

Cambios de cobertura forestal con fotografías aéreas digitales en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca

José López García⁶, Rafael M. Navarro Cerrillo⁷

Resumen

En este trabajo se discute la utilización de fotografías aéreas digitales de alta resolución, obtenidas a través de percepción remota alternativa, con cámaras de pequeño formato, para la evaluación del cambio en la densidad de cobertura forestal.

Se han realizado evaluaciones sistemáticas de la degradación de los bosques por tala ilegal entre 1999 y 2009 en la zona núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, en los estados de México y Michoacán (México). Se desarrolló una metodología confiable que permitió su aplicación en estudios sucesivos, basado en el uso de fotografías aéreas digitales de alta resolución. El método consistió en la interpretación de estereo-pares de diferentes años para determinar cambios en la densidad de cobertura forestal. Los resultados son vectorizados sobre mosaicos ortocorregidos en un Sistema de Información Geográfico. Esta interpretación comparativa permite al Fondo Monarca la determinación del Pago por Servicios de Conservación (PSC) en la zona núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.

Abstract

In this paper, the use of digital high-resolution aerial photographs, obtained through alternative remote sensing using small format cameras, for the evaluation of the change in the density of forest cover is discussed.

There have been systematic evaluations of the degradation and deforestation processes of forests by illegal logging and fires between 2003 and 2009 in the Biosphere Reserve of the Monarch Butterfly (Mexico and Michoacan, Mexico). A reliable methodology that allowed its application in subsequent studies, based on the use of digital high-resolution aerial photography was developed. The method involved the interpretation of stereo - pairs from different years to determine changes in the density of forest cover. The results are georeferenced and evaluated on a Geographic Information System. A comparative interpretation is done and changes are determined in each period of analysis, the changes are quantified and their distribution is analyzed, allowing the Monarch Fund in payment for ecosystem services.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el 7º Programa Marco de la Unión Europea en el marco del proyecto "Community based management of environmental challenges in Latin America" (FP7-ENV2011-282845 COMET-LA).

⁶ Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. C.P. 04510. Coyoacán. México D.F. jlopez@unam.mx.

⁷ Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Carretera Nacional IV, km 396, 14014 Córdoba, España; rnnavarro@uco.es.

Introducción

En México, los bosques templados ofrece una amplia gama de servicios ambientales, incluyendo la recarga de acuíferos, la captura de carbono, protección de la biodiversidad y la belleza escénica. Sin embargo, estos servicios ambientales se ven afectadas por la deforestación por tala ilegal, que favorecen la pérdida de biodiversidad, inundaciones y la inestabilidad de laderas, lo que ha propiciado en primera instancia la degradación y deforestación de zonas boscosas, aún en Áreas Naturales Protegidas, como es el caso de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM), donde la tala clandestina es el principal problema de conservación para el proceso de hibernación de la mariposa monarca.

El concepto de PSA es aceptado en principio, pero algunas investigaciones han abordado la eficacia de estos programas en todo el mundo (Alix-García et al, 2008; Corbera y Brown 2008). En México, los efectos positivos de la PES se han documentado en los casos como la RBMM (López-García, 2007, 2009), considerada como una zona prioritaria para la conservación forestal. Los esfuerzos para conservar el hábitat utilizado por la mariposa monarca para la hibernación comenzaron en 1974 con el conocimiento a la luz pública los santuarios de las mariposas monarca (Urquhart, 1976) y dio lugar a tres decretos (1980, 1986 y 2000) que el primer decreto protegía todo el ámbito donde la mariposa hiberna y se reproduce (Diario Oficial de la Federación, 1980). El segundo decreto estableció zonas núcleo y de amortiguamiento (Diario Oficial de la Federación, 1986), como resultado las comunidades locales rechazaron las políticas de conservación y turismo en los sitios de hibernación de la mariposa monarca porque éstos limitaban la explotación de los recursos forestales, por lo que esto contribuyó a un deterioro acelerado del bosque (López-García, 2007). En el tercer decreto se amplió los límites de las zonas núcleo y de amortiguamiento (Diario Oficial de la Federación, 2000) y se implementó un innovador programas de conservación para beneficiar a las poblaciones locales.

Una vez decretada la ampliación de la RBMM en el año 2000, se estableció una evaluación periódica, por el Fondo Mundial para la Conservación de la Vida Silvestre (WWF) y creó la iniciativa del Fondo para la Conservación de la Mariposa Monarca (FCMM) lo que constituye una herramienta de gestión basada en el pago de servicios ambientales (PSA) para los propietarios que con la nueva zonificación de la Reserva quedaron restringidos en sus derechos de aprovechamiento en zona núcleo.

Actualmente el uso de fotografías aéreas digitales ha adquirido relevancia, toda vez que reviste ventajas, en su bajo costo, resolución espacial y temporal. Además tienen la posibilidad de observación estereoscópica. Los estudios sobre cambio de uso del suelo se realizan para conocer el cambio temporal de la superficie terrestre, pero el cambio en la densidad de cobertura forestal normalmente no se evalúa y es de utilidad para conocer la disminución en la calidad del bosque, especialmente en Áreas Naturales Protegidas (ANPs), como es el caso de la RBMM.

Por tanto, se diseñó una metodología que permitiera evaluar los cambios en la densidad de cobertura forestal con la finalidad de evaluar los cambios de la cubierta forestal en los núcleos agrarios que participan en este programa de Pago por Servicios de Conservación (PSC).

Para este estudio la deforestación es considerada como la disminución de la cobertura forestal a menos del 10% (FAO, 1995). En cambio la degradación forestal incluye cambios dentro del bosque que afectan negativamente la estructura y función del bosque (FRA, 2005).

El número de esquemas de PSA implementados ha aumentado en los últimos años e incluyen subprogramas de servicios hidrológicos, la captura de carbono, el uso no forestal y servicios de conservación. Como resultado, de éstos programas de PSA en México han ayudado a reducir la deforestación y la tala ilegal en los bosques (Alix-García et al., 2010).

En este trabajo se diseñó una metodología para evaluar los cambios en la densidad de cobertura forestal.

1. Material y métodos

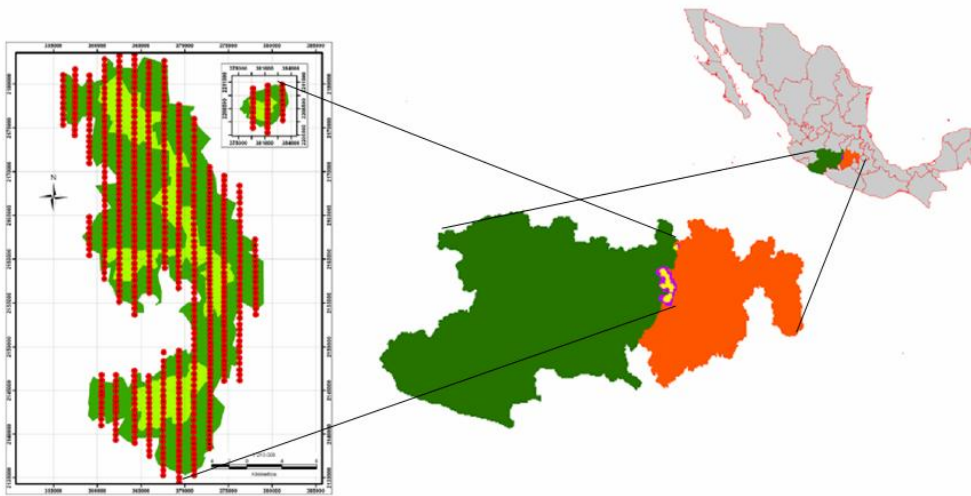
1.1. Zona de estudio

La RBMM, se localiza en el centro de México, entre los estados de México y Michoacán (Figura 1) tiene una superficie de 56,259 ha, dividida en zona de amortiguamiento (42,679 ha) y zona núcleo (13,580 ha). Está integrada por 93 predios: 59 ejidos, 13 comunidades indígenas y 21 pequeñas propiedades. Para la zona núcleo se tienen 21 ejidos, 7 comunidades indígenas y 3 pequeñas propiedades (SEMARNAT, 2001).

La RBMM, se localiza en el centro de México, entre los estados de México y Michoacán tiene una superficie de 56,259 ha, dividida en zona de amortiguamiento (42,679 ha) y zona núcleo (13,580 ha).

Figura 1.

Ubicación de las líneas de vuelo en el área en estudio, entre los estados de México y Michoacán, México



1.2. Adquisición y procesado de los vuelos fotogramétricos

Durante el periodo comprendido entre 1999 y 2009 se han realizado varios levantamientos aerofotográficos en la RBMM, entre enero y marzo de cada año. El plan de vuelo se mantuvo para todas las campañas aéreas realizadas, utilizando las técnicas convencionales para la toma de imágenes fotográficas, garantizando la sobreposición lateral y longitudinal estándar. Las fotografías se han almacenado en un disco duro que se encuentra acoplada con la cámara y registra las coordenadas geográficas de cada escena mediante un sistema de posicionamiento global (GPS). Las cámaras utilizadas en las tomas de las fotografías aéreas han variado aumentando su resolución espacial en función de la mejora tecnológica de las cámaras durante los últimos años, manifestada a través del aumento en el número de píxeles del sensor, en la sensibilidad, en la consistencia del color, en niveles de ruido más bajos y en el diseño optimizado de lentes y sitios fotosensibles en el sensor (Tabla 1).

Tabla 1.
Comparación de cámaras y resolución espacial

Cámara	Año	No. de Mpixeles	Tamaño de pixel en el terreno con una cobertura de 1.770 x 1.140 km por cada imagen. (m/pixel).
Kodak DCS 420	1999	1.54	1.12
Nikon D1	2001	2.66	0.85
Nikon D1X	2003	6	0.6
Kodak DCS 14n Pro	2005	12.21	0.4
Nikon D2X	2006	12.4	0.4
Nikon D2X (Con mejor lente)	2008	12.4	0.4
Canon EOS 1DS Mark II	2009	16.61	0.3
Kodak DCS 420 monochrome (IR)	1999-2001	1.542	1.12
SONY DSC-F707 (IR)	2003-2005	4.91	0.8
Cannon EOS Revel (IR)	2006-2009	7.96	0.55

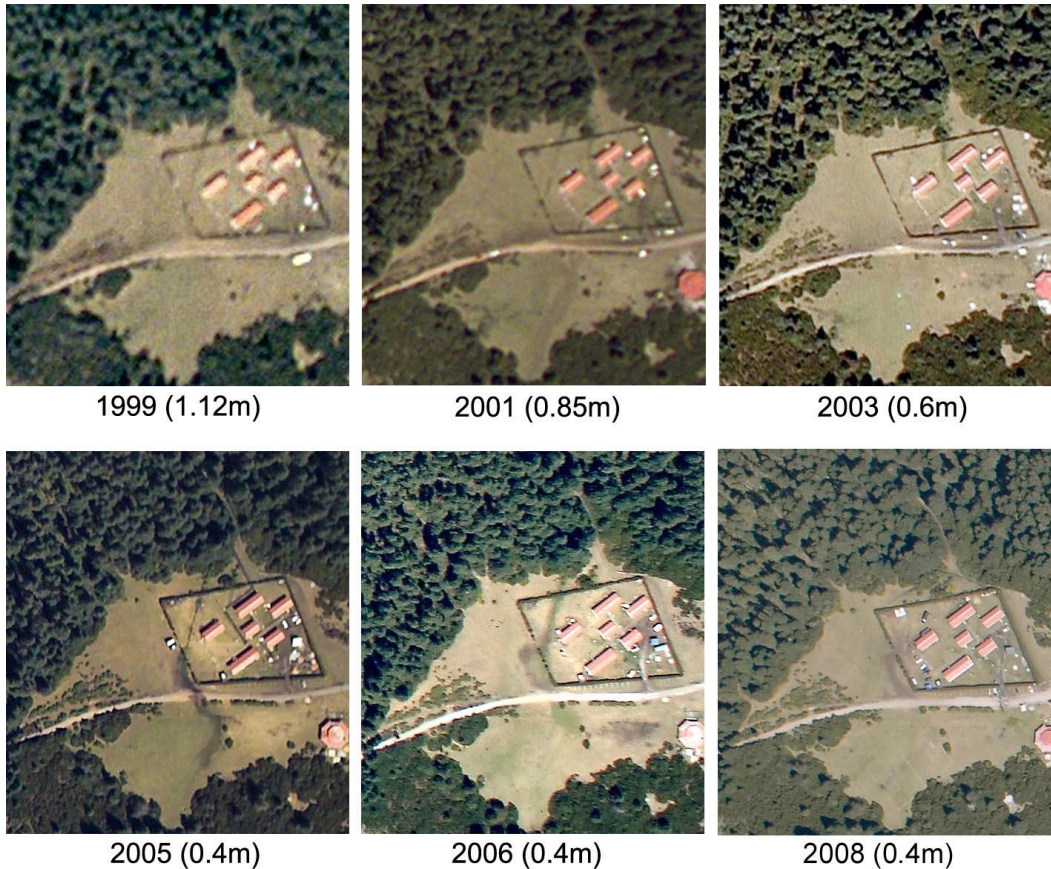
IR = Infrarojo

Una vez realizado el levantamiento, se hace un preprocesado de las imágenes, mediante la corrección de los fotogramas a través de la uniformización de los niveles de color, contraste y brillo, procurando que en cada uno de los ajuste no se exageraren las características del terreno mostradas en la imagen. Posteriormente se procesan a una escala 1:10,000, tomando como base la misma zona para los diferentes años en el ajuste de escala (Figura 2). A partir de una resolución espacial de 0.60 m/píxel (imagen de 2003) ha sido posible distinguir inequívocamente árboles individuales, y con resoluciones mayores de 0.40 m/píxel se aprecia la estructura de los árboles individuales y se facilita la interpretación de rasgos como matorrales, árboles pequeños, vehículos, árboles derribados, restos en sitios de corte de madera y senderos pequeños bajo el dosel forestal. En el año 2007, el levantamiento aéreo no se completó, por lo que se utilizó una imagen SPOT-5, utilizando las bandas del visible, y con una resolución espacial de 3m/píxel (López-García, 2007).

Se hace un preprocesado de las imágenes procurando que en cada uno de los ajuste no se exageraren las características del terreno mostradas en la imagen.

Figura 2.

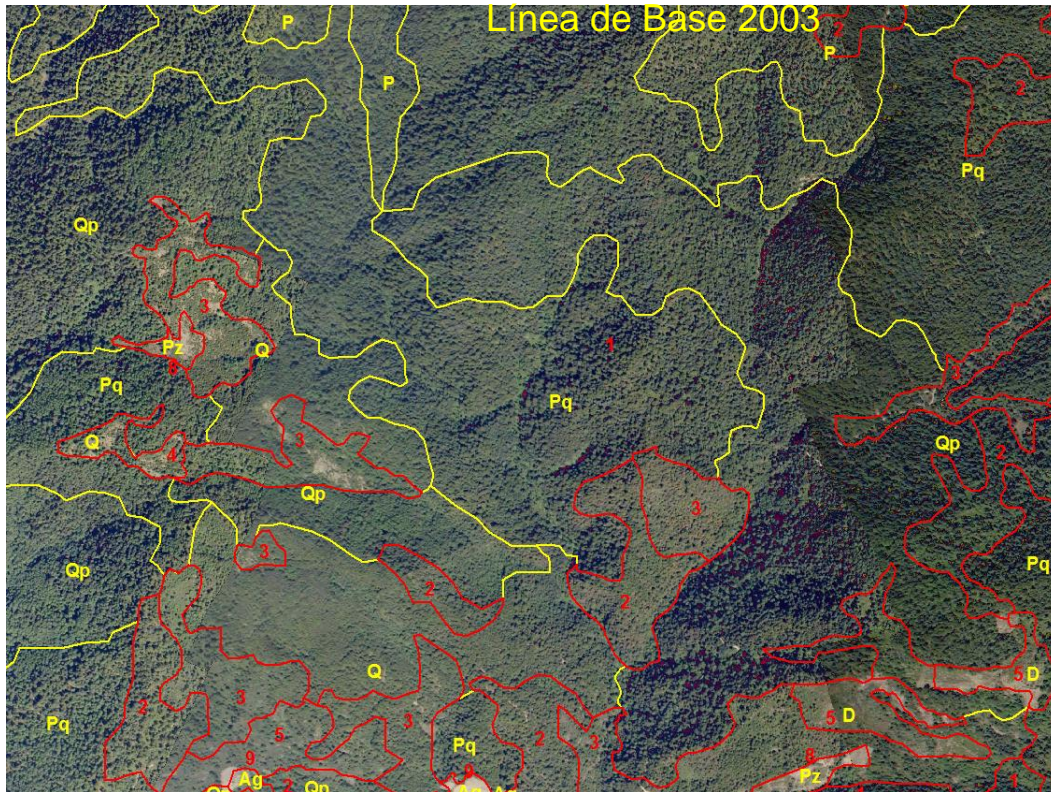
Secuencia de ortofotos de la zona de estudio a lo largo del periodo 1999-2008
(A partir de 0.60 m/píxel (imagen de 2003) pueden distinguirse)



Se generaron mosaicos ortorectificados a partir de las fotografías aéreas digitales, con apoyo de ortofotos de 2 metros por píxel (INEGI, 1994) para cuantificar los cambios en la cobertura forestal ocurrida en la zona núcleo de la RBMM. Se utilizó un modelo digital del terreno con curvas de nivel cada 20 metros en NAD 27. Con ellos se efectuaron mediciones objetivas para establecer los cambios anuales. Para su construcción se aplicaron y adaptaron métodos fotogramétricos estándar, tanto para la calibración de la cámara (Prado *et. al.* 2003), como para la formación de los mosaicos (López, 2006); corrigiendo las distorsiones en las imágenes, debidas a los movimientos de la aeronave al momento de la toma, la distorsión radial del lente, la desviación del punto central, la diferencia en la distancia focal del lente y aquellas causadas por el relieve. Los mosaicos fueron elaborados con ERDAS, con un error medio cuadrático de 7 metros. El mosaico de 2003 fue utilizado como mapa base, con una resolución de 1 m x 1 m por píxel, para transferir la información resultado de la fotointerpretación de los diferentes años, también sirvió de referencia cualitativa y visual del estado de la cubierta forestal (Figura 3).

Figura 3.

Mosaico ortorectificado elaborado con fotografías aéreas digitales de 2003



1.3. Interpretación y comparación de las series fotográficas.

Se distinguen dos procesos en el trabajo de interpretación de los cambios en la zona de estudio. En primer lugar se procedió a la fotointerpretación convencional realizada para el año 2003; en segundo lugar se hizo un estudio comparativo entre los periodos bianuales de 2001-2005, 2003-2005, 2005-2007, 2007-2009, (Figura 4). La línea base del análisis correspondió al año 2003, a partir de la cual se establecieron los tipos de vegetación y la cobertura, y se fueron actualizando en cada análisis temporal.

Se elaboró una leyenda de los tipos de vegetación forestal presentes en la zona, separando: Bosques de *Abies religiosa*, *Pinus pseudostrobus*, *p montesumae*, *P oocarpa*, *P michoacana* y *Quercus spp.* así como sus asociaciones en función de la dominancia (Figura 5). Se les asignó 5 niveles de coberturas arbóreas: Cerrada >75%; Semicerrada 51-75%; Semiabierta 26-50%, Abierta 10-25%, y Deforestado <10%. Los polígonos resultantes se asociaron a los núcleos agrarios para saber quiénes han conservado el bosque. Los datos obtenidos para los diferentes usos del suelo y las coberturas fueron exportados a una hoja de cálculo en Excel, donde se creó una tabla dinámica y se analizaron los datos en una matriz de cambios.

*Se elaboró una leyenda de los tipos de vegetación forestal presentes en la zona, separando: Bosques de *Abies religiosa*, *Pinus pseudostrobus*, *p montesumae*, *P oocarpa*, *P michoacana* y *Quercus spp.**

Figura 4.

Análisis comparativo fotografía aérea digital, mosaico ortocorregido e imagen Spot5

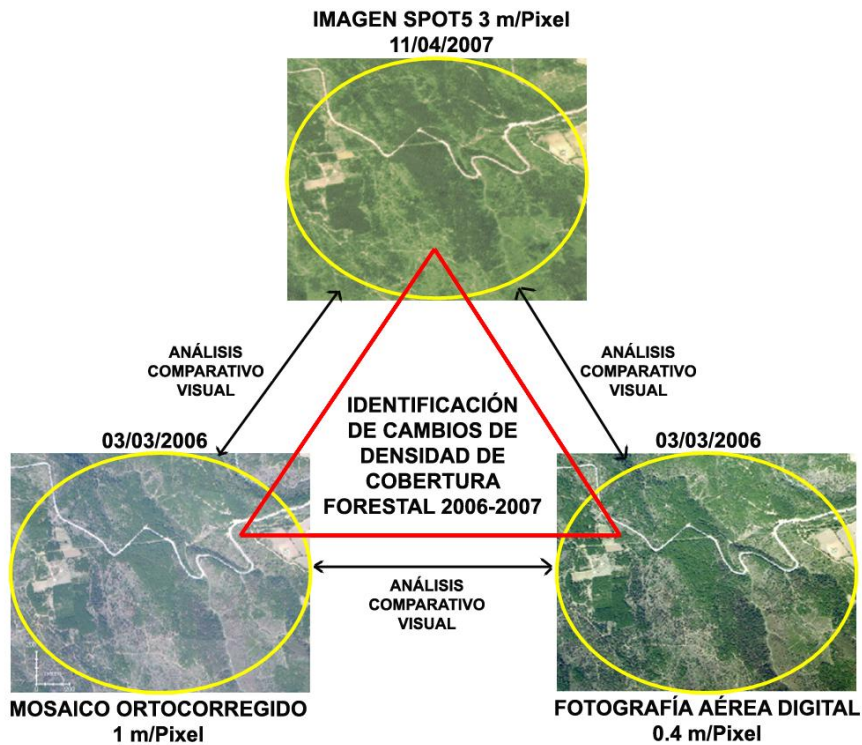
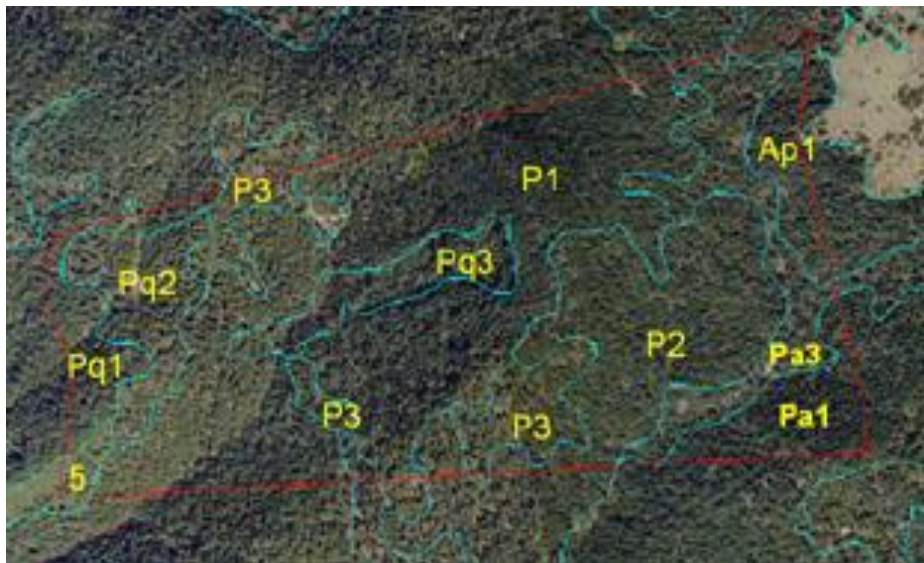


Figura 5.

Área fotointerpretable y separación de tipos de vegetación (P= Pino, A= Oyamel, Q= Encino) y densidad de cobertura forestal

(1= Cerrada, 2= Semicerrada, 3= Semiabierta, 4= Abierta y 5 Deforestado)

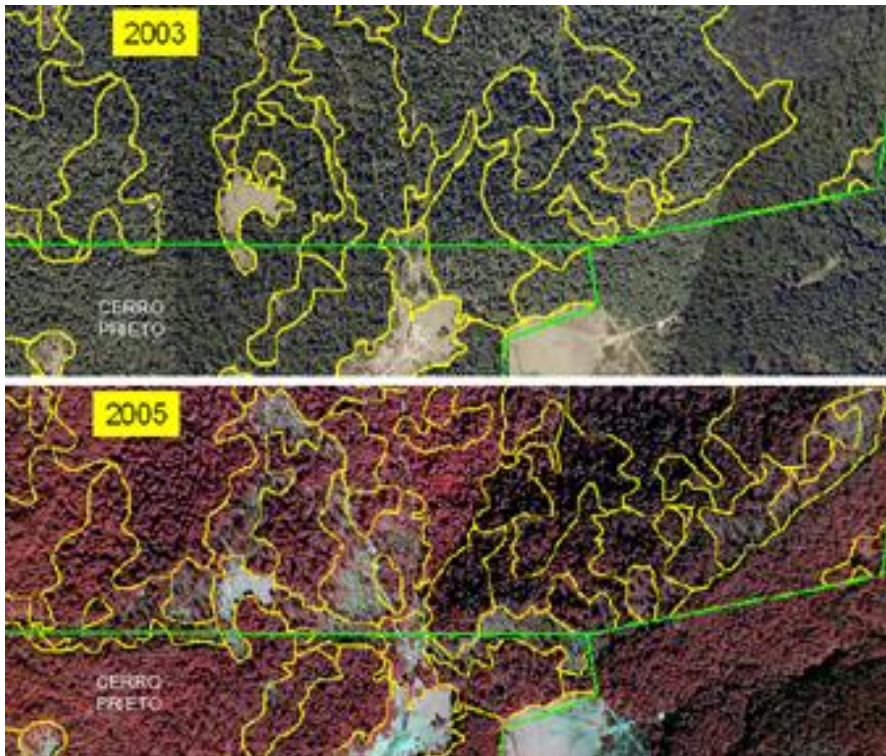


Considerando que en todos los levantamientos aéreos se ha utilizado el mismo plan de vuelo, y las líneas de vuelo son coincidentes, fue posible hacer una fotointerpretación comparativa mediante interpretación de pares estereoscópicos de fotografías de diferente año, pero de la

misma zona, logrando que exista paralaje, condición para la estereoscopia. La restitución normalmente se realizó a partir fotointerpretación en ordenador a escala 1:10 000, utilizando como mapa base un mosaico ortocorregido (elaborado a partir de fotografías aéreas digitales), igualando la escala promedio para cada fotografía y empleando el método de triangulación radial. Esto se logra, ya que como el mosaico se despliega en ArcGis, se ajusta la escala y se hacen coincidir los detalles de la fotografía a transferir con los rasgos del mosaico, como son del mismo año es muy sencillo ubicar los detalles en el mosaico respecto a la fotografía, ya que se tienen tantos puntos de apoyo como pixeles hay. En algunos casos fue necesario utilizar fotografías en falso color para hacer el análisis comparativo, permitiendo la correcta separación de los cambios en la densidad de cobertura forestal (Figura 6).

Figura 6.

Proceso de fotointerpretación en pantalla mediante ArcGis para evaluar los cambios en la densidad de cobertura forestal entre los años 2003 y 2005, utilizando fotografías aéreas digitales, 2003 en color y 2005 en falso color



A partir de la fotointerpretación, se procedió a hacer el estudio de cambios de vegetación y cobertura tomando el año 2003 como mapa base. Las series bianuales fueron comparadas, obteniendo mapas de cambio (López-García, 2007; Figura 7, Figura 8). La mejora de la resolución espacial, permitiendo trabajar a escalas de 1:5000 o mayor en formato digital, aseguro una buena separación de cambios en la densidad de cobertura forestal (Figura 9).

A partir de la fotointerpretación, se procedió a hacer el estudio de cambios de vegetación y cobertura tomando el año 2003 como mapa base.

Figura 7.

Secuencia aerofotográfica fotointerpretada mostrando el proceso de degradación-deforestación en una zona de la RBMM

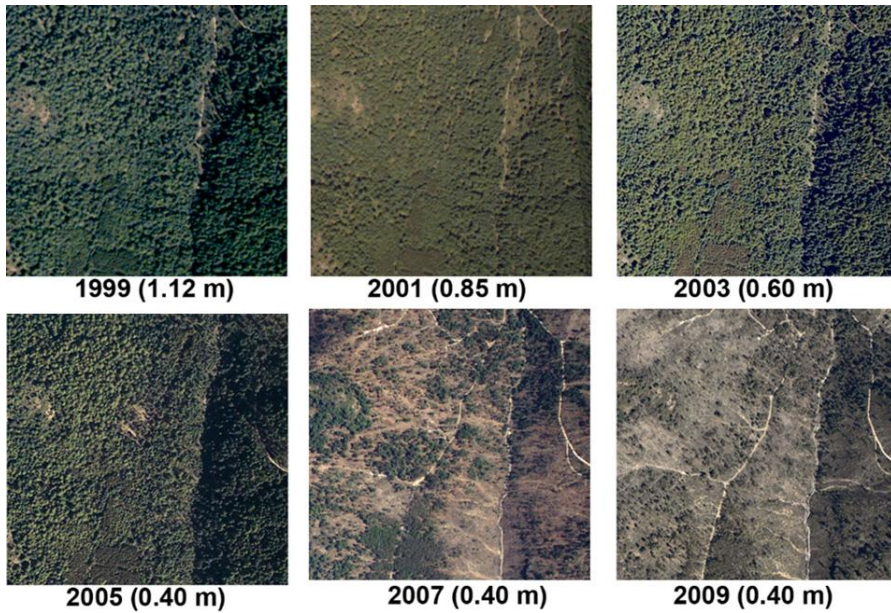


Figura 8.

Delimitación de los diferentes tipos de densidad de cobertura forestal



Figura 9.

Delimitación de cambios de densidad de cobertura forestal (Cerrada a Semiabierta) a partir de fotos digitales de alta resolución (0,4 m/píxel)



2. Resultados y discusión

2.1. Cambios 1999-2001

Los cambios en este primer periodo, desde un año antes de ser decretada la Reserva pero cuando ya había conocimiento de los preparativos para su implementación, dio lugar una perturbación importante de las áreas forestales (433 ha), de las cuales 198 ha fueron por degradación forestal y 235 ha por deforestación (Tabla 2, Figura 10). Las causas de estos procesos quedaron justificadas por permisos de aprovechamiento forestal, y en parte ante la inconformidad por la declaratoria de ampliación del ANP.

Los pagos por servicios ambientales en este periodo se otorgaron a 28 de los 36 predios que conforman la zona núcleo. Sin embargo, la cuantía del pago para este primer periodo fue de un 3.89% con respecto a la cantidad total pagada (25 millones de pesos mexicanos, aproximadamente 1.9 millones de dólares), entre el año 2000 que iniciaron los pagos hasta 2009 (Tabla 3). En este primer periodo no se les pagó por no aprovechamiento, siendo que algunos predios tenían permisos de aprovechamiento antes del establecimiento del decreto de 2000.

Desde un año antes de ser decretada la Reserva se dio lugar una perturbación importante de las áreas forestales (433 ha), de las cuales 198 ha fueron por degradación forestal y 235 ha por deforestación.

Tabla 2.

Cambios en la densidad de la cobertura forestal en la zona núcleo de la RBMM para el periodo 1999-2009

Cambio de cobertura	Periodo										Total	
	1999-2001		2001-2003		2003-2005		2005-2007		2007-2009		ha	%
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%		
Cerrada - Semicerrada	66	3.06	36	1.66	62	2.86	32	1.47	18	0.83	214	9.88
Cerrada - Semiabierta	25	1.17	28	1.29	70	3.23	71	3.27	22	1.01	216	9.97
Cerrada - Abierta	4	0.16	58	2.66	2	0.09	108	4.98	27	1.24	198	9.13
Semicerrada - Semiabierta	34	1.57	54	2.47	20	0.92	45	2.07	15	0.69	168	7.73
Semicerrada - Abierta	15	0.67	27	1.26	29	1.34	53	2.44	10	0.46	134	6.18
Semiabierta - Abierta	54	2.50	72	3.34	21	0.97	46	2.12	21	0.97	215	9.89
Subtotal Degradación	198	9.13	136	6.27	251	11.57	355	16.36	112	5.16	1052	48.48
Cerrada - Deforestado	57	2.61	23	1.06	46	2.12	153	7.05	36	1.66	315	14.50
Semicerrada - Deforestado	18	0.82	18	0.83	21	0.97	58	2.67	17	0.78	132	6.08
Semiabierta-Deforestado	54	2.50	63	2.90	56	2.58	92	4.24	40	1.84	305	14.07
Abierta-Deforestado	107	4.92	49	2.26	101	4.65	76	3.50	36	1.66	369	16.99
Subtotal Deforestación	235	10.85	153	7.05	224	10.32	378	17.42	128	5.90	1118	51.54
Total	433	19.98	289	13.32	475	21.89	732	33.73	241	11.11	2170	100.02

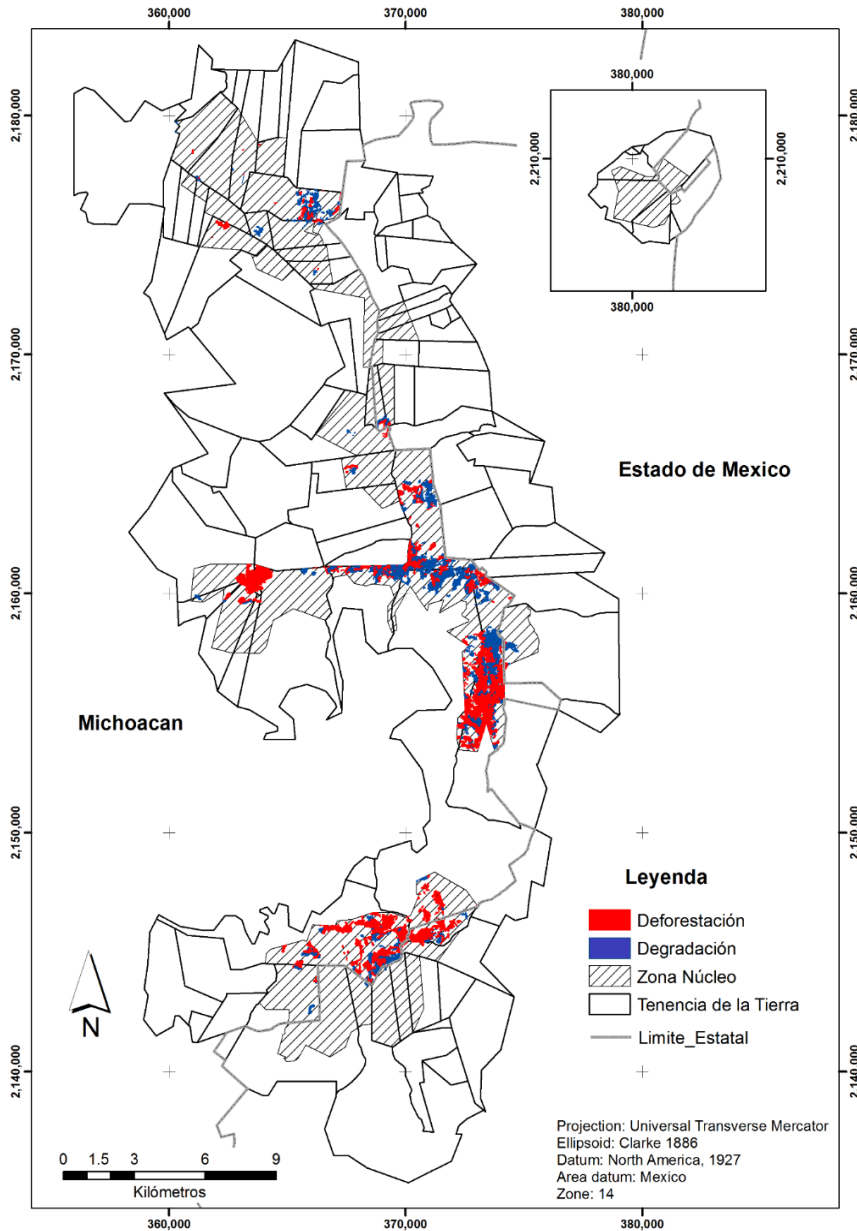
Cambios 2001-2003

Para este segundo periodo aún prevaleció la inconformidad por la designación y ampliación de la Reserva y por la pérdida de sus derechos de aprovechamiento. El cambio total detectado en este periodo fue de 289 ha, de los cuales el 6.27% fue por degradación forestal y el 7.05% por deforestación (Tabla 2, Figura 10). Aun así para este periodo se incluyó a dos nuevas comunidades agrarias, llegando a 30 predios con derecho a pago por servicios de conservación, que representó un 7.61% del total asignado, y por no aprovechamiento, con una cantidad que correspondió al 12.46%, dando un total del 20% del presupuesto asignado (Tabla 3).

El cambio total detectado en este periodo fue de 289 ha, de los cuales el 6.27% fue por degradación forestal y el 7.05% por deforestación.

Figura 10.

Cambios por degradación y deforestación en la zona núcleo de la RBMM.



Cambios 2003-2005

El análisis comparativo de los cambios en ese periodo arrojó una superficie total afectada de 732 ha en la zona núcleo, correspondiente 355 ha a degradación forestal y 378 ha a deforestación (Tabla 2, Figura 10). Estos cambios estuvieron claramente relacionados con la tala ilegal, ya que es el área de conservación estricta y con un apoyo económico a las comunidades que participan en el programa de Pago por Servicios de Conservación. Los principales impactos en este periodo se produjeron en 4 predios no incluidos en el programa de pago por servicios ambientales, y en predios con conflictos agrarios en sus límites. Por otro lado, se dieron cambios en propiedades de carácter gubernamental, sin vigilancia. Los pagos otorgados correspondieron al 34.42% del total de los recursos asignados para todo el periodo (Tabla 3).

El análisis arrojó una superficie total afectada de 732 ha en la zona núcleo, correspondiente 355 ha a degradación forestal y 378 ha a deforestación. Estos cambios estuvieron relacionados con la tala ilegal.

Cambios 2005-2007

En este periodo, los cambios observados fueron los más intensos y dramáticos, afectando a un total de 732 ha en el área, lo que provocó la eliminación de una de las colonias de mariposas monarca ubicadas en estos bosques, que mostraron un deterioro grave en su proceso de hibernación. La degradación forestal afectó a 355 ha y la deforestación por 378 ha (Tabla 2, Figura 10). De esa superficie, 508 ha fueron afectadas en el ejido Crescencio Morales, que no estaba en el programa de pago por servicios ambientales, y en la Comunidad Indígena de Nicolás Romero, que no recibió pago en este periodo, cubriendo entre ambas el 15% de la superficie de la zona núcleo. En este periodo se incluyó un nuevo predio al programa, siendo en ese momento 31 comunidades agrarias las que participaban en los programas de conservación, no aprovechamiento y vigilancia. Los pagos realizados en esa bianualidad fueron el 24.72% del total (Tabla 3).

Los cambios observados fueron los más intensos y dramáticos, afectando a un total de 732 ha en el área, lo que provocó la eliminación de una de las colonias de mariposas monarca ubicadas en estos bosques.

Cambios 2007-2009

En este último período, se redujeron los cambios de cobertura en comparación con los primeros períodos de análisis, afectando sólo a 241 ha, que se distribuyen en 112 ha por degradación forestal y 128 ha por deforestación en la zona núcleo (Tabla 2, Figura 10). En 2009 finalizaron los permisos de aprovechamiento autorizados, lo que puede suponer un cambio de tendencia del estado de conservación de esta ANP. En ese año, ya se incluían 33 comunidades agrarias dentro del programa de pago por servicios ambientales, y quedaban fuera 3 predios, pendientes de incorporación. Con la inclusión paulatina de más núcleos agrarios al programa de PSC en la zona núcleo la cantidad de montos pagado fue en ascenso constante de 3.89 % a 13.29%, para dar un total de 41.41 % (Tabla 3).

Se redujeron los cambios de cobertura en comparación con los primeros períodos de análisis, afectando sólo a 241 ha, que se distribuyen en 112 ha por degradación forestal y 128 ha por deforestación en la zona núcleo.

Tabla 3.

Pagos otorgados dentro del programa de pagos por no aprovechamiento y por servicios de conservación en la zona núcleo de la RBMM

Concepto del pago %	Periodo					Total
	1999-2001	2001-2003	2003-2005	2005-2007	2007-2009	
Conservación	3.89	7.61	7.92	8.7	13.29	41.41
No aprovechamiento	0	12.46	26.5	16.02	3.62	58.59
Predios incluidos	28	30	30	31	33	
Total	3.89	20.07	34.42	24.72	16.9	100.00

La cuantificación de los cambios de densidad de cobertura forestal de diferentes años es utilizada por el Fondo Monarca para el pago por servicios de conservación, logrando reducir la tala en los predios que participan con el Fondo, considerado como un programa exitoso. Poco a poco se han ido incorporando más núcleos agrarios, con lo que se empieza a hacer conciencia de la conservación de los bosques, aunado a la implementación de actividades productivas en la RBMM.

Los resultados de este trabajo suponen una evidencia clara de que la deforestación y la degradación forestal siguen poniendo en peligro la supervivencia de la mariposa monarca en la reserva, ya que los cambios observados, y relacionados con procesos de deforestación y/o degradación de sistemas forestales, es alarmante, especialmente en el período 2005-2007; aunque se ha producido una disminución en el último período de análisis, con una tendencia a la reducción de los impactos en la zona núcleo de la RBMM. El análisis comparativo mostró un cambio total en zona núcleo de 2170 ha entre 1999 y 2009, con base en las evaluaciones bianuales, pero hay superficies que fueron afectadas en dos o más períodos en una superficie de 373 ha, por lo que el área real de cambio en este periodo fue de 1798 ha., y en las cuales se puede considerar que la calidad del bosque disminuyó.

Referencias

- Alix-García, J., de Janvry, A., Sadoulet, E., 2008. The role of deforestation risk and calibrated compensation in designing payments for environmental services. *Environment and Development Economics*. 13, 375-394.
- Alix-García, J., Shapiro, E., Sims K., 2010. Forest conservation and slippage: evidence from Mexico's national payments for ecosystem services program. University of Wisconsin-Madison. Department of Agricultural and Applied Economics, Madison, WI, Staff Paper Series 548, 1-53.
- Brower, L.P.; G. Castilleja; A. Peralta; J. López-García; L. Bojórquez-Tapia; S. Díaz; D. Marmolejo y M. Missrie. 2002. Quantitative Changes in Forest Quality in a Principal Overwintering Area of the Monarch Butterfly in México, 1971-1999. *Conservation Biology*. 2: 346-359.
- Corbera, E., Brown, K., 2008. Building Institutions to Trade Ecosystem Services: Marketing Forest Carbon in Mexico. *World Development*. 36, 1956-1979.
- FRA, 2005. Term and definitions. Global Forest Resources Assessment Update. Forestry Department. Food and Agriculture Organization of United Nations, 33 pp.
- FAO, 1995. Evaluación de recursos forestales. Síntesis mundial. Roma, Italia 48p.
- INEGI, 1994. Ortofotos E14A16b; F14C86f; F14C86e; E14A16c; E14A36a; E14A36b; E14A36d; E14A36e; E14A35; E14A35c; E14A35f; E14A2a6; E14A26b; E14A26d; E14A26e; E14A25c; E14A25f.
- López-García, J. 2007. Análisis de cambio de la cobertura forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (2006 – 2007). Fondo para la Conservación de la Mariposa Monarca (WWF y FMCN). Agosto, 2007. México, D.F.
- López-García, J., 2009. Análisis de cambio en la cobertura forestal en la zona núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca: 2003-2006, in: Aguirre-Gómez, R. (Ed.), *Conceptos y aplicaciones de la geomática en México*. Instituto de Geografía Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F., pp. 195-210.
- López F. 2006. Formación de mosaicos ortorectificados a partir de imágenes aéreas digitales de formato pequeño. Tesis de licenciatura. FFL, UNAM. Pp 1-103.
- Prado J, Hernández A, Peralta-Higuera A. 2003. Small-Format Camera Calibration and Geometric Distortion Removal in Digital Aerial Images. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 19th Biennial Workshop on Color Photography, Videography and Airborne Imaging for Resource Assessment*. Logan, Utah, EEUU. October 6-8. pp 1-6.
- Ramírez-Ramírez, M.I., 2001, Cambios en las cubiertas del suelo en la Sierra de Angangueo, Michoacán y Estado de México, 1971-1994-2000. *Investigaciones Geográficas*, 45: 39-55, Instituto de Geografía, México.
- SEMARNAT, 2001. Programa de Manejo Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F. 138 p.
