

CONSTRUCCIÓN DE MAPAS DE LAI Y fAPAR DE LA RESERVA DE LA BIÓSFERA MARIPOSA MONARCA Y SU COMPARACIÓN CON MAPAS GLOBALES

Tomado de: <http://www.apdm.com.mx/archivos/847>

CONSTRUCTION OF LAI AND fAPAR MAPS OF THE MONARCH BUTTERFLY BIOSPHERE RESERVE AND COMPARISON WITH GLOBAL MAPS

**Omar Champo-Jiménez¹,
María Luisa España-Boquera^{1*},
Nahum Sánchez-Vargas¹,
José Cruz-de-León²,
Philippe Lobit¹ y Luis López-Pérez¹**

¹Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

²Escuela de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Posta Veterinaria y Zootécnica, km 9.5, carretera Morelia-Zinapécuaro, s/n Tarímbaro, Mich., México, C.P. 58880.

***Autora para correspondencia:
mespanaboquera@gmail.com**

Fecha de recepción: 29 de octubre de 2013.
Fecha de aceptación: 21 de mayo de 2014.

RESUMEN

La Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM) presenta un nivel crítico de deforestación que pone en peligro el fenómeno migratorio de la mariposa. Variables biofísicas, como el índice de área foliar (LAI) y la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida por las plantas (fAPAR), pueden ayudar en el diagnóstico del estado de una masa forestal. Es posible construir mapas de alta resolución de estas variables con imágenes satelitales y datos de campo; también existen series de mapas globales de baja resolución. En el presente trabajo se construyeron mapas de LAI y fAPAR de la RBMM, a partir de una imagen SPOT-4 con resolución espacial de 20 m y datos de campo, y se compararon con los mapas de la serie GEOV1 con resolución espacial de 1 km, de las mismas variables y fecha, con el fin de valorar la posibilidad de utilizarlos conjuntamente.

Para construir los mapas de alta resolución, se realizó un muestreo en el verano de 2007, en 62 sitios de bosque en la RBMM. A cada sitio se asociaron los datos radiométricos del pixel correspondiente de una imagen SPOT de agosto de 2007, en la que las zonas con nubes se sustituyeron por los mismos pixeles de imágenes de fechas cercanas. Para cada variable, se ajustaron 45 modelos lineales, entre los que se eligió el de mayor índice de concordancia (0.45). Estas funciones se aplicaron a cada pixel de la imagen SPOT para construir los mapas, que se validaron con datos de campo, presentando errores relativos aceptables (RMSEr, LAI: 20 %; fAPAR: 8 %). La comparación de los mapas con los GEOV1 mostró una correlación significativa ($r > 0.5$) y un error relativo aceptable (RMSEr, LAI: 19 %; fAPAR: 8 %). Este resultado alienta la utilización conjunta de mapas de alta resolución y series de tiempo.

PALABRAS CLAVE: Variable biofísica, SPOT, GEOLAND2, GEOV1, serie de tiempo.

ABSTRACT

The Monarch Butterfly Biosphere Reserve (MBBR) is in a critical situation with levels of deforestation that threaten butterfly migration. Biophysical variables such as the leaf area index (LAI) and the fraction of photosynthetically active radiation absorbed by plants (fAPAR), can help diagnose the state of a forest. These variables can be measured in the field or, in case of a wide area, estimated from a linear regression fit between satellite images and field data, constructing high-resolution maps. There are also time series of low-resolution global maps of these variables available. In this work, we present the construction of LAI and fAPAR maps of the MBBR, using a SPOT image with spatial resolution of 20 m and field data. We compared them with GEOV1 maps of spatial resolution of 1 km, of the same variables and dates in order to assess the possibility of using them together. To build high-resolution maps, a field sampling was conducted in the summer of 2007, at 62 forest sites in the MBBR. Radiometric data of the corresponding pixel of a SPOT image of August 2007 were associated to each sample point; the areas with clouds were replaced by the same pixels in images taken on close dates. For each variable, 45 linear models were adjusted, from which the one with the highest concordance index was selected (0.45). These functions were applied to each pixel of the SPOT image to construct the maps, which were validated with field data, presenting acceptable relative errors (RMSEr, LAI: 20 %; fAPAR: 8 %). Comparison of these maps with GEOV1 maps of the same date, showed a significant correlation ($r > 0.5$) and an acceptable relative error (RMSEr, LAI: 19 %; fAPAR: 8 %). This result encourages the joint use of high resolution maps and time series.

KEYWORDS: Biophysical variable, SPOT, GEOLAND2, GEOV1, time series.

INTRODUCCIÓN

La Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM) es una de las áreas naturales más importantes de México, por ser el hábitat de hibernación de este lepidóptero. A pesar del interés nacional e internacional por su preservación, es un hecho que desde hace algunos años la cantidad de mariposas que llegan a la RBMM ha disminuido exponencialmente (Brower y col., 2011). Existen diferentes factores que afectan a las poblaciones de mariposa Monarca, como la pérdida de grandes volúmenes de plantas denominadas asclepias o algodoncillos (*Asclepias sp.*) en Estados Unidos y Canadá. Estas plantas son de gran importancia en el ciclo de vida de las mariposas Monarca, pero se consideran maleza y compiten con los cultivos comerciales, por lo que se destruyen sistemáticamente con herbicidas (Rendón-Salinas y Tavera-Alonso, 2012), y también por el cambio climático (Barve y col., 2012). En México, el principal problema consiste en que las colonias que llegan encuentran un bosque muy perturbado. El deterioro de la RBMM se ha venido constatando desde la declaración de reserva natural, en 1985 (Brenner, 2009; Rodríguez-Muñoz y col., 2012; Vidal y col., 2013), y se asocia a la falta de planes de manejo (Navarrete y col., 2011), la deforestación (Champo-Jiménez y col., 2012) y la presencia de plagas. Esta situación tiene su origen en la condición de pobreza extrema de la población indígena propietaria del bosque y la corrupción de las autoridades (Aridjis, 2012). Ante dicho escenario, resulta necesario un mecanismo objetivo y permanente de evaluación de la situación del bosque.

El índice de área foliar (LAI: leaf area index) se define como el área de una cara (el haz) de tejido fotosintético, por unidad de superficie de suelo. La fAPAR (fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) corresponde a la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida por las plantas. Estas dos variables biofísicas son indicativas del estado de un dosel vegetal, pues dan información de algunas características, como su biomasa y su capacidad fotosintética, entre otras (Jonckheere y col., 2004). Son muy utilizadas

en modelos ecológicos a nivel regional y global (Baret y Buis, 2008). En trabajos forestales, dichas variables se estiman de manera indirecta (la medición directa es destructiva), a partir de la fracción de huecos del dosel (probabilidad de que un rayo de luz penetre hasta el suelo), utilizando fotografías hemisféricas, tomadas con una cámara digital equipada con un lente de tipo "ojo de pescado" que tiene un campo de visión de 180° (Weiss y col., 2004). En todo caso, la realización de muestreos exhaustivos en una zona de estudio amplia es prácticamente imposible, por lo que, para cubrir áreas extensas de bosque se utilizan imágenes de alta resolución, como las de los satélites SPOT. Se trata de un enfoque empírico, basado en ajustar una relación matemática, o función de transferencia, entre los valores de la variable biofísica medidos en campo y la información radiométrica de los píxeles de la imagen que corresponden a los sitios de muestreo; al calcular esta relación en cada píxel de la imagen, se obtiene un mapa de la variable biofísica de la zona de interés (Baret y col., 2005). Esto se sustenta en el concepto de firma espectral: la forma en que una superficie natural refleja la luz del sol en las diferentes longitudes de onda, depende de sus características físicas (cantidad y distribución de sus elementos foliares) y bioquímicas (contenido de agua, clorofila y otros pigmentos), que a su vez dependen de las especies que componen el dosel, pero también del estado de salud, estrés o enfermedad de las plantas (Jones y Vaughan, 2010).

Actualmente existen iniciativas a nivel internacional para generar mapas globales de variables biofísicas, en forma de series de tiempo (un valor cada 10 días para cada píxel), a partir del acervo histórico de imágenes satelitales de los últimos 30 años. En este caso se trata de un enfoque físico, que se basa en la inversión de modelos de transferencia radiativa, los cuales, simulan cómo los rayos de luz, que partiendo del Sol con una cierta dirección e intensidad, llegan a una superficie vegetal, son absorbidos, transmitidos o reflejados, en función de las propiedades ópticas de las plantas y de su

arquitectura; la calibración y validación se realizan a partir de estimaciones obtenidas con el enfoque empírico, en sitios puntuales (Baret y Buis, 2008). Estas series, como las GEOV1 del proyecto europeo GEOLAND2 (Baret y col., 2013), permiten realizar un seguimiento de las superficies naturales del planeta; sin embargo, para trabajos regionales o locales presentan el inconveniente de su baja resolución espacial (1 km). En este sentido, la combinación de mapas de alta resolución espacial con series de tiempo podría tener muchas aplicaciones para el monitoreo de los bosques.

En el presente trabajo se muestra la construcción de los mapas de LAI y fAPAR de la RBMM, para el verano de 2007, a partir de una imagen SPOT y datos de campo. Estos mapas se comparan con los correspondientes de la serie GEOV1, con el fin de observar el nivel de correspondencia entre ambos, y evaluar las perspectivas de monitoreo de la reserva a partir de su utilización conjunta.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de la zona de estudio

La RBMM se ubica entre los límites del estado de Michoacán y México, sobre el eje volcánico transversal. El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano. Las temperaturas medias anuales en los diferentes microclimas van de 8 °C a 22 °C, y las mínimas para el mes más frío están entre -3 °C y 18 °C. Las precipitaciones promedio van desde 700 mm hasta 1 250 mm. El relieve es accidentado, con altitudes que llegan a los 4 000 msnm. El bosque es principalmente de coníferas, siendo el oyamel (*Abies religiosa*) la especie más representativa (CONANP, 2001). En este estudio se consideró el polígono principal, con una superficie de 56 000 ha, que se encuentra entre las coordenadas 19°44'27" y 19°18'32" de latitud norte y 100°22'26" y 100°09'07" de longitud oeste.

Construcción de mapas de LAI y fAPAR de alta resolución

Datos de campo. Se realizó una campaña de campo, entre los meses de julio y septiembre de 2007, en la que se establecieron 62 unidades elementales de muestreo (ESU, Elementary Simple Unit) de

20 m x 20 m (tamaño equivalente a un pixel de una imagen SPOT 4) (Baret y col., 2005). En cada ESU se tomaron 24 fotografías hemisféricas, con una cámara Nikon Coolpix (E995, Japón), y un lente hemisférico (Nikon Fisheye Converter FC-E8, Japón). De las 24 fotografías, 12 se tomaron con la cámara apuntando hacia el cielo, para que aparecieran las copas de los árboles (up), y 12 con la cámara apuntando hacia el suelo, para que apareciera la vegetación baja (down). Con el fin de asegurar la representación del ESU, en ambos casos, las 12 fotografías se distribuyeron según el siguiente esquema: una en el centro del ESU y una en cada esquina, así como en el centro de cada lado, y tres aleatoriamente en el interior. Las fotografías se analizaron con el programa CAN EYE (INRA, 2013), que estima, entre otras variables, el LAI_{eff} y la fAPAR (Instantaneous Black Sky a las 10 a. m.), a partir de la fracción de huecos bidireccional. El LAI de cada ESU se calculó como la suma del promedio de las 12 mediciones up y las 12 mediciones down; la fAPAR de cada ESU, como el promedio de las 12 mediciones up. Además del bosque propiamente dicho, en la zona de estudio hay otros dos tipos de coberturas: el suelo desnudo y los claros. Durante el trabajo de campo no se tomaron fotografías hemisféricas de estas coberturas, ya que el objeto de estudio era el bosque; sin embargo, con el fin de incluirlas en la base de datos, se buscó asignarles un valor razonable. Para las zonas de suelo desnudo, tales como sitios sin vegetación, construcciones, zonas urbanas, entre otras, se asignó un valor de 0 al LAI y a la fAPAR. Para los claros, como pastizales o llanos entre el arbolado, se tomó el promedio del LAI y la fAPAR de la vegetación baja, obtenido del análisis de las fotografías down.

Datos radiométricos. Para asociar valores radiométricos a los datos de campo, se buscó una imagen satelital SPOT-4 de fecha cercana a los muestreos. Las imágenes SPOT-4 tienen cuatro bandas: verde (centrada en la longitud de onda 545 nm), rojo (645 nm), infrarrojo cercano NIR (835 nm) e infrarrojo medio SWIR (1 665 nm); resolución espacial de 20 m y temporal de 28 días. Dado que todas las imágenes SPOT-4 disponibles en catálogo

para el verano de 2007 presentaban nubes en una parte importante de la zona de estudio, se tomó como base la imagen de agosto 2007 y se utilizaron las imágenes de mayo, junio y julio para completar la información faltante, formando un mosaico.

Las imágenes adquiridas en el formato 1A de Spotimage, se ortorectificaron con el programa Erdas Imagine Inc., tomando puntos de control y utilizando como referencia el mosaico global Landsat-circa-2000 (GLCF, 2013), y como modelo digital de elevación, el Continuo de Elevaciones del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2013). Después, se calibraron y se corrigieron atmosféricamente, utilizando el módulo Flaash (Fast Line-of Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) del programa ENVI (Exelis, Visual Information Solutions, Inc.). Las imágenes corregidas se recortaron, según el límite oficial de la reserva. Dado que algunas de las imágenes contenían la banda SWIR, se prescindió de ella en todos los casos, utilizando únicamente las bandas roja, verde y NIR.

Para asegurar la correspondencia de los valores de reflectancia de todas las imágenes con respecto a la imagen base, se seleccionaron 4 250 pares (mayo-junio-julio y agosto) de pixeles de vegetación, con los que se calcularon regresiones lineales para cada una de las tres bandas espectrales utilizadas. Las ecuaciones ajustadas se aplicaron a las imágenes asociadas. Para la construcción del mosaico, los pixeles no disponibles en la imagen de agosto (seleccionados manualmente) se sustituyeron por los correspondientes de la imagen ajustada de la fecha más cercana en la que estuvieran disponibles.

Con el fin de eliminar del mosaico el efecto del relieve, se aplicó una corrección topográfica, siguiendo el método de corrección-C de Meyer (Meyer y col., 1993). Los datos radiométricos correspondientes a los 62 valores ESUs muestreados, se obtuvieron del mosaico SPOT, corregido topográficamente, ubicando los pixeles correspondientes a los puntos de muestreo a partir de sus coordenadas. Adicionalmente, con el fin de representar otros tipos de cobertura presentes en la zona de estudio, se seleccionaron 10

Tabla 1.

Fórmulas matemáticas de los índices de vegetación utilizados.
Table 1. Mathematical formulas of the vegetation indices used.

Índices de Vegetación	Fórmula matemática
NDVI	$\frac{\text{NIR} - \text{Rojo}}{\text{NIR} + \text{Rojo}}$
SR	$\frac{\text{NIR}}{\text{Rojo}}$
DVI	NIR - Rojo
RDVI	$\sqrt{\text{NDVI} * \text{DVI}}$

puntos característicos de suelo y otros 5 de claros, conformando así una base de datos de 77 puntos. A partir de los valores de reflectancia, se calcularon algunos índices de vegetación, como SR, DVI, NDVI, RDVI, entre otros (fórmulas y definiciones según Jones y Vaughan, 2010) (Tabla 1). Se trata de expresiones matemáticas simples que se calculan en cada pixel a partir de los valores de las reflectancias en las bandas roja e infrarroja.

Funciones de transferencia. Para la definición de las funciones de transferencia se utilizó el método empírico, que consiste en ajustar y validar un modelo matemático entre los valores de la variable biofísica medidos en campo (variables dependientes) y los valores de reflectancia y/o los índices de vegetación (variables independientes) tomados o calculados a partir de la imagen satelital (Baret y col., 2005; Baret y Buis, 2008). Para evitar que las funciones de transferencia dependan de la elección de los datos de ajuste y validación, en particular si no se cuenta con una base de datos amplia, se utiliza la validación cruzada, que consiste en la partición del conjunto de datos en k subconjuntos, $(k-1)$ para el ajuste y 1 para la validación, con k iteraciones. En este trabajo, el ajuste de las funciones se realizó considerando tantas particiones como datos disponibles ($k = 77$).

Se probaron diferentes modelos lineales (45 en total), consistentes en combinaciones simples de las bandas espectrales SPOT y/o los

índices de vegetación calculados a partir de las mismas. Para cada uno de estos modelos, y para cada variable biofísica (LAI y fAPAR), se ajustaron 77 funciones (número de datos disponibles, igual al número de iteraciones de la validación cruzada); y para cada una se calculó la raíz del error cuadrático medio ponderado (PRMSE, Weighted [Ponderado] Root Mean Square Error) utilizando la función Robustfit del programa Matlab (MathWorks, Inc.), considerando los 76 puntos de ajuste. Se trata de un error ponderado, que asigna un peso cercano a 0 a los puntos más alejados de la distribución general (outliers) en la regresión lineal, y un peso de 1 a los puntos que se encuentran sobre la recta de regresión. Para representar a cada uno de los 45 modelos se escogió la función con el PRMSE más bajo, de las 77 ajustadas. Para conocer el nivel de dependencia de esa función con respecto a las particiones de los datos, se calculó la raíz del error cuadrático medio cruzado (CRMSE, Cross Root Mean Square Error), que es un error que considera el total de las iteraciones. Para cada modelo, el CRMSE es el promedio de la diferencia entre el valor medido y el estimado en el punto de validación, es decir en el que no se tomó para el ajuste (expresión matemática en la Tabla 2). Con el fin de evaluar la capacidad del modelo para estimar valores dentro de un rango amplio, se obtuvo el índice de concordancia, d , que varía entre 0 (sin concordancia) y 1 (máxima concordancia con el rango de valores esperado) (Willmott and Wicks, 1980) (Tabla 2).

Se consideró que, para cada variable biofísica, la función que podía estimarla mejor era aquella que, teniendo un alto índice de concordancia, presentaba errores de ajuste (PRMSE) y validación (CRMSE) pequeños. Esta función se seleccionó como función de transferencia, y se calculó el RMSE asociado a la estimación de la variable con esa función, considerando únicamente los valores ESUs (sin suelos, ni claros). Este valor corresponde al error asociado al mapa construido con esa función. También se calculó el RMSE relativo (RMSEr), con respecto al promedio de los valores medidos en campo. Adicionalmente, se calculó el sesgo estadístico (Bias y Bias relativo, Biasr), para conocer si las funciones sobreestimaban o subestimaban los valores con respecto a los datos de campo (Tabla 2).

Construcción de los mapas. Finalmente, las funciones de transferencia elegidas se aplicaron a cada pixel del mosaico SPOT, para obtener los mapas de variables biofísicas de la RBMM, 2007.

Obtención de los mapas de baja resolución

Los mapas GEOVI de LAI, fAPAR y sus errores asociados, correspondientes al 13 de agosto de 2007, fueron obtenidos en línea (Geoland2, 2013), y recortados a la zona de estudio. Se trata de mapas de variables biofísicas, no de imágenes, por lo que no es necesario analizarlos para obtener los valores de LAI y fAPAR. Estos mapas presentan huecos (pixeles faltantes o sin valor asignado, por presencia de nubes en las diez imágenes diarias utilizadas para su cálculo) en algunos puntos de la RBMM.

Comparación de los mapas de alta y baja resolución

Los mapas de alta resolución (20 m), obtenidos a partir de las imágenes SPOT 4, se pasaron al tamaño de pixel de los mapas de baja resolución (1 km), para después compararlos con los GEOVI. Para obtener cada pixel de baja resolución se calculó el promedio y la desviación estándar de los 2 500 pixeles (50 x 50) de alta resolución correspondientes a la misma posición geográfica, sin considerar los pixeles fuera de la zona de estudio (en los límites de la reserva) o los que no pudieron sustituirse al formar el mosaico. Los

Tabla 2.

Expresiones matemáticas de los valores estadísticos calculados: w_i : pesos de la función robustfit ($0 \leq w_i \leq 1$), y_i : valores observados, \hat{y}_i : valores estimados, n : número de puntos, m : número de coeficientes de la regresión lineal, \bar{y} : promedio de los valores medidos, Cov : covarianza.

Table 2. Mathematical expressions for the calculated statistical values: w_i : robustfit function weights ($0 \leq w_i \leq 1$), y_i : observed values, \hat{y}_i : estimated values, n : number of points, m : number of coefficients of the linear regression, \bar{y} : average of the measured values, Cov : covariance.

Estadístico	Descripción	Fórmula
<i>PRMSE</i>	Raíz del error cuadrático medio ponderado	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k-1} w_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - m}}$
<i>CRMSE</i>	Raíz del error cuadrático medio cruzado	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \hat{y}_i $
<i>d</i>	Índice de concordancia	$1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y} + y_i - \bar{y})^2} \right]$
<i>RMSE, RMSEr</i>	Raíz del error cuadrático medio y relativo	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$; $\frac{RMSE}{\bar{y}} * 100$
<i>Bias, Biasr</i>	Sesgo medio y relativo	$\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{n}$; $\frac{Bias}{\bar{y}} * 100$
<i>r</i>	Coefficiente de correlación	$\frac{Cov(y, \hat{y})}{Cov(y, y) Cov(\hat{y}, \hat{y})}$
<i>R²</i>	Coefficiente de determinación	r^2

mapas así obtenidos, correspondientes al promedio de cada variable, se compararon con los equivalentes de la serie GEOV1, considerando únicamente los píxeles válidos en ambos. Se calculó el coeficiente de correlación (r), el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (RMSE) y el sesgo (Bias) (Tabla 2).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mapas de alta resolución

Datos de campo. Los datos de campo de LAI presentaron un valor mínimo de 3 y un máximo de 6.6. Para la misma zona de

estudio, Velasco-López y col. (2010), reportan valores de LAI entre 2 y 4, correspondientes a una campaña de campo realizada en diciembre 2001 (época de secas). La fAPAR presentó un mínimo de 0.72 y un máximo de 0.96. Para el suelo, tanto el LAI como la fAPAR se consideraron iguales a 0; para los claros se asignó 1.48 al LAI y 0.73 a la fAPAR (promedios de los valores down de los valores ESUs).

Datos radiométricos. La Figura 1 muestra las imágenes pre-procesadas. Se puede constatar que las imágenes de mayo y julio no incluyen el total de la RBMM, y que las imágenes de junio, julio y agosto presentan

nubes sobre diferentes lugares de la zona de estudio. La Figura 2 muestra el mosaico resultado de la sustitución de los píxeles no disponibles en la imagen de agosto, por los de la imagen de fecha más cercana en la que estos píxeles estuvieron disponibles; en el mosaico está corregido el efecto del relieve. Se observan en blanco algunas zonas con nubes que no se pudieron sustituir. Este mosaico constituye la base de datos radiométricos de la que se extrajeron los valores de reflectancia asociados a los datos de campo.

Funciones de transferencia. De las 45 funciones elegidas (PRMSE más bajo) para representar cada uno de los 45 modelos lineales considerados para cada variable biofísica, se eliminaron las que estimaban valores absurdos para suelo, quedando 35 funciones válidas para el LAI y 10 para la fAPAR. La Figura 3 resume los diferentes valores estadísticos calculados para cada una de estas funciones, dispuestas por orden creciente del índice de concordancia, d . Este índice tuvo valores relativamente bajos (entre 0.3 y 0.45, para un máximo teórico de 1), lo que puede deberse a que los sitios de bosque muestreados presentaban densidades similares de arbolado. Para cada variable se eligió la función de transferencia que presentó el valor de d más alto (LAI: $d = 0.46$; fAPAR: $d = 0.45$). En todos los casos, el CRMSE resultó menor que el PRMSE. Esto puede deberse a que el CRMSE es un promedio de las diferencias entre cada uno de los valores medidos en campo y su estimación con la función que fue ajustada con todos los puntos, excepto ese. Esto trae como resultado una gran variabilidad en los valores de error asociados a cada modelo, pero un valor promedio bajo. Si la validación de cada modelo se hubiera realizado con todos los puntos o con un subconjunto de puntos reservado para la validación, probablemente el error de validación habría sido superior al de ajuste.

Para el LAI, la función de transferencia elegida entre las ajustadas (la de mayor d) fue:

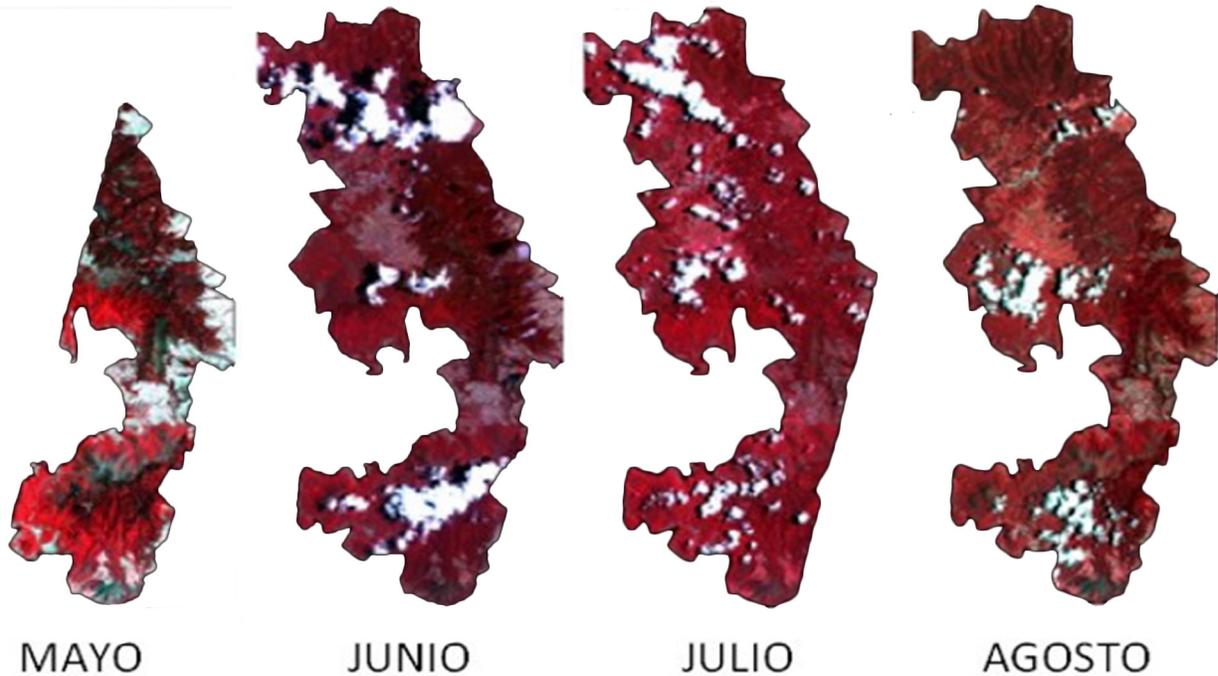
$$LAI = -0.56 + 0.53 * SR$$

donde SR corresponde al índice de vegetación

Figura 1.

Imágenes SPOT ortorectificadas, calibradas, corregidas atmosféricamente y recortadas al límite de la RBMM. La visualización en el sistema RGB corresponde a la combinación: R (cañón rojo): banda 3 (NIR); G (cañón verde): banda 2 (Rojo); B (cañón azul): banda 1 (verde). Esto hace que la vegetación aparezca en rojo.

Figure 1. Orthorectified SPOT images, calibrated and atmospherically corrected, with the MBBR mask. Visualization in the RGB system corresponds to the combination: R (red canyon): band 3 (NIR); G (green canyon): band 2 (red); B (blue canyon): band 1 (green). This makes vegetation appear in red.



© CNES 2011, producida por ERMES-UMSNH bajo licencia de "SPOTIMAGE, S. A."

Simple Ratio, que se calcula para cada pixel como el cociente entre la reflectancia roja y la infrarroja en ese pixel (ver fórmula en la Tabla 1). Esta función presenta un PRMSE intermedio (0.89), si bien su CRMSE es relativamente alto (0.6). En el caso de la fAPAR, la función es:

$$fAPAR = -2.09 + 0.04*Verde + 0.24*Rojo - 0.15*NIR + 1.42*RDVI$$

donde Rojo, Verde y NIR son las reflectancias de cada pixel en las correspondientes bandas del mosaico y RDVI es el índice Renormalize Difference Vegetation Index (ver fórmula en la Tabla 1). Para esta función, el valor de PRMSE es de 0.1 y el de CRMSE es de 0.05; ambos valores son relativamente bajos. Estas funciones no son directamente utilizables para otra imagen, ni siquiera de la misma zona y la misma época del año, porque están adaptadas a los valores de reflectancia de la imagen para las que se ajustaron. Esto implica

Figura 2.

Mosaico SPOT de la RBMM corregido topográficamente. La visualización en el sistema RGB corresponde a la combinación: R (cañón rojo): banda 3 (NIR); G (cañón verde): banda 2 (Rojo); B (cañón azul): banda 1 (verde). Esto hace que la vegetación aparezca en rojo.

Figure 2. SPOT mosaic topographically corrected of the MBBR. Visualization in the RGB system corresponds to the combination: R (red canyon): band 3 (NIR); G (green canyon): band 2 (red); B (blue canyon): band 1 (green). This makes vegetation appear in red.



© CNES 2011, producida por ERMES-UMSNH bajo licencia de "SPOTIMAGE, S. A."

que cada vez que se requiera un mapa de una variable biofísica, para una zona y una fecha, se tendrá que repetir el ajuste entre una imagen y un conjunto de puntos de campo, de esa zona y fecha. Este es el principal inconveniente de los modelos empíricos de construcción de mapas de variables biofísicas, en oposición a los modelos físicos (Baret y Buis, 2008).

Mapas de alta resolución. La Figura 4a muestra los valores de LAI y fAPAR medidos en campo y los compara con los valores estimados por las funciones de transferencia elegidas, en los pixeles correspondientes a los 77 puntos de muestreo (bosque [ESUs], suelo y claros). Para las dos variables, los valores estimados por la función de transferencia elegida, son sistemáticamente más bajos que los medidos en campo, siendo mayor la subestimación para el LAI (Bias = -0.18, Biasr = 3.89 %), que para la fAPAR (Bias = -0.01, Biasr = 1.09 %). Los valores de suelo son sobreestimados en ambos casos, y los de claros, para el LAI; sin embargo, estas coberturas no eran el verdadero objetivo del trabajo y los datos asociados se tomaron con menor rigor que los de bosque. El RMSE asociado al LAI (calculado únicamente para los sitios de bosque) fue de 0.94 (RMSEr = 20.75 %), mientras que el asociado a la fAPAR fue de 0.07 (RMSEr = 8.41 %). En general estos errores se pueden asociar a diferentes factores, como la heterogeneidad del sitio, el ruido radiométrico, la localización del pixel, la precisión del geo-posicionador, la estimación de los datos de campo con fotografías hemisféricas, entre otros (Weiss y col., 2004). Por otra parte, es común que las estimaciones del LAI resulten menos precisas que las de fAPAR. El LAI es una variable descriptiva de la estructura y densidad del dosel y su definición implica tomar en cuenta la coexistencia de diferentes capas de vegetación, la forma y disposición de las hojas, el recubrimiento entre ellas y la presencia de otros elementos, como ramas y troncos. Esto hace que la estimación del LAI a partir de valores radiométricos resulte compleja e imprecisa, en particular para bosques densos de coníferas. En el caso de la fAPAR, se estima la capacidad de la vegetación de interceptar la luz recibida; se considera el total integrado para un día, lo que simplifica la estimación (Baret y col., 2012).

Figura 3.

Errores de ajuste (PRMSE [línea continua]) y validación (CRMSE [línea discontinua]) e índice de concordancia, d, (punto- raya), asociados a las funciones que representan los modelos considerados.

Figure 3. Errors of adjustment (PRMSE [solid line]) and validation (CRMSE [dashed line]) and index of agreement, d, (dot-dashed line) associated to the functions that represent the models considered.

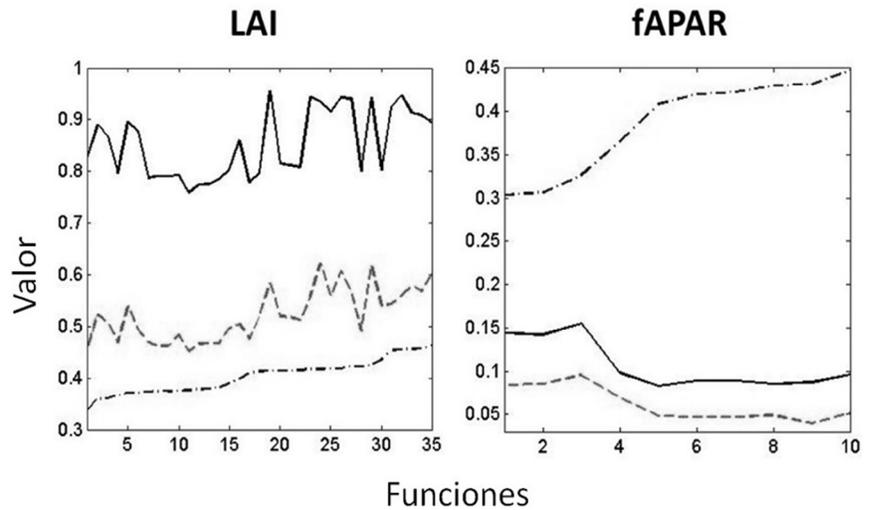
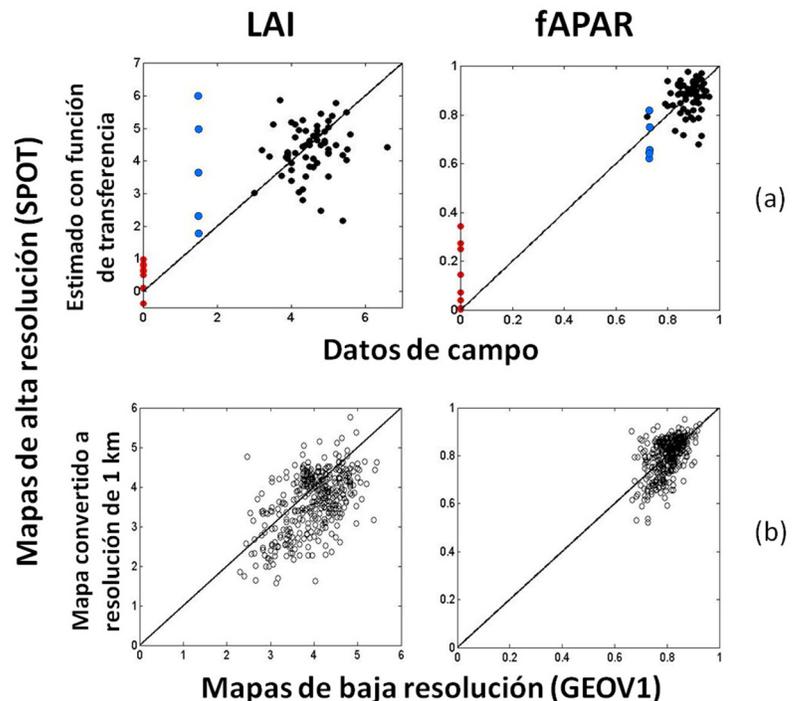


Figura 4.

a) Valores de LAI y fAPAR medidos en campo vs. estimados con las funciones de transferencia (ESUs en negro; suelos en rojo; claros en azul); b) Valor de cada pixel en los mapas GEOV1 de LAI y fAPAR vs. valor del mismo pixel en los mapas de alta resolución, convertidos a resolución de 1 km.

Figure 4. a) Measured field values of LAI and fAPAR vs. estimated with transfer functions (ESUs, in black; soil, in red; grasslands, in blue); b) The value of each pixel in the GEOV1 maps of LAI and fAPAR vs. the value of the same pixel in high resolution maps converted to 1 km resolution.



Comparación de los mapas de alta y baja resolución

La Figura 5a muestra los mapas obtenidos al aplicar las funciones de transferencia a cada pixel del mosaico SPOT (Figura 2). Se puede constatar una buena concordancia entre los mapas y el mosaico. A las zonas de vegetación densa (en rojo oscuro en el mosaico), en particular al norte, centro-oeste y sur de la RBMM, les corresponden valores altos de LAI y fAPAR; en general se trata de las zonas donde el bosque de oyamel está mejor conservado; sin embargo, hay que señalar

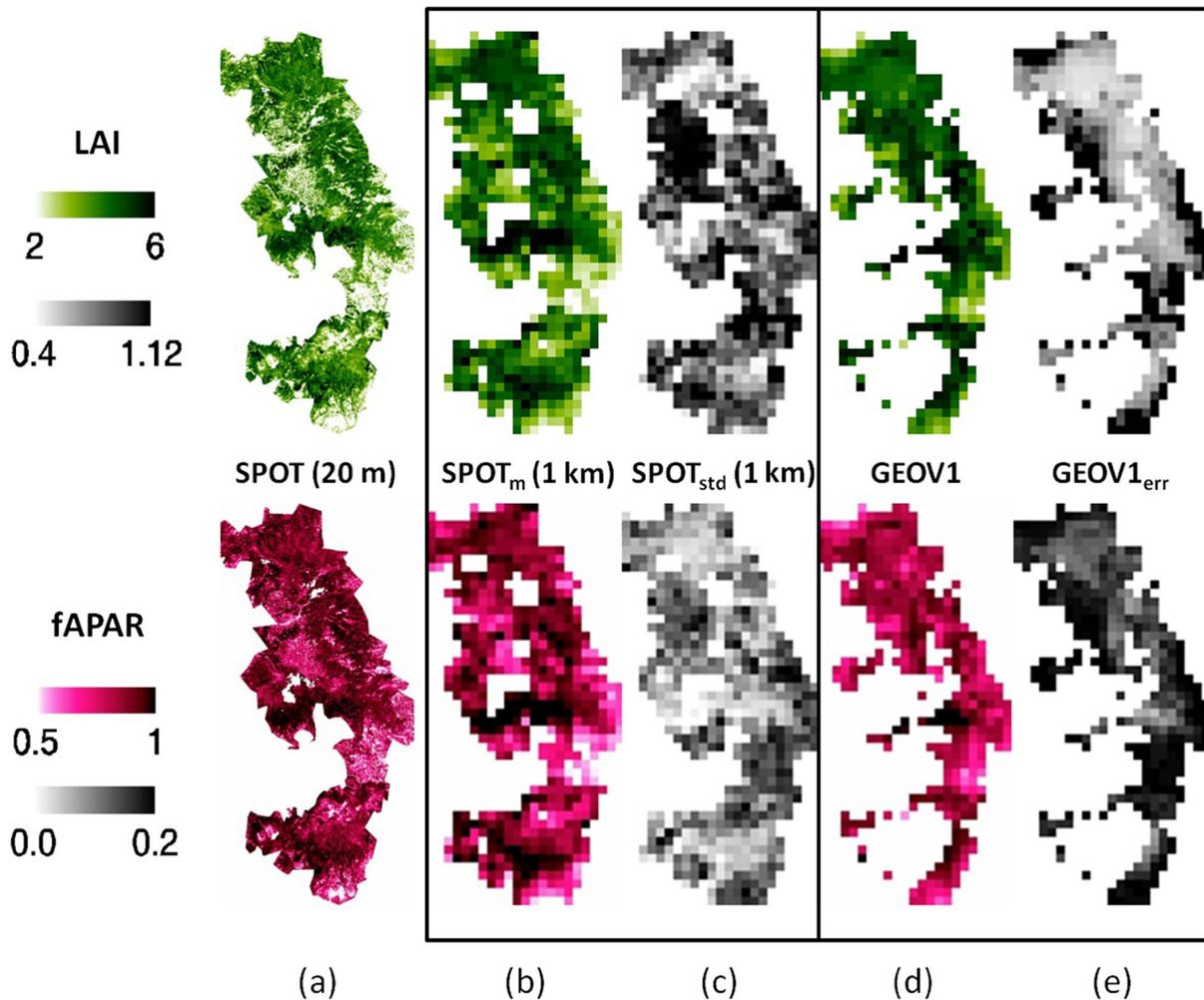
que el nivel más alto de LAI (en el centro), corresponde a una zona de matorral (Ramírez y col., 2008) y de bosque afectado por plagas (Champo-Jiménez y col., 2012), donde, por tratarse de imágenes de la época de lluvias, la vegetación baja es muy abundante y enmascara la ausencia de árboles de oyamel (nótese que en el mosaico corresponde a un tono de rojo más claro que la zona de bosque). Para detectar las zonas donde el oyamel presenta problemas de estrés o enfermedad, sería recomendable utilizar imágenes de la época de secas o comparar varias épocas del

año. Por otra parte, las zonas de agricultura y suelo (rojo claro y tonos azulados en el mosaico), como la zona agrícola y urbana de Angangueo (al centro-noroeste), el límite este de la RBMM, el ejido Crescencio Morales y el norte de Cerro Pelón (al centro-sur), y la punta sur, están asociadas a valores bajos de las variables biofísicas. Asimismo, el mapa de LAI obtenido es coherente con el de Velasco-López y col. (2010), correspondiente al mes de diciembre de 2001 (época de secas), salvo las áreas deforestadas entre las dos fechas, como el ejido Crescencio Morales

Figura 5.

a) Mapas obtenidos al aplicar las funciones de transferencia al mosaico SPOT (generados con datos provenientes de la ERMEXS - UMSNH 2012); b) los mismos mapas a resolución de 1 km; c) desviación estándar asociada al cambio de resolución; d) mapas de la serie GEOV1 correspondientes al 13 de agosto de 2007; e) error asociado al mapa.

Figure 5. a) Maps obtained by applying transfer functions to SPOT mosaic (generated with data from the ERMEXS - UMSNH 2013); b) the same maps converted to a 1 km resolution; c) standard deviation associated with the change of resolution; d) GEOV1 series maps corresponding to August 13, 2007; e) error associated with the map.



(Champo-Jiménez y col., 2012). Ese trabajo se realizó con una metodología más simple, con menos puntos de campo correspondientes a una zona pequeña dentro de la reserva, y menos funciones; no incluye mapa de fAPAR.

La Figura 5b y 5c, muestra los mapas del promedio (SPOTm [1 km]) y la desviación estándar (SPOTstd [1 km]), correspondientes al paso de alta (20 m), a baja resolución (1 km), de los mapas obtenidos con el mosaico SPOT (Figura 5a). En la misma figura aparecen los mapas de LAI y fAPAR de la serie GEOV1 correspondientes al 13 de agosto de 2007 (Figura 5d), así como el error asociado a cada pixel (GEOV1err) (Figura 5e); se observan los huecos debidos a la presencia de nubes. En general se puede constatar una buena correspondencia entre las zonas de alto y bajo LAI y fAPAR en los dos tipos de mapas (Figura 5b) (Figura 5d). Esto constituye una validación adicional de los mapas construidos, ya que la comparación es con respecto a mapas completamente independientes, construidos con una metodología diferente, a nivel global. Se observa que las zonas con mayor desviación estándar (Figura 5c) son también las que presentan el mayor error GEOV1err (Figura 5e); corresponden a las zonas más heterogéneas, que se pueden asociar a pixeles mixtos.

Para las dos variables consideradas, la comparación pixel a pixel (Figura 4b), de los mapas SPOT (convertidos a una resolución de 1 km), con los mapas GEOV1, considerando todos los pixeles válidos en ambos (Figura 5b y 5d), mostró una correlación baja (LAI: $r = 0.53$; $R^2 = 0.28$; fAPAR: $r = 0.52$; $R^2 = 0.27$), pero significativa ($P < 0.05$), y valores aceptables de RMSE (LAI: RMSE = 0.76;

RMSEr = 19.03 %; fAPAR: RMSE = 0.07, RMSEr = 8.17 %), del mismo orden que los obtenidos entre los mapas SPOT y los datos de campo (Figura 4a). Con respecto a GEOV1, los mapas obtenidos a partir de las imágenes SPOT tienden a subestimar los valores, tanto del LAI (Bias = -0.35, Biasr = 8.84 %), como de la fAPAR (Bias = -0.005, Biasr = 0.60 %).

Por su parte, los datos GEOV1 han sido comparados, en un ejercicio de validación global, con mapas de alta resolución de sitios de (3 km x 3 km), en todo el planeta, construidos con una metodología similar a la aquí presentada (Baret y col., 2012). En la comparación global se obtuvo una mejor correlación (LAI: $R^2 = 0.72$; fAPAR: $R^2 = 0.8$) que en la comparación con los mapas del presente trabajo. Esto puede deberse a que los puntos de muestreo utilizados para la validación global de GEOV1 fueron homogéneos y planos, y entre todos representaban diferentes tipos de cobertura, en contraste con las características de la RBMM, que es una zona con mucho relieve y un solo tipo de vegetación (bosque de oyamel). Por el contrario, el error de validación de los mapas globales con los sitios de campo, es mayor (LAI: RMSE = 1.01; fAPAR: RMSE = 0.10) al error asociado a los mapas de este trabajo, lo que también sería una consecuencia del diferente número de coberturas consideradas. En definitiva, la metodología propuesta ha permitido construir mapas coherentes con los mapas globales, de menor error y mayor resolución.

CONCLUSIONES

Se presenta una metodología para la construcción de mapas de alta resolución de

variables biofísicas, que permite cartografiar una zona de interés a partir de una imagen satelital y una cantidad relativamente pequeña de fotografías hemisféricas, cuya obtención y análisis son rápidos, sencillos y económicos. Ante la falta de una imagen completa de la época de los muestreos, se construyó un mosaico con varias imágenes, estrategia que resultó útil y puede aplicarse en lugares donde la nubosidad limita mucho los trabajos de teledetección. Los mapas construidos para cada variable biofísica presentan errores promedio razonables (LAI: RMSEr = 20.75 %; fAPAR: RMSEr = 8.41 %). Estos mapas de alta resolución (convertidos a baja resolución), se compararon con los equivalentes de baja resolución de la serie GEOV1, presentando una correlación significativa ($r > 0.5$, $P < 0.05$) y errores similares (LAI: RMSEr = 19.03 %; fAPAR: RMSEr = 8.17 %), más bajos que los de GEOV1 a nivel global. Este resultado alienta la utilización conjunta de los dos tipos de mapas, lo que ofrece muchas posibilidades para el monitoreo permanente de la reserva, a través de un seguimiento general (con series de tiempo), para detectar zonas de perturbación, y un estudio detallado (con mapas de alta resolución) de las zonas detectadas. ■

AGRADECIMIENTOS

Las imágenes SPOT fueron obtenidas en el marco del convenio ERMEXS-UMSNH 2013. El proyecto fue financiado por la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH. Agradecemos a la RBMM las facilidades ofrecidas, y a Dulce M. Verdín, Enrique Martínez y Germán Champo su participación en los muestreos de campo.

REFERENCIAS

Aridjjs, H. (2012). *Noticias de la Tierra*. México: Random House Mondadori.
Baret, F., Weiss, M., Allard, D., Garrigues, S., Leroy, M., Jeanjean, H., Fernandes, R., Myneni, R., Privette, J., Morisette, J., Bohbot, H., Bosseno, R., Dedieu, G., Di-Bella, C., Duchemin, B.,

Espana, M., Gond, V., Gu, X. F., Guyon, D., Lelong, C., Maisongrande, P., Mougín, E., Nilson, T., Veroustraete, F., and Vintilla, R. (2005). VALERI: a network of sites and a methodology for the validation of medium spatial resolution land satellite products, en *Remote Sensing of Environment*. [En línea]. Disponible en: [http://](http://w3.avignon.inra.fr/valeri/documents/VALERI-RSESubmitted.pdf)

w3.avignon.inra.fr/valeri/documents/VALERI-RSESubmitted.pdf. Fecha de consulta: 11 de noviembre de 2013.
Baret, F. and Buis, S. (2008). Estimating Canopy Characteristics from Remote Sensing Observations: Review of Methods and Associated Problems. En S. Liang (Ed.), *Advances in land remote sensing. System, Modeling, Inversion and*

- Application* (pp. 173-201). New York: Springer Science+Business Media B.V.
- Baret, F., Makhmara, H., Lacaze R., and Smets, B. (2012). BioPar product user manual. LAI, FAPAR, FCOVER, NDVI Version 1 from SPOT/VEGETATION data. [En línea]. Disponible en: http://land.copernicus.eu/global/sites/default/files/products/GIO-GLI_PUM_LAIV1_I1.00.pdf. Fecha de consulta: 11 de noviembre de 2013.
- Baret, F., Weiss, M., Lacaze, R., Camacho, F., Makhmara, H., Pacholczyk, P., and Smets, B. (2013). GEOV1: LAI and FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. Part I: Principles of development and production. *Remote Sensing of Environment*. 137: 299-309.
- Barve, N., Bonilla, A. J., Brandes, J., Brown, J. C., Brunzell, N., Cochran, F. V., Crosthwait, R. J., Gentry, J., Gerhart, L. M., Jackson, T., Kern, A. J., Oberhauser, K. S., Owens, H. L., Peterson, A. T., Reed, A. S., Soberón, J., Sundberg, A. D. y Williams, L. M. (2012). Eventos de mortandad masiva y cambio climático en poblaciones invernales de la mariposa monarca. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 83: 817-824.
- 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., Taylor, O. R., Williams, E. H., Slayback, D. A., Zubieta, R. R., and Ramírez, M. I. (2011). *Decline of monarch butterflies overwintering in Mexico: Is the migratory phenomenon at risk? Insect Conservation and Diversity*. [En línea]. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1752-4598.2011.00142.x/pdf>. Fecha de consulta: 11 de noviembre de 2013.
- Champo-Jiménez, O., España-Boquera, M. L., and Valderrama-Landeros, L. (2012). Pérdida de cobertura forestal en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca, Michoacán, México (2006-2010). *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 18: 143-157.
- CONANP, Comisión Nacional de Áreas Protegidas (2001). Programa de manejo de la reserva de la biosfera Mariposa Monarca. (pp. 159). [En línea]. Disponible en: http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=387. Fecha de consulta: 11 de noviembre de 2013.
- Geoland2 (2013). Dataset series catalogue. Geoland2. [En línea]. Disponible en: <http://www.geoland2.eu/>. Fecha de consulta: 23 de septiembre de 2013.
- GLCF, Global Land Cover Family (2013). Landsat GeoCover data set. Circa 2000. [En línea]. Disponible en: <http://glcf.umd.edu/data/mosaic/>. Fecha de consulta: 3 de septiembre de 2013.
- INRA, National Institute of Agronomical Research (2013). CAN-EYE Software. [En línea]. Disponible en: <http://www6.paca.inra.fr/can-eye>. Fecha de consulta: 20 de septiembre de 2013.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2013). Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0). [En línea]. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/continuoelevaciones.aspx>. Fecha de consulta: 15 de septiembre de 2013.
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., and Baret, F. (2004). Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*. 121: 19-35.
- Jones, H. G. and Vaughan, R. A. (2010). *Remote sensing of vegetation. Principles, techniques, and applications*. New York, USA: Oxford University Press, Inc. 353 Pp.
- Meyer, P., Itten, K. I., Kellenberger, T., Sandmeier, S., and Sandmeier, R. (1993). Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 48: 17-28.
- Navarrete, J. L., Ramírez, M. I., and Pérez, D. (2011). Logging within protected areas: Spatial evaluation of the monarch butterfly biosphere reserve, Mexico. *Forest Ecology and Management*. 262: 646-654.
- Ramírez, M., Miranda, R. y Zubieta, R. (2008). *Vegetación y cubiertas del suelo 2006 (1: 75000). Serie cartográfica Monarca*. Volumen I. Segunda Edición. MBSF-CIGA-UNAM-INE-SEMARNAT-UNESCO.
- Rendón-Salinas, E. and Tavera-Alonso, G. (2012). Monitoreo de la superficie forestal ocupada por las colonias de hibernación de la mariposa monarca en diciembre de 2012. WWF-México, DF, reporte inédito. [En línea]. Disponible en http://awsassets.panda.org/downloads/rep_monitoreo_colonias_mariposa_monarca_2012_2013.pdf. Fecha de consulta: 7 de junio de 2014.
- Rodríguez-Muñoz, G., Mendoza-Ontiveros, M., and Monterrubio-Cordero, J. C. (2012). Cambios en el uso de los recursos forestales por género en una comunidad a partir de la declaración de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca, México. *Spanish journal of rural development*. 3(3): 1-12.
- Velasco-López, S., Champo-Jiménez, O., España-Boquera, M. y Baret, F. (2010). Estimación del índice de área foliar en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 33: 169-174.
- Vidal, O., López-García, J., and Rendón-Salinas, E. (2013). Trends in deforestation and forest degradation after a decade of monitoring in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve in Mexico en *Conservation Biology*. [En línea]. Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/cobi.12138/full>. Fecha de consulta: 11 de noviembre de 2013.
- Weiss, M., Baret, F., Smith, G., Jonckheere, I., and Coppin, P. (2004). Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination: Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology*. 121: 37-53.
- Willmott, C. J. and Wicks, D. E. (1980). An empirical method for the spatial interpolation of monthly precipitation within California. *Physical Geography*. 1(1): 59-73.