de oyamel

Con la finalidad de determinar el límite potencial del oyamel, para utilizarlo en los cálculos de deforestación, se subclasificó la zona clasificada como bosque en la imagen del año 2006, para distinguir el oyamel del pino. Se tomaron dos nuevas regiones de interés, de cerca de 5,000 píxeles cada una, representativas del oyamel y del pino, a partir del mapa de vegetación de la RBMM construido por la UNAM (Ramírez et al., 2006) y se realizó una clasificación supervisada con el algoritmo de máxima verosimilitud (ENVI, *Classification-Supervised-Maximum likelihood*). En este caso se realizaron varias iteraciones de un filtro *majority* (ENVI, *Post-classification-Majority/minority*) con diferentes tamaños de ventana, con el fin de obtener un límite suave, aunque aproximado, de la zona de transición entre oyamel y pino. Como apoyo para completar el límite potencial del oyamel en las zonas de no bosque, se comparó el resultado de la clasificación con diferentes curvas de nivel (3000, 2900 y 2800 m) del modelo digital de elevación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México (INEGI) de 30 m, disponible en línea (<http://www.inegi.gob.mx>). Manualmente se trazó el límite natural del oyamel, respetando el resultado de la clasificación y tomando en cuenta las curvas de nivel superpuestas, así como el mapa de vegetación construido por la UNAM (Ramírez et al., 2006). El límite obtenido se utilizó tanto para la imagen del año 2006 como para la del año 2010, por tratarse de un límite potencial de la especie en la zona de estudio.

Máscaras

Se construyeron diferentes máscaras, a partir de los siguientes vectores (función *Build Mask*, de ENVI): límite de la RBMM (según decreto presidencial de 2000, sin considerar el cerro Altamirano, que no aparece en las imágenes analizadas), zona núcleo (según decreto presidencial de 2000), nubes (se trazó manualmente el contorno de las nubes que aparecen en la imagen 2010; esta máscara se superpuso a las dos imágenes, a fin de considerar en los dos casos, la misma superficie) y zona potencial del oyamel.

Comparación de los mapas

Con el fin de obtener los valores de deforestación en el periodo estudiado, se superpusieron los mapas de los dos años, lo que dio como resultado el mapa de diferencias (ENVI, *Basic Tools/Change detection/Compute Difference Map*). Se realizaron tres iteraciones de un filtro *majority* (ENVI, *Post-classification-Majority/minority*) para eliminar ligeramente los píxeles aislados. Se utilizó la máscara

classification was performed using the maximum likelihood algorithm (ENVI-Classification-Supervised-Maximum likelihood). In this case several majority filter iterations (ENVI, *Post-classification-Majority/minority*) with different kernel sizes were performed in order to obtain a smooth boundary, albeit approximate, of the transition area between oyamel fir and pine. To help complete the potential oyamel fir boundary in the non-forest areas, the classification result was compared with different contour lines (3000, 2900 and 2800 m altitude) in the National Institute of Statistics and Geography of Mexico (INEGI) digital elevation model (30 m), available online (<http://www.inegi.gob.mx>). The natural boundary of the oyamel fir was mapped manually, respecting the classification result and taking into account the overlapping contours and the vegetation map constructed by UNAM (Ramírez et al., 2006). The boundary obtained was used for both the 2006 and 2010 images, because it is a potential limit of the species in the study area.

Masks

Different masks were constructed from the following vectors (ENVI *Build Mask* function): MBBR boundaries (according to the 2000 presidential decree, excluding the cerro Altamirano, which is not in the images analyzed), the core area (according to the 2000 presidential decree), clouds (the outline of the clouds that appear in the 2010 image was mapped manually; this mask was superimposed on the two images in order to consider, in both cases, the same area) and the potential oyamel fir area.

Map comparison

In order to obtain deforestation values for the study period, the maps of the two years were overlain, which resulted in the difference map (ENVI, *Basic Tools/Change detection/Compute Difference Map*). Three majority filter iterations (ENVI, *Post-classification-Majority/minority*) were performed to slightly reduce isolated pixels. The mask constructed of the oyamel fir area was used in order to estimate the oyamel forest loss in the reserve, after which the mask of the MBBR core area was superimposed to estimate the deforestation in this area. From the number of pixels, the system obtains the corresponding area in hectares, multiplied by the pixel size (1 pixel = 20 m x 20 m = 400 m² = 0.04 ha).

Review of recent inspection and phytosanitary reports

In the 2004 inspection conducted by CONAFOR and UACH, the phytosanitary status of 12 plots in the MBBR was reviewed. In particular, inspection visits were made to the plots that make up the reserve's northern core (Federal Property [Chincua], Cerro Prieto, Los Remedios, Santa Ana, Senguio [extension], Calabozo [1 and 2]). In every case the established and growing presence of bark beetles and mistletoe was detected, with an incidence of low to

construida de zona de oyamel, a fin de estimar la pérdida de bosque de oyamel en la reserva, posteriormente, se superpuso la máscara de la zona núcleo de la RBMM para estimar la deforestación en esta zona. A partir del número de píxeles, el sistema obtiene la superficie correspondiente en hectáreas, multiplicando por el tamaño de píxel ($1 \text{ píxel} = 20 \text{ m} \times 20 \text{ m} = 400 \text{ m}^2 = 0.04 \text{ ha}$).

Revisión de reportes recientes de inspección y saneamiento

En la inspección realizada por la CONAFOR y la UACH, en 2004, se revisó el estado fitosanitario de 12 predios de la RBMM. En particular, se realizaron visitas de inspección a los predios que conforman la parte norte del núcleo de la reserva (Propiedad Federal [Chincua], Cerro Prieto, Los Remedios, Santa Ana, Senguio [ampliación], Calabozo [1 y 2]). En todos los casos se detectó presencia establecida y en aumento, de descortezador y muérdago, con una incidencia de baja a mediana, excepto en Cerro Prieto y Los Remedios, donde los árboles estaban afectados por descortezador. Se califica como una situación de alto riesgo. En la relación de notificaciones de saneamiento forestal emitidas por la SEMARNAT, en 2005, en estos ejidos, junto con el cercano Jesús de Nazareno, se retiraron más de 1000 m^3 de madera infectada principalmente de oyamel, en 2006 se retiraron 870 m^3 principalmente de pino; en 2008 $1,580 \text{ m}^3$ principalmente de oyamel; y en 2009, cerca de $7,500 \text{ m}^3$. La superficie reportada como afectada es de 4.75 ha en 2005, 3.3 ha en 2006, 8.38 en 2008 y 45.26 ha (mayoritariamente en Chincua y Santa Ana) en 2009.

Un poco más al sur, se sanearon los ejidos Ocampo, El Rosario y El Asoleadero, retirándose cerca de $2,200 \text{ m}^3$ de madera infectada en 2008 y $3,400 \text{ m}^3$ en 2009. Se estimó un superficie afectada de 14 ha en 2008 y 20.47 ha en 2009. Otra zona revisada en 2004 fue la parte central de la reserva, en particular los ejidos Francisco Serrato y Donanciano Ojeda. En ambos se reportaron tanto zonas sanas como zonas con incidencia alta de descortezador. En 2009 se reportó un saneamiento de 28 m^3 de pino en 0.06 ha afectadas. En 2004 se revisó el ejido Nicolás Romero, en la parte sur de la reserva Cerro Pelón, el cual se encontró sano. No se reportan trabajos de saneamiento en esta zona.

Esta información se resume en el Cuadro 1, donde se divide la reserva en cuatro partes (Figura 3).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Construcción de los mapas

Se clasificaron las dos imágenes SPOT en dos clases (bosque y no bosque), utilizando un juego de regiones de interés para cada clase y fecha. Los mapas obtenidos se

medium, except in Cerro Prieto and Los Remedios, where trees were highly affected by bark beetles. It qualifies as a high-risk situation. In the list of forest health notifications issued by SEMARNAT in 2005, in these ejidos, along with nearby Jesús de Nazareno, over 1000 m^3 of infected wood, mainly oyamel fir, were removed; in 2006, 870 m^3 , mainly pine, were removed; in 2008, $1,580 \text{ m}^3$, mainly oyamel fir, were removed; and in 2009, about $7,500 \text{ m}^3$. The area reported as affected was 4.75 ha in 2005, 3.3 ha in 2006, 8.38 in 2008 and 45.26 ha (mostly in Chincua and Santa Ana) in 2009.

A little further south, the ejidos Ocampo, El Rosario and El Asoleadero were cleaned up, removing about $2,200 \text{ m}^3$ of infected wood in 2008 and $3,400 \text{ m}^3$ in 2009. The affected area was estimated at 14 ha in 2008 and 20.47 ha in 2009. Another area inspected in 2004 was the reserve's central section, particularly the ejidos Francisco Serrato and Donanciano Ojeda. In the two ejidos, both healthy areas and ones with a high incidence of bark beetles were reported. In 2009 a clean-up of 28 m^3 of pine in 0.06 ha affected was reported. In 2004, the ejido Nicolás Romero, in the southern part of the Cerro Pelón reserve, was inspected and found to be healthy. No phytosanitary work has been reported for this area.

This information is summarized in Table 1, where the reserve is divided into four parts (Figure 3).

RESULTS AND DISCUSSION

Map construction

The two SPOT images were classified into two classes (forest and non-forest) using a set of regions of interest for each class and date. The maps obtained were validated with independent sets of regions of interest. In both cases an accuracy of better than 98% was obtained, with a Kappa index of 0.99.

Figure 1 shows the maps obtained from the 2006 and 2010 images, in which the two classes, forest and non-forest, are distinguished. The forest class includes areas with a high density of trees, mostly oyamel fir, although one can also find transition areas of pine, pine-oak and eventually shrub. The non-forest class includes clearings with pasture, completely deforested areas, scrubland and agricultural areas.

Delimitation of the oyamel fir area

Figure 2 shows the subclassification of the area classified as forest in the 2006 image. The class delimited as oyamel fir is shown in red and the pine class in cyan, but both areas may also include other types of plant groupings, particularly pine-oak and shrubbery. The class delimited as non-forest, including cloud-covered areas, appears in blank.

CUADRO 1. Predios de la RBMM reportados como infestados (UACH) o saneados (SEMARNAT).

Zona	Ejido	Afectación (UACH-CONAFOR)	Saneamiento (SEMARNAT)			
			2005	2006	2008	2009
Norte	Los Remedios	Alta				
	Cerro Prieto	Alta				
	Santa Ana	Media	1.000 m ³	870 m ³	1.580 m ³	7.500 m ³
	Chincua	Media	4.7 ha	3.3 ha	8.38 ha	45.26 ha
	El Calabozo (pino)	Media				
	Jesús de Nazareno	Media				
	Senguio (pino)	Media				
Centro	El Asoleadero				2.200 m ³	3.400 m ³
	Ocampo				14 ha	20.47 ha
	El Rosario	Media-Baja				
Sur	Francisco Serrato (pino)	Baja-Alta				28 m ³
	Donaciano Ojeda (pino)	Baja-Alta				0.06 ha
Cerro Pelón	Nicolás Romero (pino)	Nula				

(m³: volumen de madera infectada, ha: superficie afectada).**TABLE 1. MBBR plots reported as infested (UACH) or healthy (SEMARNAT).**

Area	Ejido	Damage (UACH-CONAFOR)	Phytosanitary work (SEMARNAT)			
			2005	2006	2008	2009
North	Los Remedios	High				
	Cerro Prieto	High				
	Santa Ana	Medium	1.000 m ³	870 m ³	1.580 m ³	7.500 m ³
	Chincua	Medium	4.7 ha	3.3 ha	8.38 ha	45.26 ha
	El Calabozo (pine)	Medium				
	Jesús de Nazareno	Medium				
	Senguio (pine)	Medium				
Centre	El Asoleadero				2.200 m ³	3.400 m ³
	Ocampo				14 ha	20.47 ha
	El Rosario	Medium-Low				
South	Francisco Serrato (pine)	Low-High				28 m ³
	Donaciano Ojeda (pine)	Low-High				0.06 ha
Cerro Pelón	Nicolás Romero (pine)	Nil				

(m³: volume of infected wood; ha: area affected)

**Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca
(Monarch Butterfly Biosphere Reserve)**

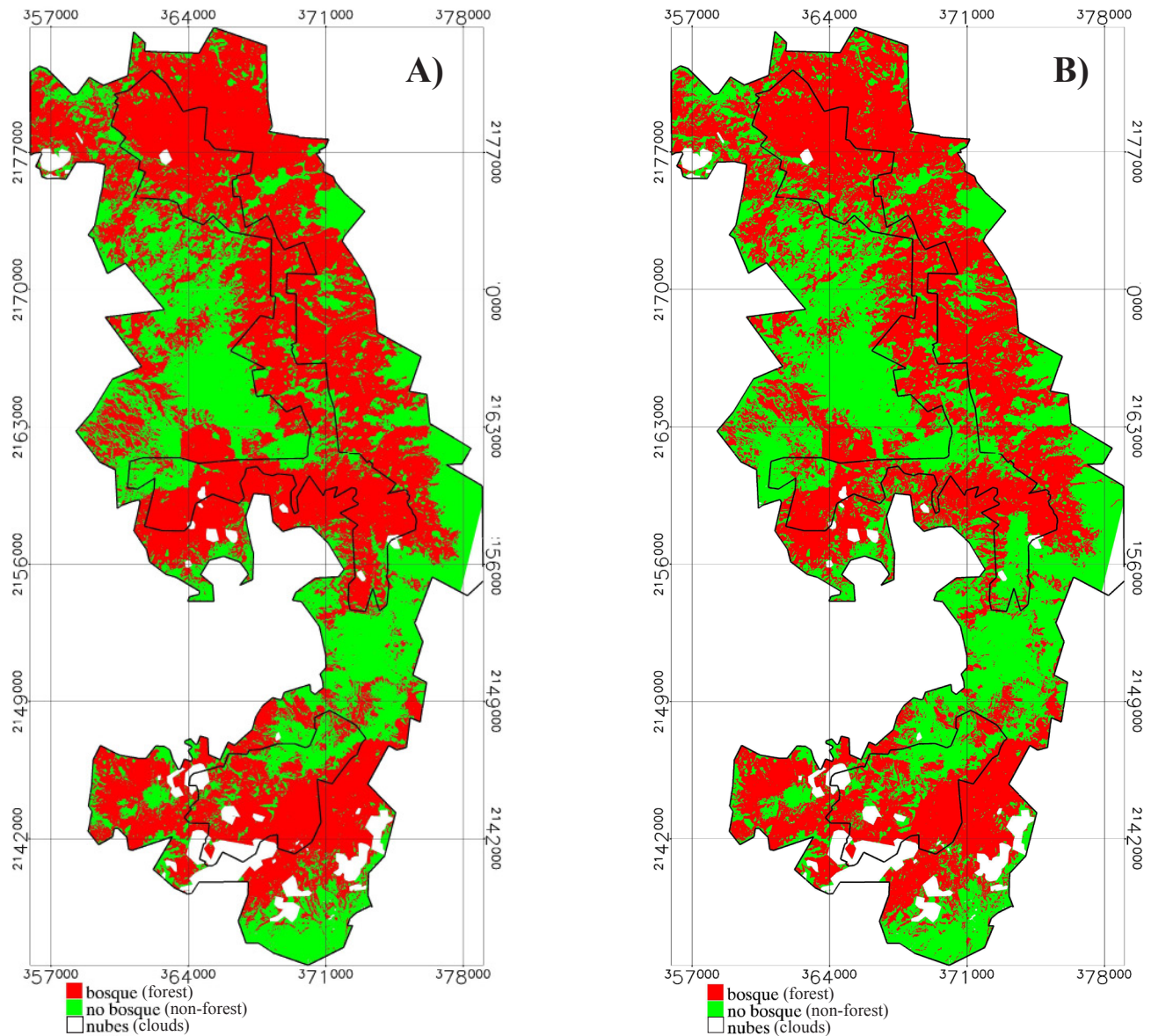


FIGURA 1. Mapas de vegetación bosque/no-bosque (verde/rojo) de la RBMM en 2006 (a) y 2010 (b). En negro se muestran los límites de la RBMM, externo y de la zona núcleo.

FIGURE 1. Forest/non-forest (green/red) vegetation maps of the MBBR in 2006 (a) and 2010 (b). The boundaries of the MBBR and the inner core area are shown in black.

validaron con juegos independientes de regiones de interés. En ambos casos se obtuvo una precisión superior a 98 %, con un índice Kappa de 0.99.

La Figura 1 muestra los mapas obtenidos a partir de las imágenes de 2006 y 2010, en los que se distinguen las dos clases: bosque y no bosque. La clase bosque incluye zonas con alta densidad de arbolado, predominantemente

Contour lines with altitudes of 2,800, 2,900 and 3,000 m are shown superimposed in different shades of yellow.

The boundary of the oyamel fir area was manually mapped in green, based on the oyamel fir/pine classification and supported by the contour lines in cases with little woodland. This is a potential limit, within which are clearings, such as induced grasslands, deforested areas

de oyamel, si bien también se pueden encontrar zonas de transición, de pino, de pino-encino y eventualmente zonas de vegetación arbustiva. La clase no-bosque incluye claros con pastizal, zonas completamente deforestadas, zonas de matorral y zonas agrícolas.

Delimitación de la zona de oyamel

La Figura 2 muestra la subclasificación de la zona clasificada como bosque en la imagen 2006. En rojo aparece la clase delimitada como bosque de oyamel y en cian la de pino, si bien es posible que se incluyan otros tipos de agrupaciones vegetales, en particular el pino-encino y vegetación arbustiva. En blanco aparece la clase delimitada como no-bosque, incluyendo las áreas cubiertas con nubes. Las curvas de nivel con altitudes de 2,800, 2,900 y 3,000 m se muestran superpuestas en diferentes tonos de amarillo.

Manualmente se trazó el límite de la zona del oyamel en verde, a partir del resultado de la clasificación oyamelpino, tomando como apoyo las curvas de nivel, en los casos con poco arbolado. Se trata de un límite potencial, al interior del cual se encuentran claros, como pastizales inducidos, áreas deforestadas y zonas sin vegetación aparente, así como algunas zonas agrícolas en los límites externos. Es una zona de 25,400.00 ha.

Mapa de diferencias

La Figura 3 muestra el resultado de comparar los dos mapas de la Figura 1. En negro aparecen los límites de la RBMM, tanto el externo como la delimitación de la zona núcleo. En rojo aparecen los píxeles que en la imagen del año 2006 se clasificaron como bosque y que en la imagen del año 2010 pasaron a la clase no-bosque (pérdidas), en azul son los píxeles que tuvieron el comportamiento inverso: no eran bosque en el año 2006, pero sí en el año 2010 (ganancias). En blanco son los píxeles que no cambiaron, incluyendo las nubes, que para el cálculo permanecieron cubiertas por una máscara.

Al considerar en esta imagen únicamente la zona potencial de oyamel, se calculó una superficie total de pérdidas (en rojo) de 2,227.00 ha y de ganancias (en azul) de 577.77 ha, para el periodo estudiado. Dentro de la zona núcleo, las pérdidas totales se calcularon en 1,368.40 ha y las ganancias en 270.49 ha. Expresadas en porcentajes, las pérdidas suponen 3.96 % del total de la reserva, 10.10 % de la zona núcleo y 8.77 % si se considera únicamente la zona potencial de bosque de oyamel. Como se trata de pérdidas acumuladas durante cuatro años, el promedio anual es la cuarta parte, con lo que las tasas anuales de deforestación resultan de 0.99 % en la reserva, 2.52 % en la zona núcleo (342.10 ha·año⁻¹) y 2.19 % en la zona de oyamel (556.75 ha·año⁻¹).

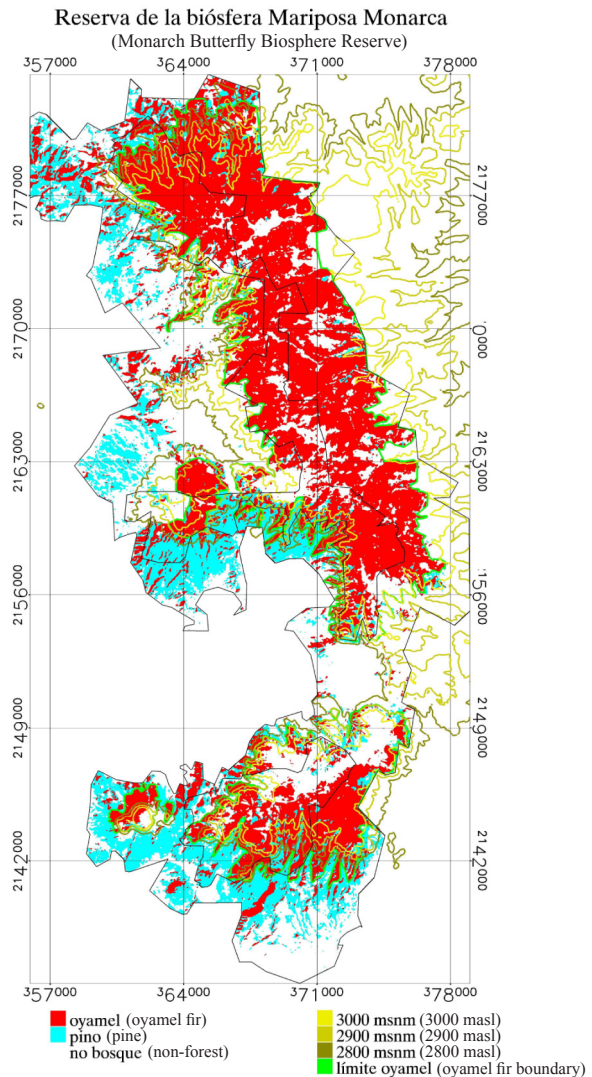


FIGURA 2. División de la zona de bosque 2006 entre oyamel (rojo) y pino (cian); puede éste incluir zonas de pino-encino. Superposición de las curvas de nivel que corresponden al límite natural del oyamel (amarillo). Límite de la zona potencial de oyamel (verde). Límites de la RBMM, externo y de la zona núcleo (negro).

FIGURE 2. Division of the 2006 forest area between oyamel fir (red) and pine (cyan); the forest area can also include pine-oak areas. The superimposed contour lines shown in yellow represent the natural boundary of oyamel fir, while the potential boundary of this species is in green. The boundaries of the MBBR and its inner core area are shown in black.

and areas with no apparent vegetation, as well as some agricultural areas along the outer boundaries. It covers an area of 25,400.00 ha.

Difference map

Figure 3 shows the result of comparing the two maps in Figure 1. The boundaries of the MBBR and its inner core area are in black. The pixels that were classified as forest in the 2006 image but reclassified as non-forest in the 2010 image (losses) are in red, while the pixels that had the

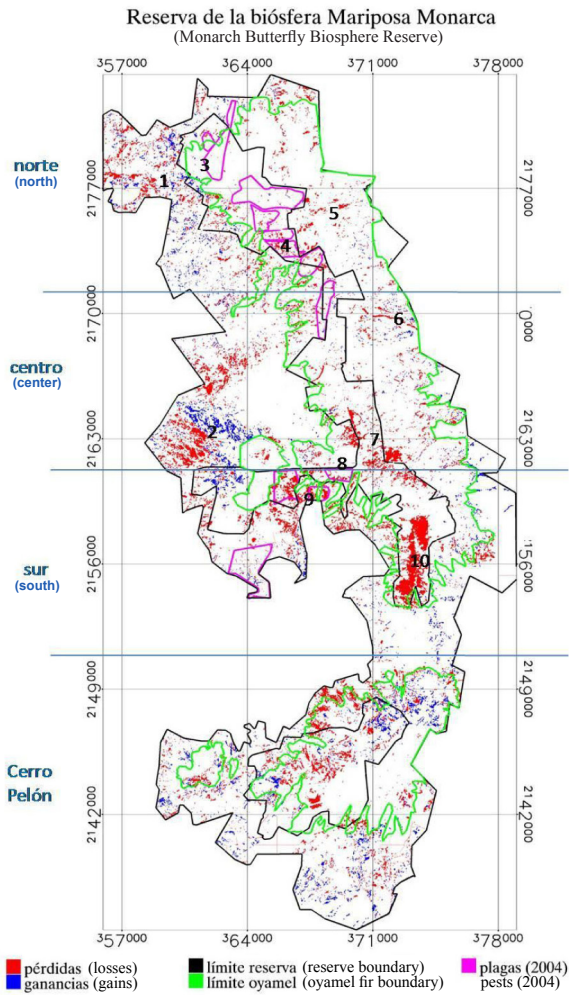


FIGURA 3. Mapa de diferencias entre los mapas de bosque/no bosque de 2006 y 2010 en la RBMM. En negro se muestran los límites de la RBMM, externo y de la zona núcleo. En rojo aparecen los píxeles que en la imagen del año 2006 se clasificaron como bosque y en la imagen del año 2010 pasaron a la clase no-bosque (pérdidas), en azul son los píxeles que no eran bosque en el año 2006, pero sí en el año 2010 (ganancias). Los números indican las zonas de mayor interés.

FIGURE 3. Difference map between the 2006 and 2010 MBBR forest/non-forest maps. The boundaries of the MBBR and its inner core area are shown in black. The pixels that were classified as forest in the 2006 image but reclassified as non-forest in the 2010 image (losses) are in red, while the pixels in blue were not forest in 2006, but they were in 2010 (gains). The numbers indicate the areas of greatest interest.

Las ganancias aparecen fundamentalmente fuera de la zona de oyamel y corresponderían a procesos de reforestación, que lamentablemente se sabe que prácticamente no existen en la RBMM (o son tan recientes que aún no fueron detectables). La ganancia aparente de vegetación, en algunas partes de la RBMM que corresponden a vegetación arbustiva, se puede explicar por la diferencia de fechas entre las imágenes utilizadas: la imagen de 2006 es de marzo, final de la época de secas, mientras que la imagen de 2010 es de febrero, que es una época más fresca en general y en el caso particular del mismo año, más

opposite behavior are in blue: that is, they were not forest in 2006, but they were in 2010 (gains). The pixels that did not change, including the clouds, which for the calculation remained covered by a mask, are in blank.

Considering in this image only the potential oyamel fir area, the total area lost (in red) and gained (in blue) was estimated at 2,227.00 ha and 577.77 ha, respectively, for the period studied. Within the core area, the total losses are estimated at 1,368.40 ha and gains at 270.49 ha. Expressed in percentages, the losses represent 3.96 % of the total reserve area, 10.10 % of the core area and 8.77 % if only the potential oyamel fir forest area is considered. As these are accumulated losses over four years, the annual average is one-fourth, resulting in annual deforestation rates of 0.99 % in the reserve, 2.52 % in the core area (342.10 ha·year⁻¹) and 2.19 % in the oyamel fir forest area (556.75 ha·year⁻¹).

The gains are mainly outside the oyamel fir forest area and correspond to reforestation measures, which unfortunately are practically non-existent in the MBBR (or they are so recent that they would still not be detectable). The apparent vegetation gain in some parts of the MBBR correspond to shrubbery, which can be explained by the difference in dates between the images used: the 2006 image is from March, at the end of the dry season, while the 2010 image is from February, which is a cooler time in general and in the particular case of that year, wetter, as there were atypical rains in February. Within the oyamel fir area, it was eventually possible to give some displacement in the overlay of the clearings.

In the northwestern area, dense forest gains have been reported for the 1993-2006 period (Figure 3 [1]) (Navarrete et al., 2011). In the western center region, the area shown in blue corresponds, according to the UNAM map, to shrubbery (2) and comprises the ejidos San Cristóbal and Emiliano Zapata. In the former, the ejidatarios burned the forest in response to the 1986 decree and no dense forest has been reported there since 1993 (WWF, 2006). In Emiliano Zapata, there have been authorized logging areas since the 1990s. In the 2000-2006 period, it had losses of 96 %, well above the average loss of plots with a management plan, which was 14 %. The management plans were poorly designed and permitted forest fragmentation, accelerating its degradation (Navarrete et al., 2011). In the Cerro Pelón area, deforestation began in the 1990s and continued in subsequent years (Honey-Rosés et al., 2004).

The northern part (3) contains the best preserved area of the MBBR. According to the map created by Velasco, Champo, España y Baret (2010), in 2001 it was one of the areas with the highest leaf area index. Although in 2004 damage due to bark beetles was reported, there were no losses recorded between 2006 and 2010, which suggests

húmeda, ya que hubo lluvias atípicas en febrero. Dentro de la zona de oyamel, se pudo dar eventualmente algún desplazamiento en la superposición de los claros.

Al oeste de la zona norte se han reportado ganancias de bosque denso en el periodo 1993-2006 (Figura 3 [1]) (Navarrete et al., 2011). En el centro oeste, el área que aparece en azul corresponde, según el mapa de la UNAM, a vegetación arbustiva (2). Se trata de los ejidos San Cristóbal y Emiliano Zapata. En el primero, los ejidatarios quemaron el bosque en respuesta al decreto de 1986 y se reportó sin bosque denso desde 1993 (WWF, 2006). En Emiliano Zapata hay zonas de corte autorizadas desde los años de 1990. En el periodo 2000-2006 tuvo pérdidas de 96 %, muy por encima de la pérdida promedio de los predios con plan de manejo, que fue de 14 %. Los planes de manejo estuvieron mal diseñados y permitieron la fragmentación del bosque, lo que aceleró su degradación (Navarrete et al., 2011). En la zona de Cerro Pelón, la deforestación se inició en la década de 1990 y continuó en años posteriores (Honey- Rosés et al., 2004).

En la parte norte (3) se encuentra una zona que es la mejor preservada de la RBMM. Según el mapa de Velasco, Champo, España y Baret (2010), en 2001 era de las zonas con mayor índice de área foliar. A pesar de que en 2004 se reportó una afectación media de descortezador, no se encontraron pérdidas entre 2006 y 2010, lo que llevaría a pensar que se logró controlar la plaga. Según la WWF, en su reporte de 2003, se trata de comunidades que se comprometieron con el Fondo Monarca y cambiaron los permisos de aprovechamiento por árboles en pie. Dentro de la misma zona (4) se encuentran las áreas reportadas con afectación alta de plagas (Los Remedios y Cerro Prieto), que presentan pérdidas importantes y han sido objeto de las más intensas labores de saneamiento anual desde 2005. En sus informes la WWF documentó la pérdida de más de 650 ha en cada uno de estos predios en 2002. Hacia el oriente (5) se observan también manchones de deforestación. Se trata de predios sometidos a planes de manejo autorizados, donde además se han presentado problemas de plagas, si bien no aparecen en los informes con que se cuenta, ya que éstos corresponden sólo al estado de Michoacán.

En la zona centro se distingue, al noreste, una pequeña línea (6) casi horizontal, de pérdida, que corresponde al mayor de los deslaves ocurridos como consecuencia de las fuertes lluvias de enero del año 2010, unas semanas antes de la adquisición de la imagen SPOT utilizada. Las autoridades reportaron más de 50 deslaves en el interior del bosque, algunos de varios kilómetros, como el que se observa en la figura, y otros de pocos metros. Para realizar un mapa detallado de los deslaves sería necesario utilizar imágenes de mayor resolución.

Al sur de la zona centro se observan dos manchas importantes de deforestación, que penetran en la zona

that efforts to control the pest were successful. According to the WWF, in its 2003 report, these communities have committed themselves to the Monarch Fund and changed logging permits for standing trees. Within the same area (4), one finds the areas reported to have high pest damage (Los Remedios and Cerro Prieto), which have significant losses and which have been the subject of the most intensive annual phytosanitary measures since 2005. In its reports, the WWF documents the loss of over 65 ha in each of these plots in 2002. To the east (5) there are also patches of deforestation. These plots, which are under authorized management plans, have also had problems with pests, but there is no mention of them in the available reports, as these are only for the state of Michoacán.

In the northeast area of the center region, there is a small, almost horizontal loss line (6) that stands out and which corresponds to the biggest landslides that occurred as a result of heavy rains in January 2010, a few weeks before the acquisition of the SPOT image used. The authorities reported more than 50 landslides in the forest, some several kilometers in width, as seen in the figure, and others just a few meters in width. To make a detailed map of the landslides, higher-resolution images would be needed.

South of the center region there are two major deforestation patches which penetrate the core area (7), in the ejido Franciso Serrato. The losses encountered during the study period (2006-2010) can be viewed as an extension of the area deforested between 2001 and 2003, according to reports issued by the WWF, which, using photointerpretation, estimated the loss of 42.6 ha within the core area and a total of 250 ha of dense oyamel fir forest in the buffer zone (during negotiations prior to the signing of the decree, it was agreed that this part would not be included in the core area). As a result, the indigenous community of this ejido was the only one in 2003 that did not receive payment for environmental services that this international association awards as an incentive for forest conservation, under the terms of the Monarch Fund. There may be some degree of pest damage in this area, but because the ejido is considered both highly dangerous due to the presence of armed groups and difficult to access, there are no recent inspection or phytosanitary reports.

The northern center of the south region (9) includes, outside of the oyamel fir area, a pine area that CONAFOR-UACH reported as infested with mistletoe and bark beetles and where SEMARNAT carried out phytosanitary measures in 2009, covering 0.06 ha. These losses are not accounted for in the reported results for oyamel fir. Based on a separate calculation, they correspond to nearly 400 ha, which would bring the total deforestation rate to over 650 ha-year⁻¹. This area comprises the ejidos Donanciano Ojeda and Francisco Serrato, which in 2003 already had losses, according to the WWF report, of 24.17 and 49.9 ha, respectively, but the organization's 2005-2006 report says that this deforestation

núcleo (7), en el ejido Francisco Serrato. Se puede considerar que las pérdidas encontradas en el periodo estudiado (2006-2010) son una ampliación de la zona deforestada entre 2001 y 2003, según reportes de la WWF, quien estimó por fotointerpretación, la pérdida de 42.6 ha dentro de la zona núcleo y del total de las 250 ha de superficie de bosque denso de oyamel en la zona de amortiguamiento (en la firma del decreto se negoció que esta parte no entrara en la zona núcleo). A consecuencia de esto, la comunidad indígena de este ejido fue la única que en el año 2003 no recibió el pago por servicios ambientales que esta asociación internacional otorga como incentivo para la conservación del bosque, dentro del programa Fondo Monarca. Es posible que haya algún grado de afectación de plagas, pero por tratarse de ejidos considerados altamente peligrosos y de difícil acceso, no hay reportes recientes de revisión ni saneamiento.

En el centro norte de la zona sur (9) se distinguió, fuera de la zona de oyamel, un área de pino que CONAFOR-UACH reportaron como infestada por muérdago y descortezador y donde la SEMARNAT realizó un saneamiento, en 2009, que abarcó 0.06 ha. Estas pérdidas no están contabilizadas en las reportadas como resultado para oyamel. Haciendo el cálculo por separado, corresponden a casi 400 ha, lo que elevaría la tasa de deforestación total a más de 650 ha·año⁻¹. Se trata de los ejidos Donanciano Ojeda y Francisco Serrato, que en 2003 ya presentaban pérdidas, según el reporte de WWF de 24.17 ha y 49.9 ha, respectivamente; sin embargo, en el reporte para 2005-2006 se menciona que ya detuvieron su proceso de deforestación.

La principal mancha de deforestación en el periodo estudiado (10) se encuentra en la zona sur, dentro del área núcleo. Corresponde al ejido Crescencio Morales y por sí misma supone una pérdida de 438 ha. Se trata de una comunidad con conflictos agrarios y sociales graves, de acceso difícil por la presencia de grupos armados (según reportes de la WWF). Este predio no aparecía en la zona núcleo, hasta el decreto del año 2000, lo que supuso la pérdida de la autorización de manejo; sin embargo, éste se siguió ejerciendo de manera indiscriminada y la comunidad indígena de Crescencio Morales no quiso participar en el Fondo Monarca. Para este ejido la WWF reporta una pérdida de 49.9 ha entre 2001 y 2003 y de 427.20 ha entre 2005 y 2006 (WWF, 2006).

En la zona de Cerro Pelón, las pérdidas de bosque de oyamel suponen una ampliación del área deforestada en la década de 1990.

CONCLUSIONES

El análisis de las imágenes permitió distinguir dos tipos de cobertura de la RBMM, correspondientes a la zona arbolada y la no arbolada, y dentro de la primera, el bosque

process was stopped.

The main deforestation patch in the period studied (10) is located in the southern region, within the core area. It belongs to the ejido Crescencio Morales, which itself indicates a loss of 438 ha. It is a community with serious land and social issues, and access to the area is difficult due to the presence of armed groups (according to WWF reports). This land was not in the core area until the year 2000 decree, which ostensibly resulted in the loss of self-management; however, it continued to act indiscriminately and the indigenous community of Crescencio Morales refused to participate in the Monarch Fund. For this ejido, the WWF reports a loss of 49.9 ha between 2001 and 2003 and of 427.20 ha between 2005 and 2006 (WWF, 2006).

In the Cerro Pelón area, oyamel fir forest losses represent an expansion of the area deforested in the 1990s.

CONCLUSIONS

Image analysis allowed us to distinguish two types of cover in the MBBR, namely wooded and unwooded areas, and within the former, the oyamel fir and pine forests (or pine-oak). Comparing the two maps allowed quantifying the deforestation that occurred in the period studied (2006-2010). The losses in the oyamel fir area amount to over 2000 ha, which corresponds to a deforestation rate of more than 500 ha year⁻¹, while in the core area the rate is over 300 ha year⁻¹.

Due to the accuracy level of the data used and the analysis method, the values are approximations, but they nonetheless reflect the real situation of the reserve in early 2010. Given the particular situation of this area, it is important to have objective and up-to-date information. There are no reliable official figures regarding the effect this forest loss is having on monarch butterfly migration, but it is clear that without the rapid implementation of a forceful rescue plan they will eventually disappear from the reserve. The deforestation problem is compounded by global warming, which is already having a negative effect on the number of butterflies that arrive annually.

The specific analysis of the situation in each ejido reveals contrasting positions: while in some cases the rejection of the area's protected status is strong, in others there is a clear desire to actively participate in conservation efforts. Thus, ejidos such as Francisco Serrato or Crescencio Morales, which from the beginning opposed the reserve's creation, have suffered such severe deforestation that they have lost their entire tree cover. This suggests that perhaps the situation has reached its most critical level and that the estimated deforestation rate will not necessarily be maintained in the coming years.

de oyamel y el de pino (o pino-encino). La comparación de los dos mapas obtenidos permitió cuantificar la deforestación en el periodo estudiado (2006–2010). Las pérdidas dentro de la zona de oyamel suman un total de más de 2000 ha, lo que corresponde a una tasa de deforestación de más de 500 ha·año⁻¹; en la zona núcleo la tasa es de más de 300 ha·año⁻¹.

Por la precisión de los datos utilizados y la metodología de análisis, se trata de valores aproximados, pero que reflejan la situación real de la reserva a inicios de 2010. Dada la situación particular de esta zona, es importante contar con información objetiva y actualizada. No hay cifras oficiales confiables del efecto que esta pérdida de bosque está teniendo sobre la migración de las mariposas monarca, pero es claro que, de no implementarse un plan de rescate rápido y contundente, terminarán por desaparecer de la reserva. Al problema de la deforestación se suma el calentamiento global, que ya está reflejando efectos negativos sobre la cantidad de mariposas que llegan anualmente.

El análisis particular de la situación de cada ejido revela la existencia de posicionamientos contrastantes: mientras que en algunos casos el rechazo a la situación de reserva protegida es contundente, en otros, es manifiesto el deseo de participar activamente en la preservación. Así, ejidos como Francisco Serrato o Crescencio Morales, que desde el principio se opusieron a la declaración de reserva, han sufrido procesos tan severos de deforestación que han perdido toda su cubierta arbórea. Esto hace pensar que quizá la situación ya ha llegado a su nivel más crítico y que la tasa estimada de deforestación no necesariamente se mantendrá en los próximos años.

El haber dejado que la situación llegara al estado en que se encuentra tendrá un alto precio. Para revertir el entorno actual se necesitan planes de restauración y manejo integrales, de largo plazo, bien diseñados y cuidadosamente implementados, que cuenten con el acuerdo y la participación de los ejidatarios así como la protección efectiva de las autoridades.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se generó con datos provenientes de la “ERMEXS-UMSNH 2010”.

Los autores agradecen a la dirección de la reserva de la biósfera Mariposa Monarca (SEMARNAT-RBMM) y a la Comisión Forestal de Michoacán (COFOM) por la información de campo y los reportes de saneamiento proporcionados, y a la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (CIC-UMSNH) por el financiamiento de esta investigación.

To have let the situation reach its current state bears a high cost. To reverse the current situation, long-term, well-designed and carefully implemented restoration and integrated management plans, with the agreement and participation of the ejidatarios as well as the effective protection of the authorities, are needed.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was generated with data from the “ERMEXS-UMSNH 2010.”

The authors thank the management of the Monarch Butterfly Biosphere Reserve (SEMARNAT-MBBR) and the Michoacán Forestry Commission (known by its Spanish acronym COFOM) for the field data and phytosanitary reports provided, and the Scientific Research Office of the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (known by its Spanish acronym CIC-UMSNH) for funding this research.

End of English Version

REFERENCIAS

- Brenner, L. (2006). Áreas naturales protegidas y ecoturismo: el caso de la reserva de la biósfera Mariposa Monarca, México. *Relaciones*, 27(105), 237–265.
- Brenner, L. (2009). Aceptación de políticas de conservación ambiental: el caso de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. *Economía, Sociedad y Territorio* 9(30), 259–295.
- Brower, L. P., Castilleja, G., Peralta, A., López, J., Bojórquez, L., Díaz, S., ... Missrie, M. (2002). Quantitative changes in forest quality in a principal overwintering area of the monarch butterfly in Mexico, 1971-1999. *Conservation Biology* 16: 346-359. doi: 10.1111/j.1752-4598.2009.00052.x
- Brower, L. P., Williams, E. H., Slayback, D. A., Fink, L. S., Ramírez, M. I., Zubieta, R. R., ... Van Hook, T. (2009). Oyamel fir forest trunks provide thermal advantages for overwintering monarch butterflies in Mexico. *Insect Conservation and Diversity*, 2(3), 163–175.
- Campbell, J. B. (2002). *Introduction to remote sensing* (3rd. ed.) NY, USA: The Guilford Press.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (COFOM) (2001). *Atlas forestal del estado de Michoacán. Comisión Forestal del Estado de Michoacán*. Morelia, Michoacán, México.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (2001). *Programa de manejo de la reserva de la biósfera Mariposa Monarca*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas México, D. F.
- DeFries, R., Hansen, A., Turner, B. L., Reid, R. & Liu, J. (2007). Land use change around protected areas: management to balance human needs and ecological function. *Ecological Applications*, 17(4), 1031–1038.
- Organo del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos (1986, 9 de octubre). Desarrollo Urbano y Ecología. Diario Oficial de la Federación (DOF).

- Organo del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos (2000, 10 de noviembre). Desarrollo Urbano y Ecología. Diario Oficial de la Federación (DOF).
- Giménez, A. J., Ramírez, M. I. & Pinto, M. (2003). Las comunidades vegetales de la sierra de Angangueo (estados de Michoacán y México, México): clasificación, composición y distribución. *Lazaroa*, 24; 87–111.
- Honey, J. (2009). Disentangling the proximate factors of deforestation: The case of the monarch butterfly biosphere reserve in Mexico. *Land Degradation and Development*, 20; 22–32. doi: 10.1002/ldr
- Honey, J., López, J., Rendón, E., Peralta, A. & Galindo, C. (2009). To pay or not to pay? Monitoring performance and enforcing conditionality when paying for forest conservation in Mexico. *Environmental Conservation* 36(2), 120–128. doi: 10.1017/S0376892909990063
- Honey-Rosés, J., Rendón, E., López, G.J., Perálta, A., Ángeles, P., Contreras, I., & Galindo-Leal, C. (2004). *Monitoreo Forestal del Fondo Monarca 2003*. México: World Wildlife Fund México (WWF). Obtenido de <http://www.wwf.org.mx/wwfmex/>.
- Jones, H. G. & Vaughan R. A. (2010). *Remote Sensing of Vegetation. Principles, techniques, and applications*. New York, NY, USA: Oxford University Press
- López-García, J. (2007). *Análisis de cambio de la cobertura forestal en la reserva de la biosfera mariposa monarca (2006-2007)*. México: World Wildlife Fund México (WWF). Obtenido de <http://www.wwf.org.mx/wwfmex/>.
- Mannigel, E. (2008). Integrating parks and people: How does participation work in protected area management? *Society and Natural Resources*, 21(6), 498–511. doi 10.1080/08941920701618039
- Mather, P. M. (2001). Computer processing of remotely-sensed images. An introduction (2nd. ed.). England: John Wiley.
- Matthew, M. W., Adler-Golden, S. M., Berk, A., Feldeb, G., Andersonb, G. P., Gorodetzky, D., ... Shippert, M. (2003). Atmospheric correction of spectral imagery: evaluation of the FLAASH algorithm with AVIRIS data. SPIE Proceeding, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery IX.
- Merino, P. L. & Hernández, A. M. (2004). Destrucción de instituciones comunitarias y deterioro de los bosques en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Sociología*, 66(2), 261–309.
- Missrie, M., & Nelson, K. (2007). Direct payments for conservation: lessons from the Monarch Butterfly Conservation Fund. In Biodiversity and Conservation: International Perspectives. A. Usha, (ed.) 189–212. The Icfai University Press. Hyderabad, India.
- Nagendra, H. (2008). Do parks work? Impact of protected areas on land cover clearing. *Ambio*, 37(5), 330-337. doi: 10.1579/06-R-184.1
- Naughton, T. L., Buck, H. M., & Brandon, K. (2005). The role of protected areas in conserving biodiversity and sustaining local livelihoods. *Annual Review of Environment and Resources*, 30; 219–252. doi: 10.1146/annurev.energy.30.050504.164507
- Navarrete, J. L., Ramírez, M. I., & Pérez, D. (2011). Logging within protected areas: Spatial evaluation of the monarch butterfly biosphere reserve, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 262; 646–654. doi: 10.1016/j.foreco.2011.04.033
- Ramírez, M. I., Gimnez, A. J. & Luna, L. (2003). Effects of human activities on monarch butterfly habitat in protected mountain forest, Mexico. *The Forestry Chronicle*, 79; 242–246.
- Ramírez, M. I., Miranda, R., & Zubieta, R. (2006). Serie cartográfica Monarca. Volumen I. Vegetación y cubiertas de suelo. México, D. F.: Monarch Butterfly Sanctuary Foundation, Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Tso, B., & Mather, P. M. (2001). *Classification methods for remotely sensed data*. London, England: Taylor & Francis.
- Velasco, S., Champo, O., España M. L. & Baret, F. (2010). Estimación del índice de área foliar en la reserva de la biósfera Mariposa Monarca. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(2); 169–174.
- World Wildlife Fund México (WWF) (2004b). *La tala ilegal y su impacto en la reserva de la biósfera Mariposa Monarca*. México: World Wildlife Fund México. Extraído el 09 del 09 del 2010. Obtenido de <http://www.wwf.org.mx/wwfmex/>.
- World Wildlife Fund México (WWF) (2006). *Forest loss and deterioration in the monarch butterfly biosphere reserve 2005-2006*. World Wildlife Fund Mexico. Obtenido de <http://www.wwf.org.mx/wwfmex/>.