



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS Y FORESTALES

PROGRAMA DE MAESTRIA EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA CON
OPCIÓN EN EL ÁREA FORESTAL

**Construcción de mapas de variables biofísicas de la Reserva
de la Biosfera Mariposa Monarca a partir de datos
satelitales y datos de campo para el año 2007**

TESIS

Que para obtener el grado de Maestro en Producción Agropecuaria con opción
en el área Forestal

Presenta:

F.M. Omar Champo Jiménez

Morelia Michoacán, México. Agosto del 2013



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS Y FORESTALES

PROGRAMA DE MAESTRIA EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA CON
OPCIÓN EN EL ÁREA FORESTAL

**Construcción de mapas de variables biofísicas de la Reserva
de la Biosfera Mariposa Monarca a partir de datos
satelitales y datos de campo para el año 2007**

TESIS

Que para obtener el grado de Maestro en Producción Agropecuaria con opción
en el área Forestal

Presenta:

F.M. Omar Champo Jiménez

Directora de tesis: Dra. María Luisa España Boquera.

Doctora en Ciencias de la Información Geográfica

COMITÉ TUTELAR

Dr. Nahúm Modesto Sánchez Vargas

Dr. José Cruz de León

Dr. Adolfo Arturo del Río Mora

Dr. Philippe Christian Marc Lobit

Morelia Michoacán, México. Agosto del 2013

DEDICATORIA

DEDICADA A MIS BENDITOS PADRES QUE ESTAN SIEMPRE A MI LADO
AYUDANDOME A SEGUIR ADELANTE.

A MI MADRE: ESTELA JIMÉNEZ SALDIVAR.
A MIS HERMANOS: ELVIA Y GERMÁN.

A MIS SOBRINOS:
IRVING, OSCAR, EDUARDO Y SEBASTIAN.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a DIOS por darme la oportunidad de realizar los estudios de maestría, a mi madre por su amor incondicional, a mis hermanos y sobrinos por ser parte esencial en mi vida.

Mi más sincero agradecimiento:

A la Dra. María Luisa España Boquera por el apoyo que siempre me ha brindado, de su experiencia y participación en el desarrollo de este trabajo.

A los profesores:

Dr. Nahúm Modesto Sánchez Vargas.

Dr. José Cruz de León.

Dr. Adolfo Arturo del Río Mora.

Dr. Philippe Christian Marc Lobit.

Por brindarme su apoyo y recomendaciones para mejorar el trabajo de tesis.

Al Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales de la UMSNH bajo la dirección del Dr. Raúl Cárdenas Navarro y del Dr. Guillermo Salas Razo por el apoyo y la buena disposición que siempre me mostraron.

A Dulce María Verdín Quintero, Enrique Martínez de la Cruz, los alumnos de la clase de teledetección y a mi hermano Germán Champo, por ayudarme en el trabajo de campo que se realizó entre los meses de Julio y Septiembre del 2007.

A la Coordinación de Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por el financiamiento del proyecto.

A la Secretaría de Marina por su disposición en proporcionarnos las imágenes de satélite, en el marco del convenio ERMEXS-UMSNH.

A la Dirección de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca, por las facilidades prestadas para la realización de este trabajo.



EL PROGRAMA DE MAESTRÍA EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA DEL
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS Y FORESTALES
DE LA UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO



DR. MAURICIO PEREA PEÑA
COORDINADOR GENERAL DEL PROGRAMA
DE MAESTRÍA EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA
DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
AGROPECUARIAS Y FORESTALES
UMSNH
P R E S E N T E.

Por este conducto nos permitimos comunicarle que, después de haber revisado el manuscrito final de la Tesis titulada: "Construcción de mapas de variables biofísicas de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca a partir de datos satelitales y datos de campo para el año 2007", presentado por el Fis. Mat. OMAR CHAMPO JIMÉNEZ, consideramos que reúne los requisitos suficientes para ser publicado y defendido en Examen de Grado de Maestro en Ciencias.

Sin otro particular por el momento, reiteramos a usted un cordial saludo

ATENTAMENTE
Morelia, Michoacán, 27 de Mayo de 2013

MIEMBROS DE LA COMISIÓN REVISORA

Dra. Ma. Luisa España Boquera
Directora de Tesis

Dr. José Cruz de León
Vocal

Dr. Nohúm Modesto Sánchez Vargas
Vocal

Dr. Adolfo Arturo del Río Mora
Vocal

Dr. Philippe Christian Marc Lobit
Vocal

ÍNDICE

ABREVIACIONES/ABREVIATIONS	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT	VIII
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
Variables biofísicas	1
Antecedentes: el proyecto VALERI y las iniciativas globales.....	2
La Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca	3
HIPÓTESIS.....	5
OBJETIVOS	6
OBJETIVO GENERAL	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	7
CAPÍTULO 1	8
1.1 INTRODUCCIÓN.....	8
1.2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	9
1.2.1 Descripción de la zona de estudio.....	9
1.2.2 Esquema de muestreo en campo.....	13
1.2.3 Obtención de datos de LAI y fAPAR.....	15
1.2.4 Análisis de los datos de campo de LAI y fAPAR.....	17
1.2.5 Obtención de muestras para el contenido de Clorofila	22
1.2.6 Análisis de las muestras de contenido de Clorofila.....	22
1.2.7 Valores de las variables biofísicas en suelo desnudo y claros	24
1.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
1.3.1 Valores de las variables biofísicas en vegetación.....	24
1.3.2 Valores de las variables biofísicas en suelo desnudo y claros	26
1.4 CONCLUSIÓN.....	27

1.5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
CAPÍTULO 2		29
2.1	INTRODUCCIÓN.....	29
2.2	MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
2.2.1	Área de estudio	30
2.2.2	Análisis de las imágenes satelitales.....	30
2.2.3	Extracción de los datos radiométricos	37
2.3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
2.3.1	Análisis de las imágenes satelitales.....	37
2.3.2	Extracción de los datos radiométricos	49
2.4	CONCLUSIÓN.....	52
2.5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
CAPÍTULO 3		54
3.1	INTRODUCCIÓN.....	54
3.2	MATERIALES Y MÉTODOS.....	55
3.2.1	Área de estudio	55
3.2.2	Índices de vegetación	55
3.2.3	Función de transferencia	57
3.2.4	Construcción de mapas de las variables biofísicas de la RBMM.....	63
3.3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	64
3.3.1	Función de transferencia	64
3.3.2	Construcción de mapas de las variables biofísicas de la RBMM.....	72
3.4	CONCLUSIÓN.....	74
3.5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
CONCLUSIÓN GENERAL.....		77
RECOMENDACIONES.....		80
PERSPECTIVAS.....		80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		81
ANEXO 1.....		85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Zona de estudio. En naranja se muestra la zona núcleo y en verde la zona de amortiguamiento.	9
Figura 1-2. Estrategia de muestreo en campo	14
Figura 1-3 Sitios muestreados en 13 cuadrantes de 300x300 m ² dentro de la RBMM con 64 ESUs.	15
Figura 1-4. Ejemplo de fotografías hemisféricas tomadas hacia arriba (up) y abajo (down).....	16
Figura 1-5. Posición de las imágenes tomadas en cada ESU.	16
Figura 1-6. Esquema general de funcionamiento del programa CAN-EYE.....	17
Figura 1-7. Preprocesamiento y clasificación de las imágenes hemisféricas....	19
Figura 1-8. Reporte en formato html de las variables biofísicas LAI y fAPAR..	21
Figura 1-9. Esquema en la extracción de Clorofila: (a) muestra de hoja, (b) baño maría y (c) lectura en el espectrofotómetro lambda 40.....	23
Figura 1-10. Histograma de las variables biofísicas medidas en campo.....	25
Figura 2-1. Árbol de decisión para la construcción del mosaico.	35
Figura 2-2. Imágenes SPOT antes (arriba) y después de la Ortorectificación.	38
Figura 2-3. Imágenes calibradas, corregidas atmosféricamente y recortadas al límite de la RBMM.....	39
Figura 2-4. Grupo de datos para el ajuste de regresión lineal entre las bandas espectrales.....	40
Figura 2-5. Ajuste de regresión lineal entre las bandas espectrales utilizando robustfit.	41
Figura 2-6. Pixeles no disponibles para cada imagen Satelital.....	44
Figura 2-7. Mosaico de pixeles no disponibles de las 4 imágenes de satélite.	45
Figura 2-8. Mosaico SPOT del mes de Agosto del 2007.	46
Figura 2-9. Mosaico SPOT de la RBMM corregido topográficamente.	48
Figura 2-10. Acercamiento de una parte del mosaico de la RBMM del verano 2007, antes y después de la corrección topográfica.	49
Figura 2-11. Histograma de los datos radiométricos y sus promedios.....	50
Figura 3-1. Errores de las funciones de transferencia de LAI. De ajuste (RMSE de mínimos cuadrados en color rojo, PRMSE en color negro, valores extremos en número) y validación (CRMSE en color magenta e índice de concordancia <i>d</i> en color azul).	66
Figura 3-2. Valores medidos vs. Valores estimados, Se observan en negro los valores biofísicos en cada ESU, los valores de suelo desnudo en rojo y en azul los de claro.	67
Figura 3-3. Comparación de las relaciones Medido-Estimado. Línea negra: ecuación de regresión. Línea roja: ecuación de regresión de los valores estimados.	70

Figura 3-4. Histogramas de las variables biofísicas Medido-Estimado.	71
Figura 3-5. Mapas de las variables biofísicas de LAI, fAPAR, Clorofila _{a+b} *LAI de la RBMM para el verano del 2007.....	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Prueba de normalidad de los datos de campo.	26
Tabla 1-2. Valores asignados a las variables biofísicas de suelo desnudo y claro.	26
Tabla 2-1. Error RMSE del ajuste de regresiones lineales.	42
Tabla 2-2. Ecuaciones de ajuste para cada banda de cada imagen.....	43
Tabla 2-3. Coeficiente de correlación que van desde 0.3 a 0.01, antes y después de aplicar la corrección topográfica.	47
Tabla 2-4. Prueba de normalidad de los datos radiométricos.....	50
Tabla 2-5. Valores de reflectancia de suelo desnudo y de claros.	51
Tabla 3-1. Índices de vegetación utilizados en este trabajo. Verde, Rojo y NIR, se refiere a la reflectancia del pixel en estas bandas espectrales de la imagen SPOT.	56
Tabla 3-2 Modelos lineales probados para cada variable biofísica, donde a_i , b_i , c_j , d_j , e_k con $i=1, \dots, 45$, $j=14, \dots, 45$ y $k=36, \dots, 45$, son los parámetros de ajuste de cada modelo lineal.....	58
Tabla 3-3 Funciones de transferencia de las variables biofísicas y sus errores de ajuste y validación.....	69
Tabla 3-4 Prueba de normalidad de los variables biofísicas estimadas.....	72

ABREVIACIONES/ABREVIATIONS

ALA: Ángulo promedio de inclinación de las hojas/Average Leaf inclination Angle

AVHRR: Radiómetro Avanzado de muy Alta Resolución/Advanced Very High Resolution Radiometer

COFOM: Comisión Forestal del estado de Michoacán/Forestry Commission of the state of Michoacán

ChIRGreen: Índice de Clorofila en Reflectancia Verde/Chlorophyll Reflectance Index Green

CYCLOPES: Ciclo del carbono y cambio en la tierra en productos de observación de un conjunto de satélites/*Cycle and Change in Land Observational Products from an Ensemble of Satellites.*

CONANP: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protejidas/National Commission of Protecting Natural Areas

DEM: Modelo Digital de Elevación/Digital Elevation Model

DMSO: Dimetil Sulfoxido/Dimethyl Sulfoxide

DVI: Diferencia de Índice de Vegetación/Differenced Vegetation Index

ESA: Agencia Espacial Europea/European Spatial Agency

ESU: Unidad Elemental de Muestreo/ Elementary Simple Unit

fAPAR: fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa Absorbida / fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation

FCover: Fracción de Cobertura Vegetal/Fraction of Vegetation Cover

fIPAR: fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada/fraction of Intercepted Photosynthetically Active Radiation

FLAASH: Línea de Visión Rápida del Análisis Atmosférico de Hipercubos Espectrales/Fast Line-of Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes

GEMI: Índice de Monitoreo del Medio Ambiente Global/Global Environmental Monitoring Index

GMES: Vigilancia Mundial del Medio Ambiente y Seguridad/Global Monitoring of the Environment and Security

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía/ National Institute of Statistics and Geography

INRA: Instituto Nacional para la Investigación Agronómica/Institute National pour la recherche Agronomique

LAI: Índice de Área Foliar/Leaf Area Index

LANDSAT: Satélite de la Tierra/Land Satellite

MERIS: Espectrómetro de Imágenes de Resolución Media/Medium Resolution Imaging Spectrometer

MSAVI2: Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Modificado 2/ Modified Soil Adjusted Vegetation Index 2

MTCI: Índice de Clorofila Terrestre / Terrestrial Chlorophyll Index

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada/Normal Difference Vegetation Index

OSAVI: Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Optimizado/Optimized Soil Adjusted Vegetation Index

RBMM: Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca/Monarch Butterfly Biosphere Reserve

RDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Renormalizada/Renormalized Difference Vegetation Index

REP: Posicionamiento al Rojo/Red Edge Position

RMSE: Raíz del Error Cuadrático Medio/Root Mean Square Error

RN: Rojo Infrarrojo Cercano/Red NIR

NOAA: Administración Nacional Oceánica y Atmosférica/National Oceanic and Atmospheric Administration

SAVI: Índice de Vegetación Ajustado al Suelo/Soil Adjusted Vegetation Index

SEMAR: Secretaría de Marina/Ministry of Navy

SPOT: Satélite Para la Observación de la Tierra/Satellite d'observation de la Terre

SR: Radio Simple/Simple Ratio

UMSNH: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

VALERI: Instrumentos de Teledetección para la Validación de Tierras Europeas /Validation of Land European Remote sensing Instruments

RESUMEN

La Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM) es una de las reservas naturales más importantes de México; sin embargo, a pesar de los intentos de conservación y rescate, el bosque se encuentra en un estado lamentable de deterioro. Las variables biofísicas como el índice de área foliar (LAI), la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida (fAPAR) y el contenido de clorofila (Clorofila) en las hojas de las plantas, son especialmente interesantes para evaluar el estado de un ecosistema. El objetivo de este trabajo fue obtener los mapas de estas variables biofísicas para la cubierta vegetal de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca en el verano 2007. Se obtuvieron los datos de campo correspondientes a las variables del LAI y fAPAR (fotografías hemisféricas, analizadas con CAN-EYE) y Clorofila (extracciones en DMSO), entre Julio y Septiembre de 2007, en 62 sitios de muestreo de 20 m x 20 m, al interior de la reserva. Se consideró un valor de cero para todas las variables biofísicas en suelo desnudo y valores aproximados para los claros. Los datos radiométricos asociados a cada punto de muestreo, se obtuvieron de un mosaico construido tomando como base una imagen SPOT de Agosto 2007, en la que se sustituyeron los píxeles no disponibles por los correspondientes en imágenes de Julio, Junio o Mayo 2007, previamente ajustadas a los valores de Agosto. Para representar los valores de suelo y claros, se tomaron píxeles adicionales, completando una base de datos de 77 puntos. Para cada variable, se ajustaron y validaron 45 modelos lineales entre los datos de campo y los radiométricos, entre los que se eligió, como función de transferencia, el de mayor índice de concordancia entre valores medidos y estimados, con errores de ajuste y validación razonables. Los valores de índice de concordancia de las tres funciones están alrededor de 0.45, lo que indica que pueden representar la variabilidad de la zona de estudio. Finalmente, se obtuvieron los mapas de las variables biofísicas de la RBMM para el mes de Agosto del año 2007 aplicando las funciones de transferencia a cada píxel del mosaico SPOT. La calidad de cada mapa se evaluó en términos del RMSE relativo asociado a la estimación de los datos de campo con la función de transferencia correspondiente. Para el LAI y la Clorofila, el error promedio es del orden del 20%, mientras que para el fAPAR es menor (8%).

ABSTRACT

The Monarch Butterfly Biosphere Reserve (MBBR) is one of the most important natural reserves of México, however, despite efforts at conservation and rescue, the forest is in a state of deterioration. The biophysical variables such as the leaf area index (LAI), the fraction of absorbed photosynthetically active radiation (fAPAR) and chlorophyll content (Chlorophyll) in leaves of the plants, are especially interesting to evaluate the state of an ecosystem. The objective of this study was to obtain maps of these biophysical variables to the vegetation cover of Monarch Butterfly Biosphere Reserve in the summer 2007. We obtained the field data for the variables of the LAI and fAPAR (hemispheric photographs, analyzed with CAN-EYE) and chlorophyll (extraction in DMSO), between July and September 2007, in 62 sample sites of 20 m x 20 m, inside the reserve. A value of zero was considered for all of the biophysical variables for bare soil and approximate values for clear sites. The radiometric data associated with each sampling points, were obtained from a mosaic built on the SPOT base image of August 2007, in which the pixels non-available were replaced by the corresponding ones of the images of July, June and May 2007, previously adjusted to the values of the SPOT image of August. To represent the values of bare soil and clear, extra pixels were taken, completing a data base of 77 points. For each variable 45 linear models were adjusted and validated between field and radiometric. The model that presented greater concordance index between measured and estimated values and reasonable values of adjustment and validation errors was chosen as the transfer function. The concordance index of the three functions have values around 0.45, which indicates that they can represent the variability of the study area. Finally, the biophysical variables maps of the MBBR were obtained for the month of August of 2007 applying the transfer functions to each pixel of the SPOT mosaic. The quality of each map was assessed in terms of the relative RMSE associated with the estimation of field data with the corresponding transfer function. For LAI and chlorophyll, the average error is of the order of 20%, while for the fAPAR is lower (8%).

INTRODUCCIÓN GENERAL

Variables biofísicas

Entre los diferentes parámetros que se pueden considerar para evaluar el estado de la vegetación en un ecosistema, el índice de área foliar, la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida y el contenido de clorofila en las hojas de las plantas, son especialmente interesantes.

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 (Watson, 1947, Myneni et al., 2002) y representa el tamaño de la interface planta-atmósfera. Es la principal variable utilizada para modelar la fotosíntesis y la evapotranspiración y describir el microclima de la planta (Jonckheere et al., 2004, Weiss et al., 2004). Proporciona información de la dinámica y productividad de los ecosistemas forestales (Aguirre-Salado et al., 2011), por lo que es un parámetro clave en modelos ecológicos regionales y globales (Wenze et al., 2006, Aguirre-Salado et al., 2011).

La **fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida** (fAPAR, *fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*) por un dosel vegetal, se relaciona con la capacidad fotosintética del dosel (Fensholt et al., 2004). De esta manera, el fAPAR es un parámetro biofísico básico para caracterizar las superficies vegetales.

Para medir estas variables de manera directa se tienen que emplear métodos destructivos, que además son costosos y difíciles de implementar. Por esta razón, normalmente se estiman de manera indirecta a partir de otras variables más sencillas de medir, en particular las relacionadas con la intercepción de la luz, como la fracción de huecos (Weiss et al., 2004). Para ello se utilizan fotografías hemisféricas, que se analizan con programas especialmente diseñados.

La **clorofila** es el elemento clave de la fotosíntesis. Por su característico patrón de absorción, en el azul y el rojo, y un máximo de reflexión en el verde, determina la firma espectral de las plantas en el visible. Para las longitudes de onda del infrarrojo cercano, los pigmentos foliares son transparentes, por lo que en esta parte del espectro las plantas reflejan alrededor del 50% de la luz recibida y transmiten prácticamente el otro 50%.

Para el cálculo del contenido de clorofila, a nivel de las hojas, suele recurrirse a las mediciones directas, por extracción con solventes, como acetona o DMSO (dimetil sulfóxido), y análisis de colorimetría; también existen equipos como el SPAD (Soil Plant Analysis Development, MCL502 Minolta 502 o 512) que permiten realizar mediciones indirectas, que deben calibrarse. A nivel de un dosel, el contenido de clorofila corresponde al contenido medido por unidad de superficie foliar, multiplicado por la superficie foliar total.

La realización de muestreos exhaustivos para la estimación de las variables biofísicas descritas, incluso con mediciones indirectas, es prácticamente imposible en una zona de estudio amplia. La solución para cubrir grandes zonas y realizar la cartografía correspondiente, es combinar algunas mediciones de campo con información radiométrica proporcionada por imágenes satelitales.

Antecedentes: el proyecto VALERI y las iniciativas globales

El proyecto VALERI (VALidation of Land European Remote sensing Instruments) surgió con el objetivo de obtener mapas de variables biofísicas de la vegetación, de alta resolución, a partir de funciones de transferencia que se obtienen de regresiones lineales entre datos de campo y datos radiométricos de la zona de estudio, para una misma fecha.

El proyecto se desarrolló en más de treinta sitios de muestreo alrededor del mundo, con diferentes tipos de vegetación. Uno de los sitios se estableció en el

interior de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, en Sierra Chincua. Bajo el protocolo VALERI se obtuvo un mapa del índice de área foliar para el mes de diciembre del año 2001 (Velasco López et al., 2010).

Los resultados generados con el proyecto VALERI se utilizaron en el desarrollo y la validación de sistemas automáticos de construcción de mapas de variables biofísicas de media o baja resolución, a partir de modelos de transferencia radiativa y/o redes neuronales. Tal es el caso del proyecto CYCLOPES (*CYcle and Change in Land Observational Products from an Ensemble of Satellites*) de la iniciativa GMES (*Global Monitoring of the Environment and Security*).

Los datos CYCLOPES fueron generados utilizando imágenes del sensor SPOT/VEGETATION (VGT) y consisten en series de tiempo, con pasos de 10 días y resolución de 1 km, entre 1999 y 2007. Este proyecto constituye el primer esfuerzo por poner a disposición del público información con un nivel de análisis superior al de las imágenes estándar, concatenada en periodos regulares de tiempo, en una sola fuente de datos. A partir de la experiencia generada con el proyecto CYCLOPES, el GMES lanzó el proyecto GEOLAND2, con el fin de ofrecer productos de mejor calidad y extendidos sobre un periodo de tiempo más largo (1999-2012). Las series de tiempo se han podido extender retrospectivamente con imágenes más antiguas (NOAA-AVHRR), cubriendo el periodo (1982-1998).

La Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca

La Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM) es una de las reservas naturales más importantes de México por el fenómeno de migración de la mariposa Monarca.

Las mariposas Monarca migran en otoño desde el oriente y occidente de Estados Unidos y sur de Canadá, a donde regresan en primavera, a finales de Marzo y

principios de Abril (Brower, 1985, Calvert and Brower, 1986). Las mariposas que provienen del occidente (montañas rocallosas) se establecen en diferentes partes de hibernación en los Estados Unidos. Sólo las mariposas que provienen del oriente llegan a México, estableciéndose en los bosques de oyamel que se encuentran a más de 2000 msnm, con temperaturas frías y ambientes húmedos.

Si bien desde el año de 1980 se establecieron en México planes para la conservación de la migración de la Monarca, no fue hasta el 9 de Agosto de 1986 que el gobierno federal declaró bajo protección una zona de 16,110 ha para la hibernación, reproducción y copulación de la mariposa. Posteriormente, el 10 de noviembre del año 2000, se declaró un nuevo decreto que contempla una superficie protegida más amplia, de 56,259 ha, con una zona núcleo de 13,551.55 ha para conservar los recursos naturales y la biodiversidad, y otra zona de amortiguamiento, de 42,707.42 ha, para el aprovechamiento de los recursos. La declaración de reserva protegida en 1986 dio lugar además a la veda total de actividades forestales, lo que agravó la situación económica de la población, que ya se encontraba en niveles de pobreza muy altos. A este escenario también contribuyó el cierre de fuentes de empleo, como la compañía minera de Angangueo, los viveros frutícolas Cariflor y las instalaciones industriales de la unión de Ejidos Melchor Ocampo que ofrecían alrededor de 1,170 empleos.

Uno de los problemas más graves de la RBMM es la deforestación que se ha venido dando a través del tiempo, incluso dentro de las áreas protegidas, provocando el deterioro del bosque y poniendo en peligro el hábitat de la mariposa monarca. Recientemente la situación se ha complicado, por la presencia de grupos armados ajenos a la zona y que pueden estar ligados al narcotráfico (Champo-Jiménez et al., 2012). Ha habido algunos esfuerzos por parte de las autoridades, enfocados a lograr que los habitantes de las comunidades de la reserva se involucren en la conservación. En este sentido, se han desarrollado planes de manejo y se han pagado incentivos, con la intención de proteger el bosque y combatir la pobreza. Sin embargo, no se han logrado los resultados esperados y el deterioro del bosque continúa.

Se han realizado muchas investigaciones sobre la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. La mayoría de ellas han sido enfocadas a los aspectos ecológicos del lepidóptero (Brower, 1995, Brower et al., 2009, Brower et al., 2012) y otras a la degradación del bosque (Brower et al., 2002, Ramírez et al., 2003, Honey-Rosés et al., 2004, Ramírez and Zubieta, 2005, López-García, 2007, Champo-Jiménez et al., 2012) además de los aspectos socio-económicos y ambientales (García-Serrano et al., 2007).

HIPÓTESIS

Existen relaciones entre los valores de reflectancia de cada pixel de una imagen satelital y las características de la vegetación presente en la superficie correspondiente a ese pixel, en el momento en que se tomó la imagen.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Obtener los mapas de las variables biofísicas del índice de área foliar, de la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida y contenido de clorofila, de la cubierta vegetal de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca para el verano 2007.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Obtener los datos de campo del LAI, fAPAR y contenido de Clorofila en la RBMM.
2. Construir un mosaico SPOT con imágenes con nubes de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca para el verano del 2007.
3. Obtener los datos radiométricos correspondientes a los puntos de muestreo en campo.
4. Diseñar funciones de transferencia para estimar las variables biofísicas de interés a partir de datos radiométricos.
5. Aplicar las funciones de transferencia diseñadas al mosaico SPOT para obtener los mapas de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca para el verano 2007.

ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente documento se estructura en tres capítulos:

En el **primer capítulo** se muestra la estrategia de muestreo para obtener los datos de campo de fotografías hemisféricas y muestras de hojas de oyamel en unidades elementales de muestreo de 20 m x 20 m de superficie. Se utiliza un software especializado en el análisis de fotografías hemisféricas para medir el LAI y fAPAR, y técnicas de extracción de clorofila para medir el contenido de Clorofila.

En el **segundo capítulo** se analizan las imágenes satelitales de la zona de estudio para obtener los datos radiométricos asociados a los puntos de campo. Se construye un mosaico de la imagen SPOT con imágenes de apoyo cercanas a la fecha de muestreo, con la finalidad de sustituir las nubes que cubren gran parte de la zona de estudio, en la que se pierde información radiométrica. Posteriormente se realiza una corrección topográfica para eliminar el efecto del relieve de la zona de estudio. Finalmente se obtienen los datos radiométricos del mosaico SPOT.

En el **tercer capítulo** se busca obtener funciones de transferencia (relaciones empíricas entre los dos conjuntos de datos) entre los datos de campo y radiométricos que se obtuvieron en el capítulo 1 y 2 respectivamente. Se selecciona la mejor función para estimar cada variable biofísica (LAI, fAPAR y contenido de Clorofila). Se utiliza la información radiométrica de cada pixel del mosaico que se construyó en el capítulo 2 para aplicarla a la función de transferencia de cada variable y obtener los mapas de alta resolución de las variables biofísicas de la RBMM para el verano 2007.

CAPÍTULO 1

Datos de campo

1.1 INTRODUCCIÓN

Las variables biofísicas LAI (*leaf área index*), fAPAR (*fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*) y contenido de Clorofila son interesantes en aplicaciones forestales o de agricultura de precisión porque permiten conocer el estado de la vegetación y detectar situaciones de estrés o enfermedad. Sin embargo, las mediciones *in situ* son difíciles de obtener sobre grandes extensiones de superficie, incluso con estimaciones indirectas. La utilización de imágenes satelitales de alta resolución, en combinación con los datos de campo, permite extender la estimación de las variables biofísicas a grandes superficies y construir mapas (Velasco López et al., 2010).

Los mapas de variables biofísicas de alta resolución (20 m) (como los generados en el proyecto VALERI) se han utilizado para evaluar productos satelitales de media (300 m) y baja (1 km) resolución espacial.

En este capítulo se describe la adquisición y el análisis de los datos de campo de las variables biofísicas consideradas en este estudio.

OBJETIVO

Obtener los datos de campo del LAI, fAPAR y contenido de Clorofila en la RBMM.

1.2 MATERIALES Y MÉTODOS

1.2.1 Descripción de la zona de estudio

La Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca se ubica entre los límites del Estado de Michoacán y el Estado de México, sobre el eje volcánico transversal, entre las coordenadas $19^{\circ}44'27'' - 19^{\circ}18'32''$ latitud norte y $100^{\circ}22'26'' - 100^{\circ}09'07''$ longitud oeste, para Sierra Chincua y Cerro Pelón. En la parte superior de la Reserva se encuentra Altamirano, entre las coordenadas $19^{\circ}59'42'' - 19^{\circ}57'07''$ latitud norte y $100^{\circ}09'54'' - 100^{\circ}06'39''$ longitud oeste.

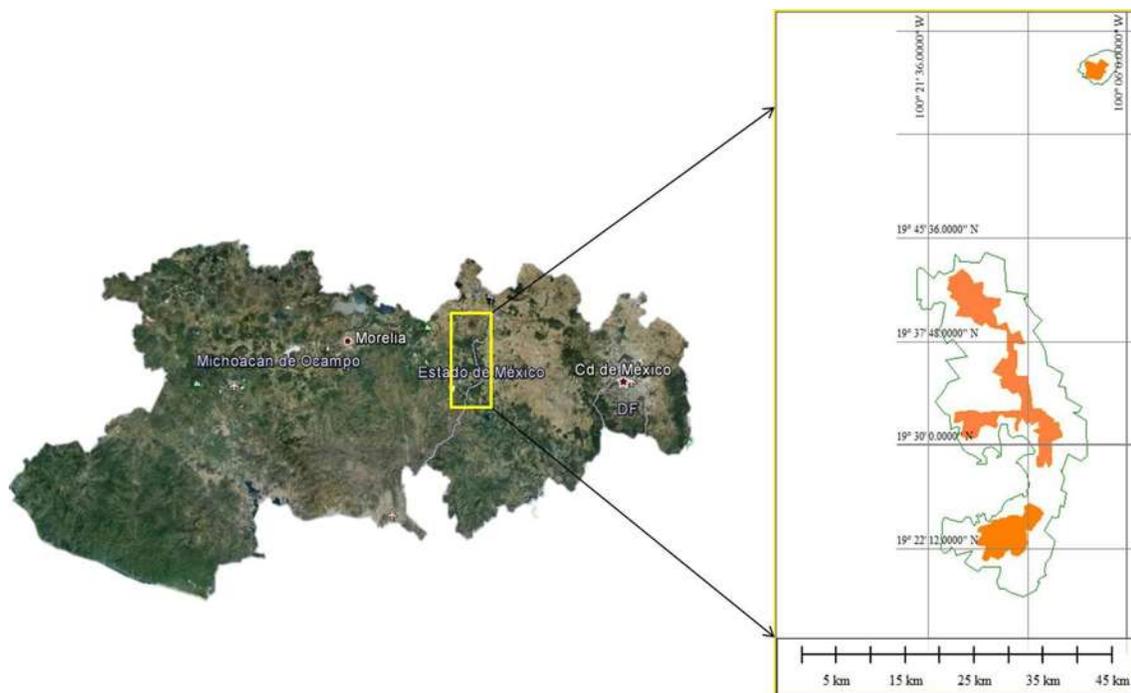


Figura 1-1. Zona de estudio: Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca. En naranja se muestra la zona núcleo y en verde la zona de amortiguamiento.

La reserva comprende los municipios de Contepec, Senguio, Angangueo, Ocampo, Zitacuaro y Aporo, en Michoacán, y Temascalcingo, San Felipe del Progreso, Donato Guerra y Villa de Allende, en el Estado de México.

Dentro de la reserva hay 8 Santuarios, que son los lugares a los que llegan las mariposas, de los cuales Sierra Chincua y el Rosario se encuentran en Michoacán, La Mesa y El Capulín en el Estado de México; algunos están abiertos al público.

Fisiografía

La RBMM pertenece a la provincia fisiográfica del Eje Volcánico Transversal, que marca el extremo sur de la Altiplanicie Mexicana y la separa de la depresión del Balsas (COFOM, 2001). Posee un sistema montañoso discontinuo de origen tectónico, siendo los picos con máxima elevación: Cerro Altamirano (3,320 msnm), Campanario (3,640 msnm), Cerro el Mirador (3,340 msnm), Huacal (3,200 msnm), Chivatí (3,180 msnm), Cerro los Madroños (3,040 msnm), Cerro Pelón (3,500 msnm), Cacique (3,300 msnm), El Piloncillo (3,300 msnm) y Cerro la Palma (3,300 msnm).

Hidrología

En la RBMM se originan grandes manantiales, que corresponden a las cuencas del Lerma y Balsas, con 8 y 15 manantiales respectivamente (CONANP, 2001, Garduño, 2011). La riqueza hídrica que generan estas sierras alimentan un total de 23 manantiales y 8 presas en los estados de Michoacán y México; estos cuerpos de agua abastecen a la región y a centros urbanos como la ciudad de México, Toluca, etc.

Geología

El relieve montañoso que caracteriza al área está constituido por rocas volcánicas del Terciario, sobre secuencias metamórficas y sedimentos del Mesozoico, sujetas a una intensa disectación fluvial que origina fuertes pendientes.

Se pueden diferenciar tres unidades ambientales: al norte se encuentra el aparato volcánico Cerro Altamirano, en la porción central el subsistema montañoso Sierra Chincua-Sierra el Campanario-Cerros Chivatí Huacal y al sur están Cerro Pelón y Cacique (CONANP, 2001).

Suelos

Debido a los procesos de descomposición de la materia orgánica, los suelos son predominantemente de los tipos andosol, húmico y órtico y en menor extensión acrisol y planosol, feozem, litosol, luvisol y en algunos casos cambisol, regosol y vertisol; todos derivados de las cenizas volcánicas, con las características de ligereza y alta retención de agua (CONANP, 2001).

Clima

El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, temperaturas medias anuales de 8° a 22° C, precipitaciones promedio desde 700 hasta 1,250 mm, y con temperaturas mínimas para el mes más frío entre -3° y 18° C. Debido al accidentado relieve, el microclima es diferente a distancias cortas, principalmente para el contenido de humedad y el índice de precipitación.

Fauna

Se han registrado 198 especies de vertebrados de los cuales 132 son aves, 56 mamíferos, 4 anfibios y 6 de reptiles, en la que se destaca la Mariposa Monarca como emblemática del lugar, como especies endémicas están el tecolote, ajolote y diversas salamandras.

Vegetación

El bosque de la RBMM es principalmente de coníferas, siendo el oyamel (*Abies religiosa*) la más representativa de la zona núcleo; se puede encontrar a lo largo del subsistema montañoso, principalmente en las partes más altas. De tipo perennifolio, se encuentra en zonas con estaciones secas bien diferenciadas,

nevadas moderadas e insolación intensa; prácticamente no interrumpe sus actividades de fotosíntesis, absorción y transpiración en todo el año, si bien presenta una disminución en temporada de frío y de secas. Su rango altitudinal va de los 2,400 msnm hasta casi los 3,600 msnm.

La altura de los árboles varía de los 35 a 50 m llegando a los 60 m en algunos casos; el diámetro varía de 100 a 180 cm; el fuste es recto, cónico, con ramas extendidas o ligeramente ascendentes; copa es densa, cónica. La corteza es grisácea, áspera, agrietada, dividida en placas irregulares, con un grosor total de 18 a 25 mm. Las hojas son simples, alternas, de 20 a 30 mm de largo y de 1 a 1.5 mm de ancho, dispuestas en espiral, con ápice agudo y córneo, con una hendidura longitudinal en la cara superior y una cresta saliente en la inferior; el haz es verde oscuro y el envés verde claro; presentan conillos subcilíndricos y blandos de 7 cm de largo, con brácteas rojizas con una banda longitudinal en el centro.

Los frutos son conos cilíndricos, solitarios, de 10 a 16 cm de largo y de 4 a 6 cm de ancho, casi sésiles o con un pedúnculo de 5 a 9 mm; de color violáceo cuando no están maduros y moreno violáceo en su madurez. Las escamas son cuneadas, de 28 a 35 mm de largo y de 12 a 28 mm de ancho; el ápice es redondeado y entero. Las semillas tienen forma cuneada oblonga a ovoide, aguda en la base, comprimida, de 10 a 12 mm de largo, provistas de un ala lateral amplia, oblicua, suave, de color castaño claro y de 14 a 16 mm de largo.

El oyamel comienza a florecer a partir de los 25 años de edad. La floración es cíclica y se completa en 2 años. A través de su ámbito de distribución geográfica, la floración se inicia en Diciembre y la polinización se produce en Marzo y Abril del año siguiente. Los conillos fecundados alcanzan la madurez en Noviembre del segundo año del ciclo fenológico, y en Diciembre comienza la diseminación de las semillas.

Este tipo de vegetación establece condiciones de obscuridad en su estrato inferior, donde predominan las fenerófitas. Los estratos arbustivos y herbáceos se

constituyen de *Senecio spp.*, *Stevia monrdaefolia*, *Salvia cardinales*, *Macrostema spp.*, *Bacharis Conferta*, *Cirsium sp.*, *Alchemilla procumbres* y *Acareia spp.*

Otros tipos de vegetación en el RBMM son: bosque de pino, bosque de encino, matorral secundario de *Junipresus*, bosque de *Cupressus*, comunitade de *Abies-Pinus*, comunidad de *Quercus-Pinus*, y comunidades de *Pinus-Abies* (CONANP, 2001, Tenorio et al., 2003).

Actividades productivas

Las comunidades indígenas que habitan en la RBMM practican la ganadería de subsistencia (ovino y bovino) y la agricultura de traspatio, principalmente frutales. Los cultivos que se producen con riego son: maíz criollo, trigo, avena forrajera, haba, aguacate, durazno, chícharo y papa.

1.2.2 Esquema de muestreo en campo

Se realizó una campaña de muestreos de campo, del 15 de Julio al 15 de septiembre del 2007, con el propósito de obtener una base de datos de variables biofísicas representativa de la zona de estudio. El muestreo se realizó de acuerdo a la metodología VALERI, tomando como unidad elemental de muestreo (ESU, Elementary Simple Unit), la descrita en Baret et al. (2005). Por motivos de logística en campo y de disponibilidad de imágenes, en el trabajo no se consideró la parte norte de la reserva, correspondiente al Cerro Altamirano.

El muestreo se realizó seleccionando, al interior de la zona de estudio, cuadrantes de 300 x 300 m² en zonas donde la pendiente del terreno fuera prácticamente nula. Al interior de cada cuadrante se ubicaron 5 subcuadrantes de 20 x 20 m²,

cada uno de los cuales es un ESU y corresponde un pixel SPOT (Figura 1-2). En total se muestrearon 13 cuadrantes, es decir 64 ESUs (Figura 1-3).

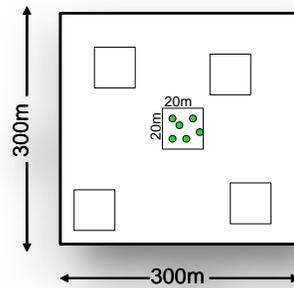


Figura 1-2. Estrategia de muestreo en campo

Cada ESU se georreferenció en campo con ayuda de un equipo GPS (Global Positioning System) marca Garmin, con una precisión de ± 10 metros.



Figura 1-3 Sitios muestreados en 13 cuadrantes de 300 x 300 m² dentro de la RBMM con 64 ESUs.

1.2.3 Obtención de datos de LAI y fAPAR

En cada ESU se tomaron 24 fotografías hemisféricas (12 hacia arriba (*up*) y 12 hacia abajo (*down*)), con el fin de obtener un valor representativo de cada ESU. Se utilizó una cámara Nikon Coolpix y un lente hemisférico o tipo “fisheye”. La Figura 1-4 muestra un ejemplo de una foto *up* y una *down*.



Figura 1-4. Ejemplo de fotografías hemisféricas tomadas hacia arriba (up) y abajo (down).

En cada ESU, las 12 fotografías *up* y *down* se distribuyeron de la siguiente manera: 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 (Figura 1-5).

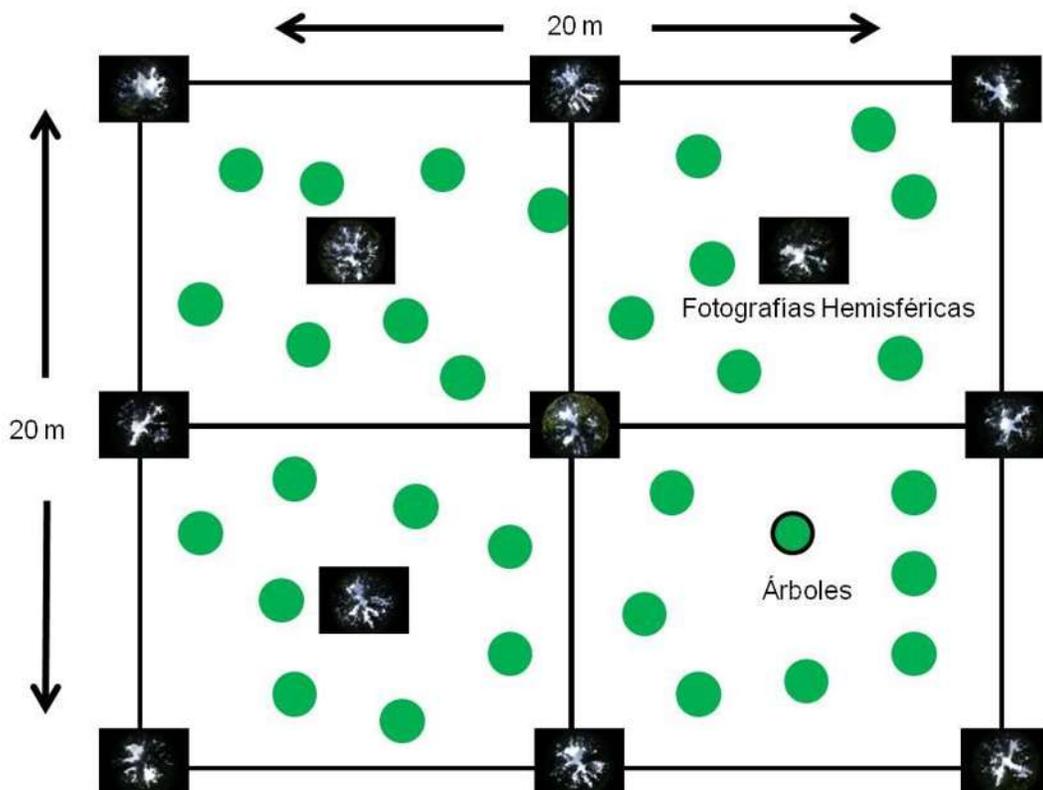


Figura 1-5. Posición de las imágenes tomadas en cada ESU

1.2.4 Análisis de los datos de campo de LAI y fAPAR

El análisis de las fotografías se realizó con el software gratuito “CAN EYE” desarrollado en el INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) de Avignon, y disponible en línea (<http://www4.paca.inra.fr/can-eye>). En este software se procesan las imágenes para obtener características de la estructura del dosel, tales como el índice de área foliar (LAI), el ángulo promedio de inclinación de las hojas (ALA), la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida (fAPAR), la fracción de cobertura vegetal (FCover), así como la fracción de huecos bidireccional (Baret and Weiss, 2004).

Las 12 fotografías hemisféricas (*up* y *down* separadamente) de un ESU se analizan juntas en CAN EYE, para lo cual deben ser del mismo tamaño y estar dentro de una misma carpeta.

Para el análisis de las fotografías *up* o *down* de un ESU con el programa CAN EYE, se siguen los siguientes pasos (Figura 1-6):

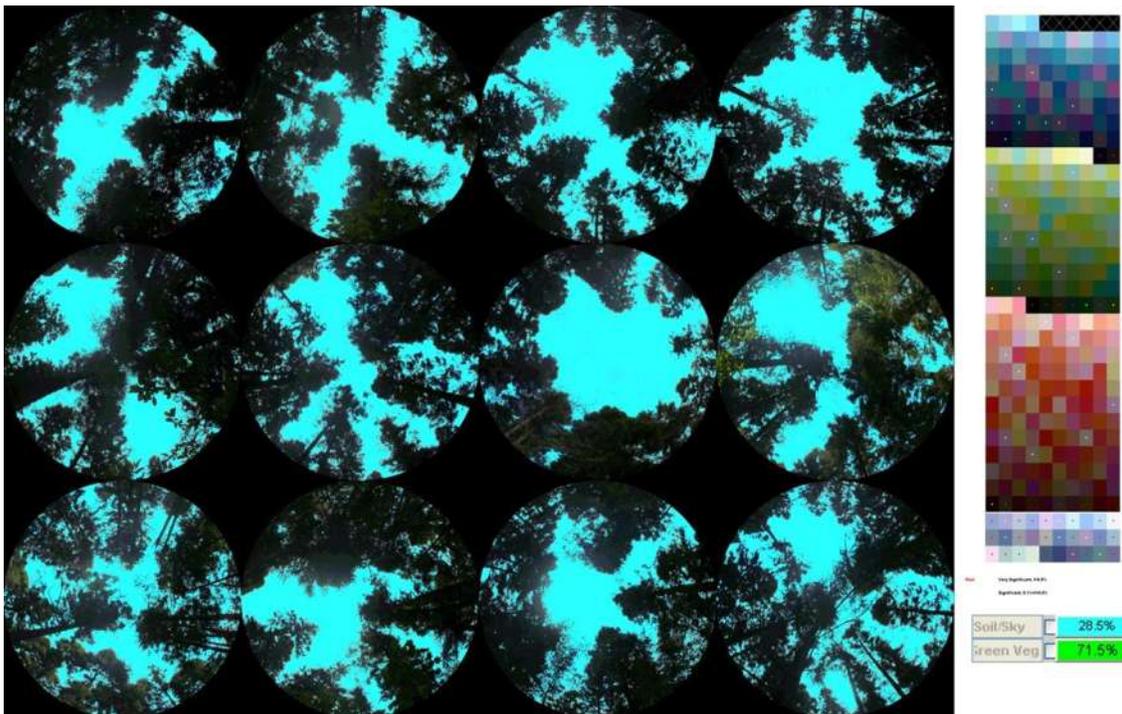


Figura 1-6. Esquema general de funcionamiento del programa CAN-EYE

1. **Selección de parámetros:** Se introduce el nombre del archivo y opcionalmente algún comentario de importancia; el tamaño de la imagen es calculado por “CAN EYE” automáticamente; se indica la resolución angular, así como la latitud y día del año, para el cálculo del fAPAR; por último se elige el formato de salida de los resultados (excel, ascii o ambos).

2. **Selección de imágenes:** se escogen las imágenes que se van a analizar, de las 12 correspondientes al ESU; en la práctica esto permite eliminar del análisis alguna imagen que haya podido salir borrosa.
3. **Pre-procesamiento:** los objetos no deseables que eventualmente aparezcan en la foto pueden enmascarse manualmente, para que no sean considerados en el análisis, como la silueta de la persona que toma la foto, en el caso de las fotos *down*.
4. **Clasificación:** se elige el número de clases que se consideran en la imagen: normalmente dos (vegetación y fondo (suelo/cielo)), o más dependiendo de la heterogeneidad de la foto. Si se trabaja con dos clases, basta con elegir manualmente los píxeles correspondientes a una de ellas, ya que los demás quedarán directamente asociados a la otra; si se trabaja con más clases, al final se tendrán que asociar algunas, para que queden sólo dos.

La Figura 1-7 muestra parte del pre-procesamiento y de la clasificación de las imágenes.



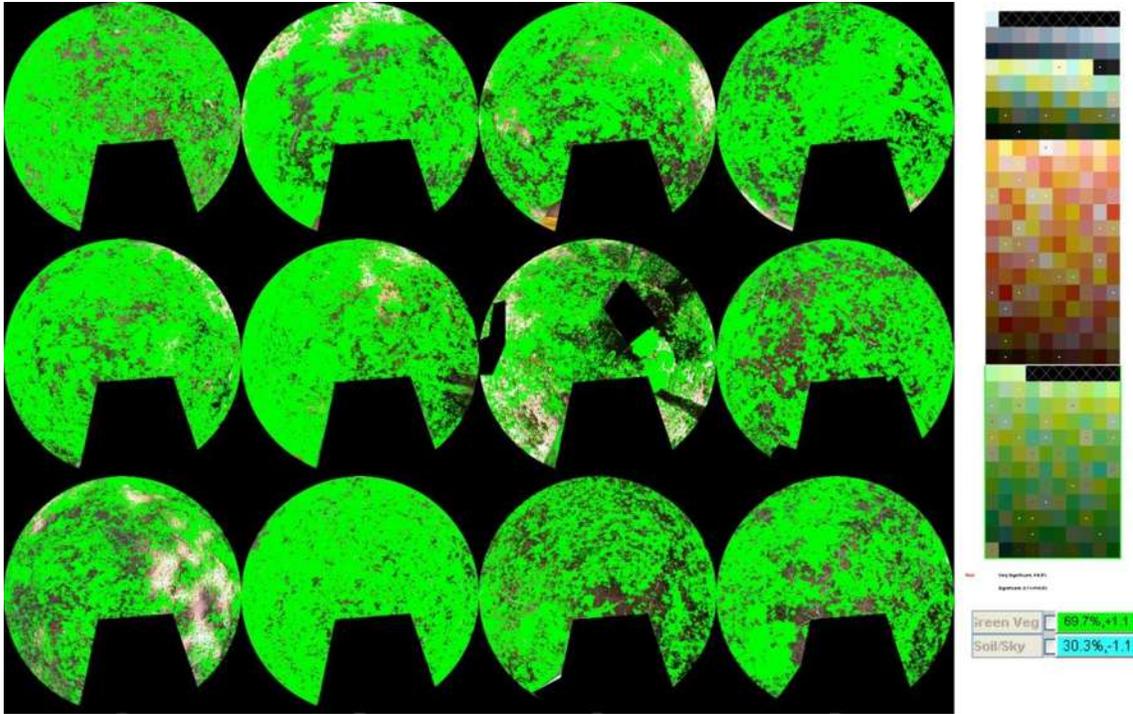


Figura 1-7. Ejemplo de preprocesamiento y clasificación de las imágenes hemisféricas up y down.

A partir de la proporción y distribución de la vegetación y el fondo en cada fotografía clasificada, el programa CAN-EYE estima la fracción de huecos, P_0 , definida como la probabilidad de que un haz de luz atraviese el dosel en una dirección, sin interceptar ningún elemento de la vegetación.

P_0 se relaciona con el índice de área foliar, LAI, a través de una ecuación de Poisson:

$$P_0(\theta_v, \varphi_v) = e^{-\lambda_o \frac{G(\theta_v, \varphi_v) LAI}{\cos \theta_v}} \quad (1)$$

θ_v y φ_v son los ángulos cenital y acimutal respectivamente, λ_0 es un factor que permite tomar en cuenta el agrupamiento o recubrimiento de los elementos del dosel (*clumping*, en inglés) y $G(\theta_v, \varphi_v)$ es la función de proyección, que representa la distribución de inclinación de las hojas.

CAN-EYE asume una variación simétrica acimutal de la función de distribución de las hojas. De esta forma, la fracción de huecos, P_0 , se calcula considerando una sola dirección incidente (monodireccional): $P_0(\theta_v, \varphi_v) \approx P_0(\theta_v)$,

$$P_0(\theta_v) = e^{-\lambda_0 \frac{G(\theta_v)LAI}{\cos \theta_v}} \quad (2)$$

El LAI y el fAPAR se estiman a partir de esta fracción de huecos monodireccional, considerando todo el rango cenital ($0 \leq \theta < 90$). Para estimar el LAI, se invierte la ecuación (2) con métodos basados en técnicas iterativas o técnicas de *look up table* (LUT).

El fAPAR instantáneo es una aproximación de la fracción de huecos en el ángulo solar correspondiente (CAN-EYE calcula el ángulo cenital solar cada hora solar durante la mitad del día, ya que hay simetría horaria a las 12:00). Como la vegetación no muestra mucha dispersión en el dominio óptico, dadas las características de absorción de los pigmentos fotosintéticos, el fAPAR se aproxima por la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada (fIPAR).

$$fAPAR^{BS}(\theta_s) \approx fIPAR(\theta_v) = 1 - P_0(\theta_v) \quad (3)$$

Finalmente los resultados se entregan en un informe en formato html, como el que se muestra como ejemplo en la Figura 1-8.

NUMBER OF CLASSES : 2

Class Name	%
Soil/Sky	12
Green Veg	88

AVERAGE BIOPHYSICAL VARIABLES

fCover= 0.686(std=0.314)

	LAI	ALA (°)	Clumping Factor		
			0°	30°	57.5°
Effective	3.5	68	1	1	1
Effective (57.5 °)	2.8	-	-	-	1
True	4.7	38	0.4	0.54	0.63

Fraction of absorbed photosynthetically active radiation (Latitude = 19.00°, DoY = 366)

Instantaneous Black Sky fAPAR

Solar Time	12:0	12:30	13:0	13:30	14:0	14:30	15:0	15:30	16:0	16:30	17:0
MODELED	0.89	0.89	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00
MEASURED	0.89	0.90	0.90	0.90	0.91	0.92	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN

	Daily integrated BlackSky	WhiteSky (diffuse)
MODELED FAPAR	0.93	0.51
MEASURED FAPAR	0.93	0.51

Figura 1-8. Reporte en formato html de las variables biofísicas LAI y fAPAR.

CAN EYE proporciona tres valores de LAI:

- LAI_{eff} ó LAI efectivo, que corresponde al valor estimado considerando varias direcciones de observación y aplicando modelos de inversión.
- LAI_{eff} a (57.5°), que es el LAI_{eff} estimado considerando únicamente un ángulo cenital de observación de 57.5°
- LAI True, que estima el LAI que se mediría con un planímetro, es decir sin considerar el recubrimiento de las hojas en el dosel. Está relacionado con el LAI_{eff} por $LAI_{eff} = \gamma_0 * LAI \ True$ donde γ_0 es el índice de agrupamiento o *clumping*.

Y también se proporcionan tres valores de fAPAR:

- fAPAR - *Instantaneous Black Sky*, es el fAPAR calculado considerando el ángulo cenital solar en cada hora solar, durante la mitad del día, según sea la latitud de la zona de estudio, asumiendo que hay una simetría horaria respecto de las 12:00 del día.

- fAPAR - *Daily Integrated Black Sky*: es el fAPAR correspondiente a la radiación directa, integrado en un día.
- fAPAR (White SKY) es el fAPAR difuso, la luz absorbida que proviene del rebote con otros objetos, integrado en un día.

Siguiendo el proyecto VALERI (Baret et al., 2005), los valores de LAI y fAPAR que se consideraron en este trabajo fueron el LAI_{eff} y el fAPAR - *Instantaneous Black Sky* a las 10:00 am, lo que corresponde a las 14:00 p.m. considerando la simetría en el horario respecto a las 12:00.

El LAI correspondiente a cada ESU analizado, es la suma del promedio de las 12 mediciones *up*, más el promedio de las 12 mediciones *down*. El valor de fAPAR de cada ESU es el promedio de las 12 mediciones *up*.

1.2.5 Obtención de muestras para el contenido de Clorofila

En paralelo a la toma de fotografías hemisféricas, se tomaron muestras de hojas de oyamel, para la estimación del contenido de clorofila. En cada ESU se eligieron 6 árboles al azar y de cada uno se recortó una pequeña rama, con ayuda de unas tijeras telescópicas, a una altura entre 8 y 9 m.

También se tomaron muestras de 12 plantas del sotobosque, para estimar el contenido promedio de clorofila de la vegetación baja. Estas muestras se tomaron en el ejido el Rosario.

Las muestras se conservaron en bolsas de plástico etiquetadas y se llevaron al laboratorio para su análisis.

1.2.6 Análisis de las muestras de contenido de Clorofila

El contenido de Clorofila se estimó siguiendo el método de Barnes et al. (1992). Para cada muestra se pesó y troceó 0.1 gramo de hoja, el cual se sumergió en 5 ml de dimetil sulfoxido, (DMSO, SIGMA) saturado con carbonato de calcio

$(\text{HCO}_3)_2$, Aldrich); se dejó en baño maría a 60°C , durante 5 horas (Figura 1-9). La muestra enfriada se guardó en refrigeración hasta el momento de su análisis.

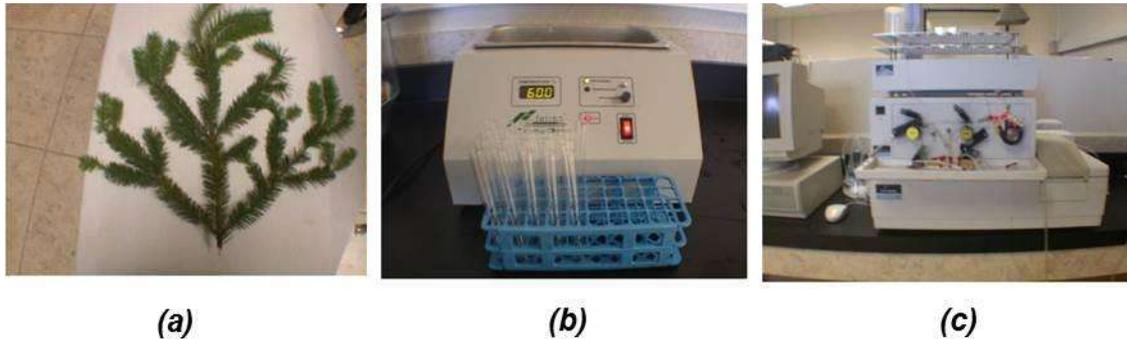


Figura 1-9. Esquema en la extracción de Clorofila: (a) muestra de hoja, (b) baño maría y (c) lectura en el espectrofotómetro lambda 40.

Las muestras se analizaron en un espectrofotómetro UV/VIS (marca Perkin-Elmer, modelo Lambda 40), para medir la absorbancia en dos longitudes de onda: 648.2 y 664.9 nm. El contenido de clorofila de cada muestra se estimó (en $\mu\text{g/ml}$) aplicando la ecuación (4), propuesta por Barnes et al. (1992), para la clorofila total (a más b):

$$\text{Clorofila}_{a+b} = 7.49 * A^{664.9} + 20.34 * A^{648.2} \quad (4)$$

Por otra parte, para cada muestra se tomó una cantidad de hojas equivalente a un peso de 0.5 g, y se fotografió sobre una superficie blanca. Las fotografías se analizaron con el programa *Image J* para calcular su superficie y así estimar la densidad foliar de las muestras. Con este dato se pudo pasar el valor de contenido de clorofila de $\mu\text{g/ml}$, a mg/cm^2 .

Para un ESU, en contenido de clorofila corresponde al promedio de los contenidos de clorofila de las muestras de los 6 árboles, multiplicado por la superficie foliar total, que se aproxima con el LAI *up* estimado en ese ESU, más el promedio del

contenido de clorofila de las plantas del sotobosque, multiplicado por el LAI *down* de ese ESU.

Con el fin de analizar la normalidad de los datos de cada variable biofísica, se realizó la prueba de Shapiro-Wilk, considerando un nivel de significancia de 0.05 (valores de p menores a 0.05 indican que la variable considerada no presenta una distribución normal).

1.2.7 Valores de las variables biofísicas en suelo desnudo y claros

En las zonas de suelo desnudo, tales como sitios sin vegetación, construcciones, zonas urbanas, etc. se asignó un valor de cero al LAI, fAPAR y Clorofila*LAI.

Además, para los claros, como pastizales o llanos entre el arbolado se consideró el promedio de LAI y fAPAR correspondiente al análisis de las fotografías tomadas hacia abajo (*down*). Para el contenido de clorofila se tomó el promedio del contenido de Clorofila de las plantas del sotobosque, multiplicado por el promedio de los LAI (*down*).

1.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.3.1 Valores de las variables biofísicas en vegetación

Se muestrearon 64 ESUs, de los cuales dos fueron finalmente eliminados debido a que se encontraban en zonas de transición entre claro y bosque, lo que podía suponer un problema en la fase final del trabajo (datos radiométricos). Así, se cuenta con los datos correspondientes a un total de 62 ESUs.

En la Figura 1-10 aparecen las distribuciones de las variables biofísicas estimadas en los ESUs muestreados a lo largo de RBMM.

El LAI tiene un valor mínimo de 3 y un máximo de 6. Para la misma zona de estudio, Velasco López et al. (2010) reportan valores de LAI entre 2 y 4, correspondientes a una campaña de muestreos realizada en 2001, durante la época de secas.

El fAPAR presenta un mínimo de 0.72 y un máximo de 0.96. No se tiene referencia para el fAPAR en la RBMM, sin embargo el rango de valores corresponde a lo reportado para coníferas (Rossello and Weiss, 2005)

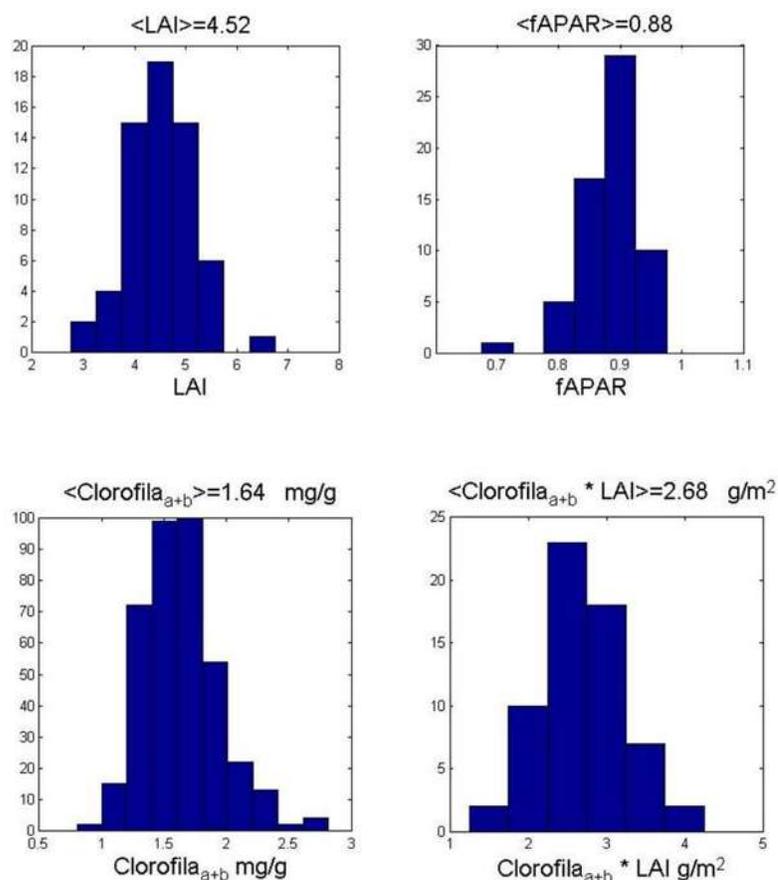


Figura 1-10. Histograma de las variables biofísicas medidas en campo.

La clorofila foliar, expresada en mg/g de hoja, presenta un promedio de 1.64. Estos valores son un poco más altos que los reportados por España-Boquera et al. (2010) (1.2 mg/g), para la misma zona de estudio, lo que puede explicarse por la

diferencia estacional entre los dos trabajos (verano en este caso y otoño en el otro). El promedio del contenido de clorofila por cm^2 de hoja es 0.12 y 0.69 en m^2 . Al multiplicar el contenido de Clorofila por unidad de superficie de hoja (m^2) por el LAI correspondiente de cada ESU se obtuvo la Clorofila a nivel del dosel, en g/m^2 , que es la variable biofísica objeto de este trabajo. Esta Clorofila presenta un mínimo de $1.67 \text{ g}/\text{m}^2$ y un máximo de $4.07 \text{ g}/\text{m}^2$, con un promedio de $2.68 \text{ g}/\text{m}^2$.

Se realizó la prueba de Shapiro-Wilk, con un nivel de significancia de 0.05. La Tabla 1-1 muestra el valor de p de cada variable biofísica estudiada.

Tabla 1-1. Prueba de normalidad de los datos de campo.

Variable biofísica	p
LAI	0.57
fAPAR	0.003
Clorofila _(a+b) *LAI	0.87

Las distribuciones del LAI y la Clorofila se consideran normales, pero no la del fAPAR. La distribución normal de los datos de LAI y clorofila hace pensar que el muestro realizado resultó suficiente para representar la variabilidad de la zona estudiada.

1.3.2 Valores de las variables biofísicas en suelo desnudo y claros

Los valores de las variables biofísicas de suelo desnudo y claros se muestra en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2. Valores asignados a las variables biofísicas de suelo desnudo y claros.

Variabes Biofísicas	Suelo desnudo	Claros
LAI (m^2/m^2)	0	1.48
fAPAR (%)	0	0.73
Clorofila (g/m^2)	0	0.70

1.4 CONCLUSIÓN

En este capítulo se presenta la obtención de los datos de campo de las variables biofísicas de interés: LAI, fAPAR y Clorofila. En total se obtuvieron los datos correspondientes a 62 unidades de muestreo elementales, ESUs.

Para la estimación del LAI y del fAPAR se tomaron fotografías hemisféricas, que se analizaron con el programa CAN-EYE. El rango de valores de LAI está entre 3 y 6, y de fAPAR entre 0.72 y 0.96, lo que es coherente con el tipo de vegetación, en temporada de lluvias. El contenido de clorofila se estimó a partir de extracciones en laboratorio. Los resultados obtenidos se encuentran en un rango entre 1.67 g/m^2 y 4.07 g/m^2 , un poco más altos que los reportados para la misma zona de estudio en época de secas. El LAI y la Clorofila presentan distribuciones normales, pero no el fAPAR.

En la realización de los muestreos de campo no se consideraron sitios de suelo desnudo, por presentar valores nulos para todas las variables biofísicas estudiadas. Tampoco se consideraron sitios de muestreo específicos para caracterizar las zonas de claros, por no ser la vegetación objetivo del trabajo. Sin embargo, se añadieron ESUs *a posteriori*, para garantizar la representatividad de todos tipos de cobertura. A estos ESUs se les asoció el LAI y el fAPAR promedios de los valores de sotobosque de todos los ESUs, y la Clorofila promedio del contenido de Clorofila de las plantas del sotobosque, multiplicado por el LAI estimado para los claros.

1.5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARET, F. & WEISS, M. 2004. Can-Eye: processing digital photographs for canopy structure characterization. *CAN EYE tutorial document, Avignon, France*.
- BARET, F., WEISS, M., ALLARD, D., GARRIGUES, S., LEROY, M., JEANJEAN, H., FERNANDES, R., MYNENI, R., PRIVETTE, J. & MORISETTE, J. 2005. VALERI: a network of sites and a methodology for the validation of medium spatial resolution land satellite products. *Remote Sensing of Environment*.
- BARNES, J., BALAGUER, L., MANRIQUE, E., ELVIRA, S. & DAVISON, A. 1992. A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls a and b in lichens and higher plants. *Environmental and Experimental Botany*, 32, 85-100.
- COFOM 2001. Atlas forestal del estado de Michoacán. Comisión Forestal del Estado de Michoacán. Morelia, Michoacán, México.
- CONANP 2001. Programa de manejo de la reserva de la biosfera Mariposa Monarca. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protejidas (CONANP). México, D.F.
- ESPAÑA BOQUERA, M., LOBIT, P. & CASTELLANOS MORALES, V. 2010. Estimación del contenido de clorofila en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca. *Revista fitotecnía mexicana*, 33, 175-181.
- GARDUÑO, B. N. 2011. Diagnostico Fitosanitario Forestal, Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca en el Estado de México.
- ROSSELLO, P. & WEISS, M. 2005. Larose site, boreal forest:GROUND DATA PROCESSING & PRODUCTION OF THE LEVEL 1 HIGH RESOLUTION MAPS. *En línea: <http://www.avignon.inra.fr/valeri/>*.
- TENORIO, G. C., CASAS, A., FARFÁN, B., VILLASEÑOR, J. L. & MANRÍQUEZ, G. I. 2003. Flora y vegetación de las zonas núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 43-62.
- VELASCO LÓPEZ, S., CHAMPO JIMÉNEZ, O., ESPAÑA BOQUERA, M. & BARET, F. 2010. Estimación del índice de área foliar en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca. *Revista fitotecnía mexicana*, 33, 169-174.

CAPÍTULO 2

Datos radiométricos

2.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se presentaron los datos de campo de variables biofísicas (LAI: *leaf área index*, fAPAR, *fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation* y Clorofila), tomados en la RBMM en el verano 2007. En este capítulo se muestra la obtención de los datos radiométricos correspondientes a los lugares muestreados en campo. Siguiendo el protocolo del proyecto VALERI, cada sitio de muestreo es una zona de 20 m x 20 m, denominada ESU (*Elementary Sample Unit*). El tamaño de un ESU equivale al de un pixel SPOT (20 m) y su ubicación se conoce porque fue georreferenciada en campo. Los datos radiométricos consisten en las reflectancias asociadas a los píxeles de una imagen satelital SPOT, correspondientes a los ESUs.

La imagen SPOT utilizada debe ser de la misma fecha, o cercana, de los muestreos de campo, en este caso Agosto 2007. Sin embargo, todas las imágenes SPOT disponibles en el catálogo oficial de *Spotimage* para el verano 2007, presentan nubes en una parte importante de la zona de estudio, por tratarse de la estación lluviosa. Ante la imposibilidad de utilizar una sola imagen para la realización de este trabajo, se optó por aprovechar todas las que estuvieran disponibles, con el fin de recuperar en lo posible la información perdida por la presencia de nubes. Así, se tomó como base la imagen de Agosto 2007 y se utilizaron las imágenes de las fechas más cercanas (Mayo, Junio y, Julio 2007) para recortar algunas partes con las que se pudiera formar un mosaico.

OBJETIVOS

1. Construir un mosaico SPOT con imágenes de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca para el verano del 2007.
2. Obtener los datos radiométricos correspondientes a los puntos de muestreo en campo.

2.2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.2.1 Área de estudio

Se describió en el Capítulo 1.

2.2.2 Análisis de las imágenes satelitales

Las imágenes multispectrales SPOT cubren una extensión aproximada de 60x60 Km², su resolución temporal es de 26 días y su resolución espacial o tamaño de pixel es de 20 m (SPOT 2 y 4) y 10 m (SPOT 5). La información espectral que contiene cada pixel de una imagen, una vez preprocesada, es la reflectancia en las longitudes de onda del verde (550-590 nm), rojo (661-680 nm), infrarrojo cercano (NIR, 790-890 nm) e infrarrojo medio (SWIR, 1600-1750 nm). Las características de las imágenes SPOT las hacen adecuadas para estudios de monitoreo de coberturas, aplicaciones en agricultura, seguimiento de bosques y planeación urbana.

Para la realización del presente trabajo se utilizaron 5 imágenes SPOT 4, con resolución de 20 m y tres bandas (Verde, Rojo, NIR), correspondientes a los meses de Mayo, Junio, Julio y Agosto del año 2007 (para el mes de Agosto la zona de estudio estaba contenida en dos imágenes). Las imágenes fueron otorgadas a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por la Secretaría de Marina (SEMAR), en el marco del convenio ERMEXS-UMSNH 2011.

Preprocesamiento de las imágenes SPOT

Ortorectificación

Las imágenes SPOT se ofrecen en catálogo con diferentes niveles de preprocesamiento (1A, 2A y 2B). Para este trabajo se utilizaron imágenes con el nivel más bajo (1A), con el propósito de realizar el preprocesamiento idénticamente todas las imágenes utilizadas para la construcción del mosaico, correspondientes a los meses de Mayo, Junio, Julio y Agosto, y asegurar que coincidieran pixel a pixel.

La ortorectificación consiste en corregir las distorsiones geométricas debidas a la posición del sensor y la curvatura de la Tierra, haciendo que cada punto de la imagen corresponda a una proyección ortogonal y esté georreferenciado. Se requiere una imagen de referencia, un modelo digital de elevación (DEM, por sus siglas en inglés) y un conjunto de puntos de control. La imagen de referencia debe contener la zona de estudio y estar georreferenciada. En este trabajo se utilizó como referencia el mosaico de imágenes Landsat del año 2000 (Landsat ISD2000), disponible en internet y cuyo tamaño de pixel es 15 m. Se utilizó el DEM de INEGI, disponible en internet, y con tamaño de pixel 30 m. Todos los datos se pasaron a la resolución de las imágenes SPOT: 20 m. Los puntos de control son pixeles que se seleccionan manualmente por pares, en la imagen de referencia y la imagen a corregir, cuidando que se correspondan entre las dos, por lo que debe tratarse de objetos claramente identificables.

Se utilizó el programa Erdas imagine 9.2.

Calibración de los datos

La calibración permite la transformación de los números digitales brutos (ND), que son los valores proporcionados por la imagen original para cada pixel (en *bytes*, es decir en un rango entre 0 y 255) y cada banda λ , a datos calibrados (L_λ), con

significado físico y unidades de radiancia. Consiste en la aplicación, para cada pixel (i) y para cada banda (λ), de una curva de calibración, la cual ha sido calculada por los sistemas de operación del satélite y se define por la siguiente relación:

$$L_{\lambda} = D + (G_{\lambda} * ND(\lambda, i)) \quad (5)$$

ND (*offset* o desviación) normalmente vale 0, mientras que el valor de G_{λ} (ganancia de la banda λ) se proporciona en un fichero adjunto a la imagen.

Corrección atmosférica

Las partículas suspendidas en la atmósfera, como la neblina y los aerosoles, pueden dispersar y absorber la luz que, proveniente del sol, atraviesa la atmósfera hacia la superficie, así como la luz que, reflejada por la superficie, atraviesa la atmósfera hacia el satélite. Este fenómeno altera la medición de la cantidad de luz reflejada por la superficie que es detectada por los sensores satelitales, que es en realidad la que contiene la información deseada, acerca de la cobertura vegetal objeto de estudio. La corrección atmosférica permite eliminar la contribución indeseada de la atmósfera en los datos satelitales y pasar de radiancias (obtenidas tras la calibración) a reflectancias, que corresponden a la cantidad de luz reflejada por una superficie, con respecto a la que reflejaría un cuerpo perfectamente blanco en las mismas condiciones de iluminación.

Para realizar la corrección atmosférica de las imágenes SPOT se utilizó el módulo Flaash (Fast Line-of Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) del programa ENVI 4.8, que permite describir las condiciones atmosféricas con algunos datos de entrada, como son: zona rural o urbana, absorción de agua, tipo de clima (tropical, verano o de invierno dependiendo de la latitud), tipo de sensor, visibilidad del lugar, coordenadas del centro de la imagen, altitud promedio de la zona de estudio, fecha y hora de adquisición de la imagen.

A las imágenes corregidas atmosféricamente se les aplicó la máscara del límite oficial de la reserva RBMM (Figura 1-1) para limitar el análisis a la zona de estudio.

Construcción del Mosaico SPOT

Ajuste de valores de reflectancia

Si bien es cierto que se realizó el pre-procesamiento de todas las imágenes, los rangos de los valores de reflectancia pueden variar entre una y otra, debido a diferencias radiométricas asociadas a la fecha en que fueron adquiridas, o a una variación real de la vegetación, dado que hay al menos un mes de diferencia entre cada una de ellas. Como la imagen de Agosto es la imagen base para la construcción del mosaico, los valores de reflectancia de las imágenes de Julio, Junio y Mayo deben hacerse similares a los valores de reflectancia de la imagen de Agosto, en todas las bandas espectrales.

Para realizar el ajuste de valores de reflectancia de cada imagen con respecto al rango de valores de reflectancia en la imagen de Agosto, se eligieron pares de píxeles representativos de la zona de estudio en cada una de las imágenes a ajustar y en la imagen base. Para cada imagen, se seleccionaron más de 4000 pares de píxeles a lo largo de la zona de estudio, correspondientes a zonas de vegetación, con una variabilidad suficiente para que el conjunto resultara representativo del rango de valores de cada imagen.

Para cada imagen a ajustar, se calcularon regresiones lineales entre los valores de reflectancia de cada una de las tres bandas espectrales de los píxeles seleccionados, y sus correspondientes en la imagen de Agosto. En cada caso se obtuvo la raíz del error cuadrático medio (RMSE, ecuación (6)) del ajuste y el error cuadrático medio relativo (RMSE_{relativo}, ecuación (7)).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - m}} \quad (6)$$

Donde w_i son los pesos de la función *robustfit*, y_i son los valores observados y \hat{y}_i son los valores estimados, n es el número de puntos y m es el número de coeficientes de la regresión lineal.

$$RMSE_{relativo} = \frac{RMSE}{\bar{R}} * 100 \quad (7)$$

Donde \bar{R} es la reflectancia promedio, del grupo de pixeles considerados en cada caso, en la banda analizada.

Las ecuaciones lineales ajustadas con las regresiones lineales entre los pares de pixeles seleccionados en cada imagen y en la imagen base, para cada imagen y cada banda, se aplicaron a las imágenes completas de la zona de estudio, para obtener las imágenes corregidas.

Identificación de pixeles no disponibles

El objetivo fue detectar los pixeles no disponibles en la imagen de Agosto y conocer en qué imágenes están disponibles, para poder reemplazarlos. La imagen resultante constituyó el mosaico SPOT de la RBMM para el verano 2007.

Para cada imagen (Mayo, Junio, Julio y Agosto) se seleccionaron manualmente los polígonos de las nubes, así como de las sombras proyectadas por las mismas. Posteriormente se definieron las máscaras de nubes y sombras de cada imagen, que son imágenes del mismo tamaño que las originales, cuyos pixeles tienen valores de 0 (no nube = pixel disponible) o 1 (nube o sombra = pixel no disponible).

Adicionalmente, como las imágenes de Mayo y Julio no incluyen la zona de estudio completa, las partes faltantes se etiquetaron también como pixeles no disponibles, asignándoles valor 1 en la máscara correspondiente.

Armado del mosaico

Para la construcción del mosaico, se tomó como base la imagen del mes de Agosto y se buscó reemplazar los píxeles no disponibles en esta imagen, con los valores correspondientes de la imagen más cercana en la que estuvieran disponibles. Para ello se aplica el siguiente árbol de decisión (función *band-math* de ENVI 4.8) (Figura 2-1): los píxeles no disponibles en la imagen de Agosto se sustituyen por los correspondientes del mes de Julio, si están disponibles; de no ser así, se sustituyen con los de junio, si están disponibles; y de no ser así, se sustituyen por los de Mayo; los píxeles que no se recuperan con la imagen de Mayo, se consideran perdidos.

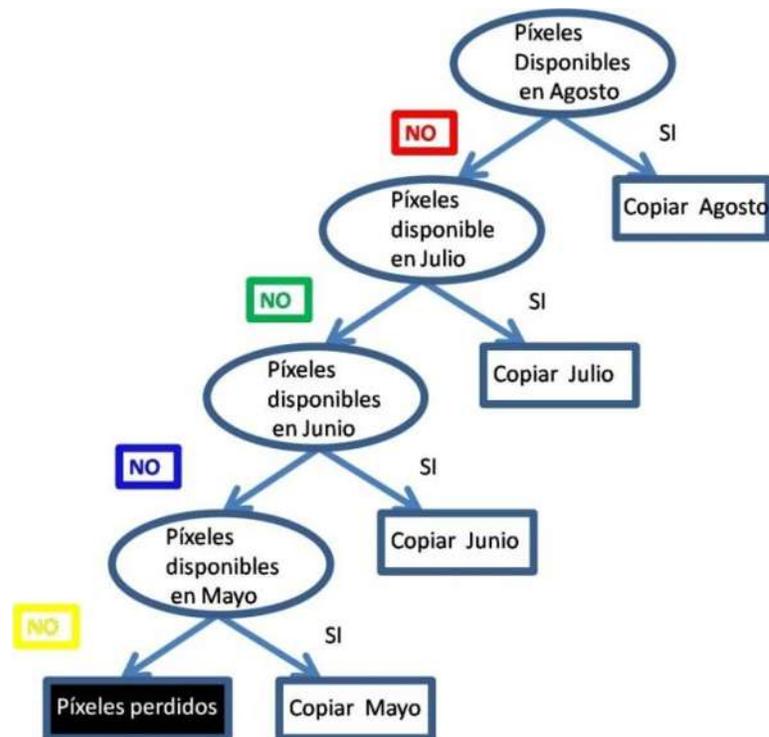


Figura 2-1. Árbol de decisión para la construcción del mosaico.

Corrección topográfica

La corrección topográfica permite nivelar los valores radiométricos con respecto a la rugosidad del terreno, eliminando la dependencia entre la reflectancia y el relieve.

Se utilizó el método de corrección-C de Meyer, (Teillet et al., 1982, Meyer et al., 1993), dado por la expresión:

$$R_H = R_L \left[\frac{\cos(sz) + c}{\cos(i) + c} \right] \quad (8)$$

Donde R_H es la reflectancia corregida, R_L la reflectancia sin corregir; sz es el ángulo cenital solar, proporcionado con cada una de las imágenes, e i es el ángulo de incidencia dado por:

$$\cos(i) = \cos(\theta)\cos(\alpha) + \sin(\theta)\sin(\alpha)\cos(\gamma - \delta) \quad (9)$$

Donde θ , α , γ y δ son, respectivamente, los ángulos de inclinación y orientación del terreno en cada pixel (calculados a partir del DEM), ángulo de elevación del sensor y ángulo acimutal del sensor.

Los ángulos θ y α se calcularon utilizando la función del modelo topográfico de ENVI 4.8, mientras que los ángulos γ y δ se obtuvieron de la información adjunta a la imagen de Agosto.

El parámetro c se obtiene como la relación entre a y b ($c = b / a$) en la ecuación:

$$R_L = a \cos(i) + b \quad (10)$$

2.2.3 Extracción de los datos radiométricos

Valores de vegetación

Se obtuvieron los datos radiométricos correspondientes a los 62 ESUs muestreados, ubicándolos, a partir de sus coordenadas, en el mosaico SPOT corregido topográficamente. Se realizó un análisis de normalidad.

Valores de suelo desnudo y claros

Adicionalmente a los 62 ESUs muestreados en campo, se seleccionaron 10 puntos del mosaico, a lo largo de la zona de estudio, con el fin de obtener los valores radiométricos característicos de suelo desnudo, como se realiza en el proyecto VALERI (Baret et al., 2005). Adicionalmente se tomaron otros 5 puntos característicos de claros, con el fin de representar este tipo de cobertura presente en la zona de estudio.

2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1 Análisis de las imágenes satelitales

Preprocesamiento de las imágenes SPOT

Ortorectificación

Se realizó la ortorectificación de las imágenes SPOT, tomando como referencia el mosaico Landsat ISD2000, y utilizando el DEM de la zona de estudio. Para cada imagen se escogieron manualmente entre 23 y 54 puntos de control. En todos los casos el error del ajuste fue menor a un pixel.

La Figura 2-2 muestra todas las imágenes antes y después de la ortorectificación. Se observa que las imágenes finales presentan un margen de color negro alrededor, típico de las imágenes corregidas geoméricamente. Una vez ortorectificadas, equivalen a las imágenes con nivel de procesamiento 2A de *Spotimage*, con la característica adicional de que se corresponden perfectamente, pixel a pixel, unas con otras.



Figura 2-2. Imágenes SPOT antes (arriba) y después (abajo) de la ortorectificación.

Calibración y corrección atmosférica

Las imágenes fueron calibradas y corregidas atmosféricamente y se les aplicó la máscara del límite de la reserva RBMM. El resultado final del preprocesamiento se muestra en la Figura 2-3.

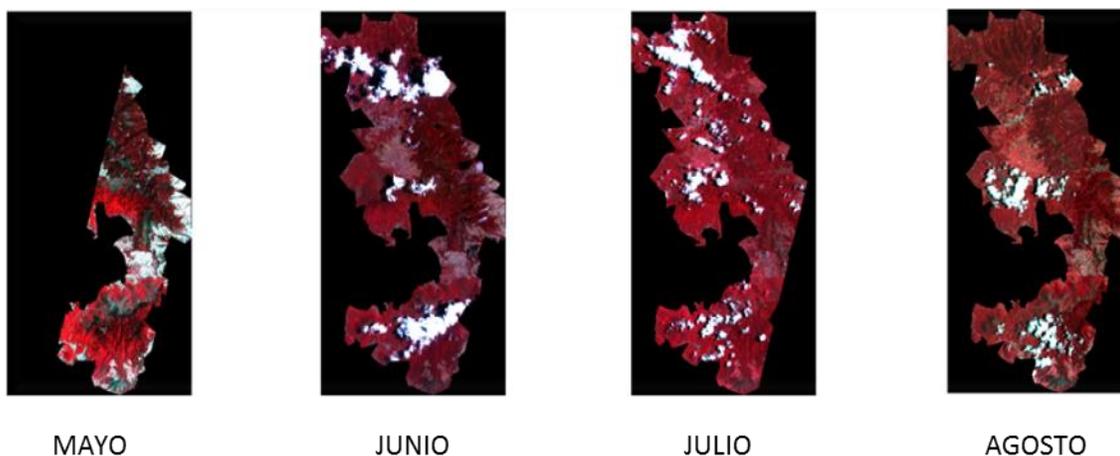


Figura 2-3. Imágenes calibradas, corregidas atmosféricamente y recortadas al límite de la RBMM.

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 (mosaico de dos imágenes) presentan nubes sobre diferentes lugares de la zona de estudio.

Construcción del Mosaico SPOT

Ajuste de valores de reflectancia

La Figura 2-4 muestra los pixeles seleccionados en cada imagen para realizar el ajuste del rango de valores de reflectancia de cada imagen al rango de valores de reflectancia de la imagen del mes de Agosto, que es la imagen base. En total fueron 4250 pares de pixeles (cada pixel seleccionado tiene su contraparte en la imagen del mes de Agosto) para cada imagen.

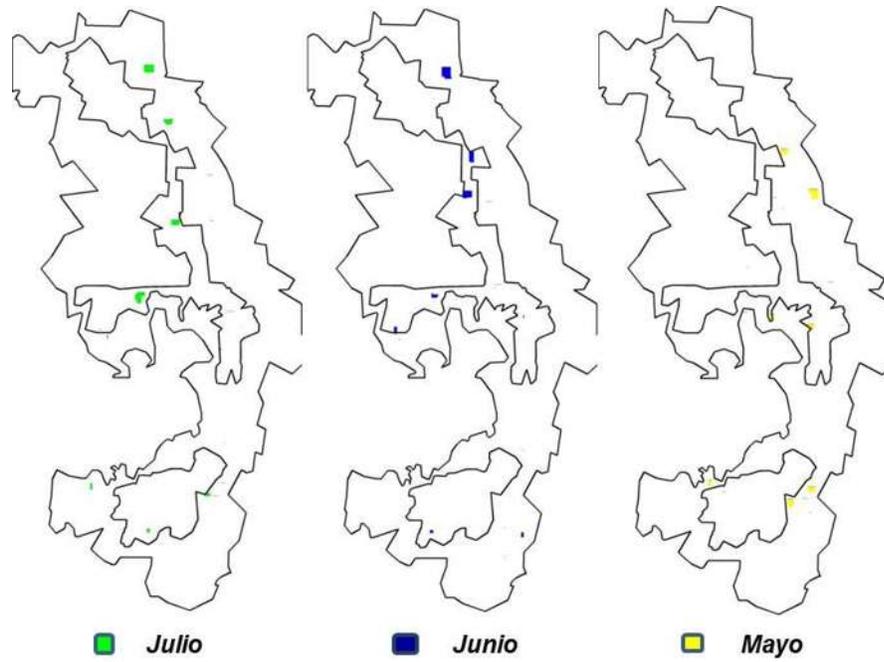


Figura 2-4. Grupo de datos para el ajuste de regresión lineal entre las bandas espectrales.

En la Figura 2-5 se muestran las regresiones lineales calculadas para cada imagen y cada banda, entre los valores de reflectancia de los pares de píxeles seleccionados.

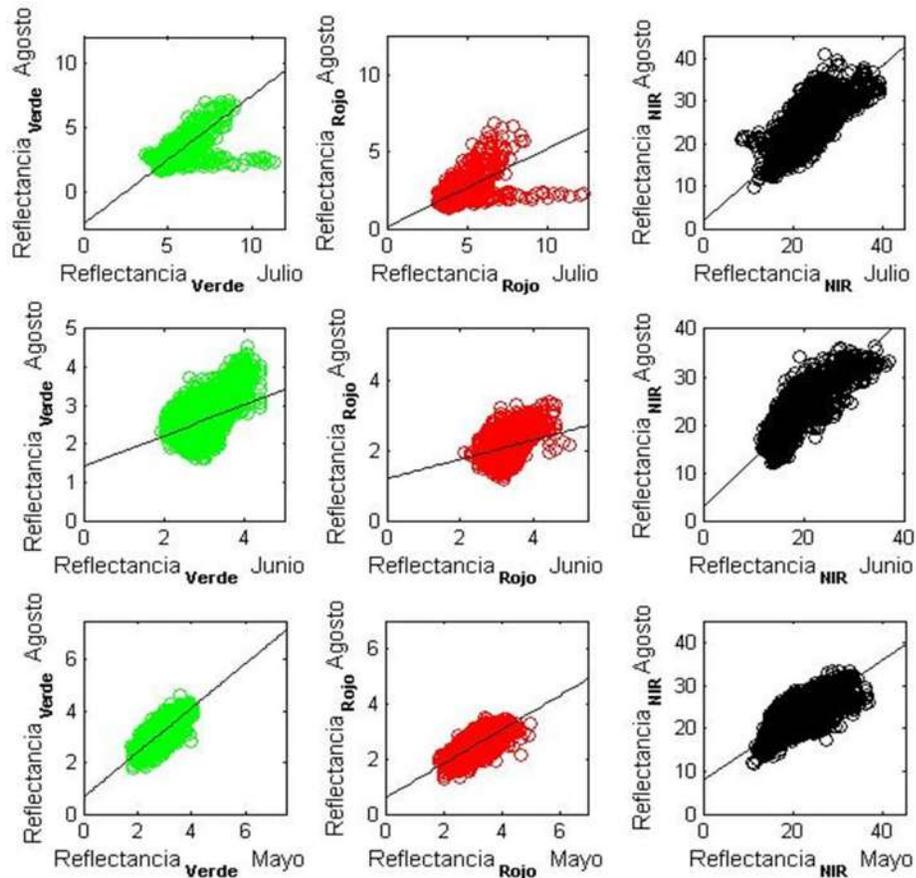


Figura 2-5. Ajuste de regresión lineal entre las bandas espectrales utilizando robustfit.

El error asociado a cada ajuste de regresión lineal se muestra en la Tabla 2-1, en la cual aparece el promedio de los valores de reflectancia de cada banda para los pixeles seleccionados en cada imagen. También se calculó el error relativo, en %, respecto del promedio de reflectancia de los 4250 pixeles seleccionados en cada una de las imágenes, para cada banda espectral. El menor error es de 5.6% y corresponde a la banda Verde de la imagen de Julio. El mayor error es de 18.6, para el NIR de la imagen de Junio.

Tabla 2-1. Error RMSE del ajuste de regresiones lineales.

Bandas Espectrales	Promedio de cada banda espectral	RMSE	RMSE relativo %
Julio			
Verde	5.379	0.302	5.613
Rojo	4.240	0.308	7.264
NIR	21.565	2.217	10.281
Junio			
Verde	2.913	0.494	16.96
Rojo	3.187	0.374	11.753
NIR	16.725	3.111	18.6
Mayo			
Verde	2.675	0.253	9.441
Rojo	2.806	0.237	8.432
NIR	18.775	1.792	9.542

Las ecuaciones de ajuste (Tabla 2-2) se utilizaron para ajustar el rango de valores de reflectancias de cada banda de cada imagen al rango de valores de reflectancia de la misma banda espectral en la imagen de Agosto. Así se obtuvieron las imágenes ajustadas a los valores de la imagen base, que fueron utilizadas para la construcción del mosaico.

Tabla 2-2. Ecuaciones de ajuste para cada banda de cada imagen.

Bandas espectrales ajustadas	Ecuación
Julio (Ajustado)	
Verde _{Ajustado}	$-2.39 + \text{Verde}_{\text{Julio}} * 0.98$
Rojo _{Ajustado}	$0.13 + \text{Rojo}_{\text{Julio}} * 0.51$
NIR _{Ajustado}	$1.91 + \text{NIR}_{\text{Julio}} * 0.91$
Junio (Ajustado)	
Verde _{Ajustado}	$1.42 + \text{Verde}_{\text{Junio}} * 0.4$
Rojo _{Ajustado}	$1.21 + \text{Rojo}_{\text{Junio}} * 0.27$
NIR _{Ajustado}	$2.89 + \text{NIR}_{\text{Junio}} * 0.99$
Mayo (Ajustado)	
Verde _{Ajustado}	$0.66 + \text{Verde}_{\text{Mayo}} * 0.86$
Rojo _{Ajustado}	$0.59 + \text{Rojo}_{\text{Mayo}} * 0.62$
NIR _{Ajustado}	$7.8 + \text{NIR}_{\text{Mayo}} * 0.7$

Identificación de píxeles no disponibles

En cada imagen se seleccionaron manualmente los píxeles no disponibles (o sin información radiométrica útil), es decir: nubes, sombras y píxeles ausentes. Se obtuvieron las máscaras que aparecen en la Figura 2-6. La intersección de todas las máscaras corresponde a los píxeles que no estuvieron disponibles en ninguna de las imágenes analizadas y que por lo tanto no se pudieron recuperar.

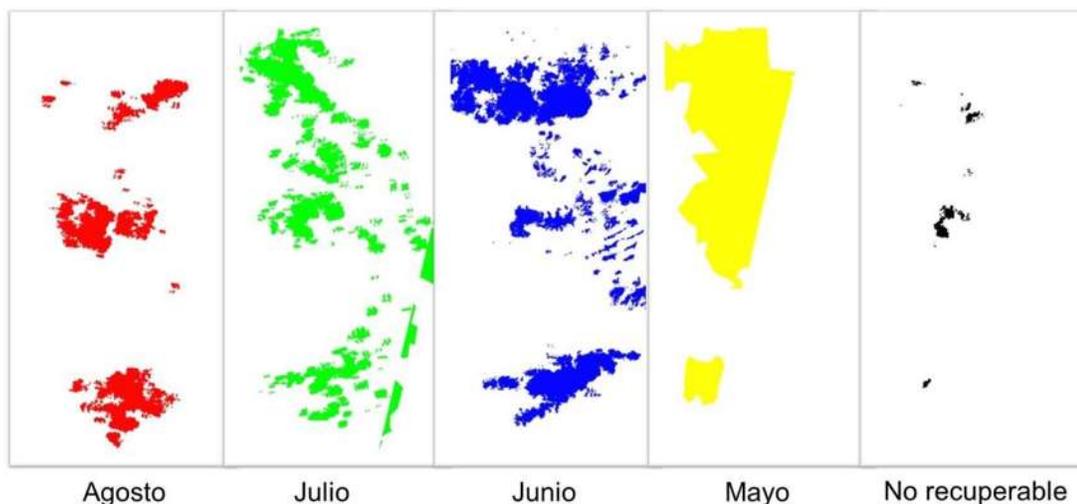


Figura 2-6. Pixeles no disponibles para cada imagen Satelital.

La Figura 2-7 muestra la superposición de las máscaras. Las zonas a recuperar son los pixeles no disponibles en la imagen del mes de Agosto, que aparecen en rojo. Donde estas zonas en rojo no se superponen con la zona verde, se pudo utilizar información de Julio; donde se superponen el rojo y el verde, pero no el azul, se utilizó información de Junio; donde se superponen el rojo, el verde y el azul, pero no el amarillo, se utilizó información de Mayo.

Del total de los 62 ESUs muestreados, 43 estaban disponibles en la imagen base y 19 se recuperaron de la imagen de Julio. No se necesitó recuperar ninguno en Junio ni Mayo, si bien sí se tuvieron que utilizar estas imágenes para completar la zona de estudio.

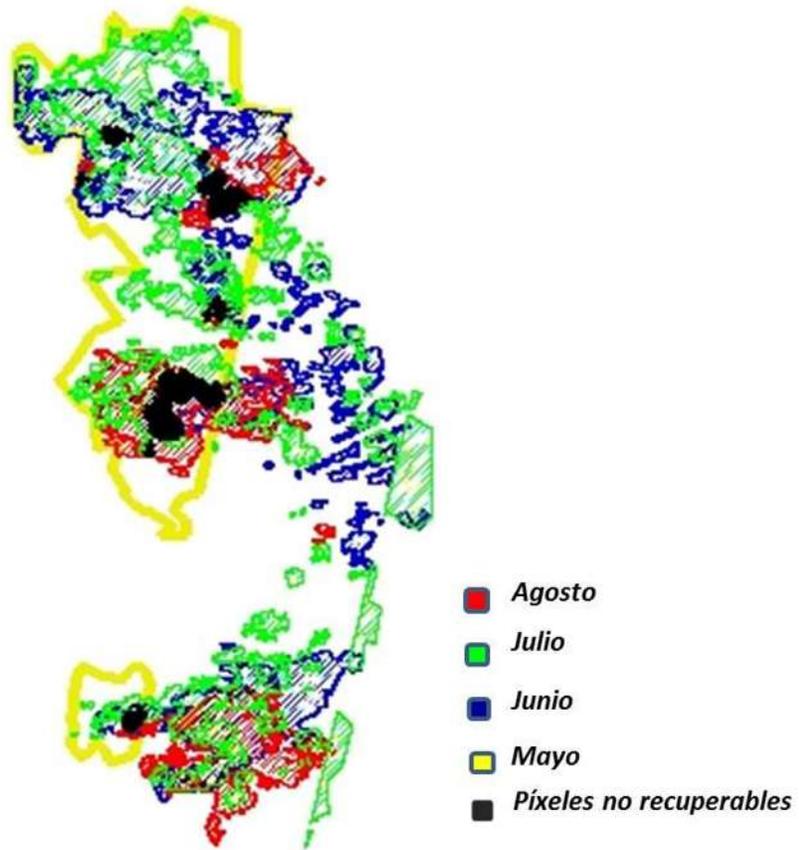


Figura 2-7. Superposición de las máscaras de píxeles no disponibles de las 4 imágenes de satélite.

Armado del mosaico

Para la construcción del mosaico se aplicó el árbol de decisión de la Figura 2-1, a las imágenes ajustadas, utilizando las máscaras del mosaico de nubes de la Figura 2-7. El resultado aparece en la Figura 2-8.



Figura 2-8. Mosaico SPOT del mes de Agosto del 2007.

El mosaico muestra que se ha recuperado gran parte de la información que se habría perdido por la presencia de nubes si sólo se hubiera trabajado con la imagen de Agosto; sin embargo, algunos pixeles no se pudieron recuperar (en blanco, Figura 2-8).

Corrección topográfica

Se ajustaron los valores c para realizar la corrección topográfica de cada banda del mosaico (ecuaciones (8) - (10)). En la Tabla 2-3 aparecen los valores de c ajustados, así como los coeficientes de correlación entre el coseno del ángulo de incidencia solar ($\cos(i)$) y los valores de reflectancia de la imagen, antes (R_{ac}) y después (R_{dc}) de la corrección topográfica. Se puede observar que la aplicación de la corrección topográfica disminuye la dependencia de la reflectancia de cada pixel con respecto al relieve.

Tabla 2-3. Coeficiente de correlación que van desde 0.3 a 0.01, antes y después de aplicar la corrección topográfica.

Banda espectral	c	Correlación	Correlación
		($R_{ac}, \cos(i)$)	($R_{dc}, \cos(i)$)
		P<0.001	P<0.001
Rojo	5.19	0.19	0.01
Verde	4.82	0.18	0.02
NIR	4.69	0.30	0.01

La Figura 2-9 muestra el resultado de aplicar la corrección topográfica al mosaico de la zona de estudio.



Figura 2-9. Mosaico SPOT de la RBMM corregido topográficamente.

La Figura 2-10 muestra un acercamiento de una parte de la zona de estudio, para ejemplificar el resultado de aplicar la corrección topográfica. Se puede apreciar que antes de la corrección hay una mayor diferencia entre las laderas iluminadas y no iluminadas de las montañas, misma que desaparece tras la corrección.

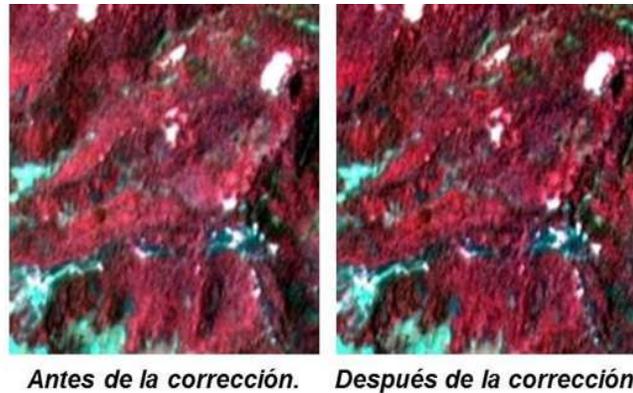


Figura 2-10. Acercamiento de una parte del mosaico de la RBMM del verano 2007, antes y después de la corrección topográfica.

2.3.2 Extracción de los datos radiométricos

Una vez construido el mosaico SPOT de la zona de estudio, sustituyendo los píxeles no disponibles en la imagen de Agosto por píxeles disponibles en la fecha más cercana (previamente ajustados al rango de valores de la imagen base, y después de realizar la corrección topográfica), se ha obtenido el mosaico final. Éste constituye la base de datos radiométricos.

Valores de vegetación

Para cada punto de muestreo de campo, que tenía asociados datos de las variables biofísicas objeto del presente estudio, según lo descrito en el Capítulo 1, se requería el valor radiométrico correspondiente, es decir la reflectancia en las tres bandas espectrales consideradas (Verde, Rojo, NIR). Este valor se obtuvo del mosaico final, identificando a partir de sus coordenadas, el píxel que corresponde a cada punto de muestreo (ESU).

La Figura 2-11 muestra el histograma de las reflectancias de cada banda espectral estudiada, en todos los píxeles asociados a los puntos muestreados en campo.

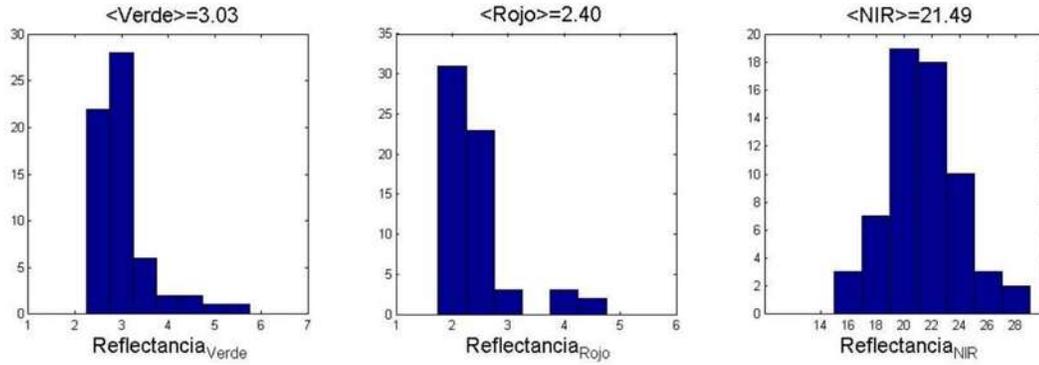


Figura 2-11. Histograma de los datos radiométricos y sus promedios.

Con el fin de evaluar la normalidad de los datos, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk. Los resultados se muestran en la Tabla 2-4.

Tabla 2-4. Prueba de normalidad de los datos radiométricos.

Bandas espectrales	p
Verde	5.16e-08
Rojo	4.05e-10
NIR	0.36

El nivel de significancia considerado para esta prueba fue de 0.05. Los datos de las bandas verde y roja no siguen una distribución normal.

El rango de valores de cada banda corresponde bien con el de una zona de bosque de la imagen base. Los valores más altos de las bandas verde y roja corresponden a los mismos píxeles en los que influyen más las características de la parte baja del dosel como vegetación baja porque tiene asociado un valor grande de LAI *down* casi del mismo valor del LAI *up*. En cualquier caso se consideraron como representativos de la zona de estudio, y se mantuvieron en el análisis.

Valores de suelo desnudo y claros

En la Tabla 2-5 se muestran los valores de reflectancia que se obtuvieron del mosaico SPOT (Figura 2-9) en píxeles correspondientes a suelo desnudo y claros.

Tabla 2-5. Valores de reflectancia de suelo desnudo (en 10 píxeles) y de claros (en 5 píxeles) extraídos del mosaico SPOT.

Reflectancia en el Verde										
Suelo	10.69	8.40	15.90	12.36	5.42	6.59	5.07	6.92	7.20	6.20
Claro	9.32	8.16	4.31	6.60	6.20					
Reflectancia en el Rojo										
Suelo	14.48	9.65	20.3	14.94	7.03	7.71	6.34	7.32	7.99	6.71
Claro	9.13	7.22	3.10	4.41	4.09					
Reflectancia en el NIR										
Suelo	18.1	19.02	6.68	18.03	15.79	16.84	18.46	18.51	20.98	15.33
Claro	40.11	39.13	38.41	34.94	42.61					

Se observa un rango amplio de valores de reflectancia para los puntos de suelo desnudo (de 5.07 a 15.90 en el Verde; de 6.34 a 14.94 en el Rojo y de 6.68 a 20.98 en el NIR), con valores más grandes que para los sitios con vegetación (de 2.34 a 5.52 en el Verde; de 1.86 a 4.58 en el Rojo y de 15.84 a 27.53 en el NIR), excepto para el NIR. Sin embargo, el rango de valores de reflectancia para los claros (de 4.31 a 9.32 en el Verde; de 3.10 a 9.13 en el Rojo y de 34.94 a 42.61 en el NIR) no es tan amplio como para el suelo desnudo, con valores altos con respecto a los de la vegetación.

2.4 CONCLUSIÓN

En este Capítulo 2 se presenta la obtención de los datos radiométricos asociados a cada uno de los puntos de muestreo de campo, ESU, para los que se obtuvieron datos de las variables biofísicas objeto de este trabajo (Capítulo 1). El dato radiométrico se obtiene de una imagen satelital de la zona de estudio, de una fecha cercana a los muestreos de campo. Como la imagen disponible de la zona de estudio para la fecha requerida (Agosto 2007) presentaba pixeles faltantes por presencia de nubes, se buscó sustituir estos pixeles por los correspondientes disponibles en imágenes de fechas cercanas (Mayo-Junio-Julio, 2007). Para esto se tuvieron que encajar todas las imágenes utilizadas pixel a pixel (ortorrectificación), intercalibrar los valores de reflectancia de cada banda, ajustándolos al rango de valores de la imagen base (Agosto 2007) y detectar los pixeles faltantes en Agosto, así como las imágenes en las que estaban disponibles. El mosaico resultado de la sustitución, corregido del efecto del relieve, constituye la base de datos radiométricos de la que se extrajeron los datos de reflectancia de los ESUs. Para la vegetación, las bandas verde y roja no siguen una distribución normal; el rango de valores de cada banda es similar al del bosque de la imagen base. Para el suelo desnudo los valores de reflectancia son en general más grandes que para la vegetación, excepto en el NIR. Para los claros el rango de valores de reflectancia no es tan amplio como para el suelo desnudo, con valores altos con respecto a los de la vegetación.

2.5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARET, F., WEISS, M., ALLARD, D., GARRIGUES, S., LEROY, M., JEANJEAN, H., FERNANDES, R., MYNENI, R., PRIVETTE, J. & MORISETTE, J. 2005. VALERI: a network of sites and a methodology for the validation of medium spatial resolution land satellite products. *Remote Sensing of Environment*.
- MEYER, P., ITTEN, K. I., KELLENBERGER, T., SANDMEIER, S. & 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.
- TEILLET, P. M., GUINDON, B. & GOODENOUGH, D. G. 1982. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 8, 84-106.

CAPÍTULO 3

Mapas de variables biofísicas

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe la metodología para construir mapas de alta resolución de variables biofísicas (LAI: *leaf área index*, fAPAR, *fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation* y Clorofila), en la RBMM para Agosto 2007, utilizando los datos de campo descritos en el Capítulo 1 y los datos radiométricos correspondientes descritos en el Capítulo 2. Los mapas se construyeron a partir de modelos empíricos (funciones de transferencia) que relacionan los datos radiométricos y los de campo, y tienen asociado un error, o nivel de exactitud, que se estimó con un ejercicio de validación.

OBJETIVO

Diseñar funciones de transferencia para estimar las variables biofísicas de interés a partir de datos radiométricos.

Aplicar las funciones de transferencia diseñadas al mosaico SPOT para obtener los mapas de la Reserva de la Biosfera de la Mariposa Monarca para el verano 2007.

3.2 MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1 Área de estudio

Se describió en el Capítulo 1.

3.2.2 Índices de vegetación

Los índices de vegetación son fórmulas matemáticas simples que involucran valores de reflectancia en algunas longitudes de onda y que se correlacionan bien con algunas características de la vegetación, como el índice de área foliar, la concentración de clorofila o la actividad fotosintética, entre otros. Los índices de vegetación minimizan los efectos externos como la presencia del suelo y las condiciones atmosféricas, al estudiar las cubiertas vegetales mediante técnicas de teledetección (Chuvieco, 1995).

Con los valores de reflectancia que se obtuvieron del Capítulo 2 se calcularon los índices de vegetación que aparecen en la

Tabla 3-1, para cada punto de muestreo en campo (ESU, *Elementary Sample Unit*). La mayoría de los índices analizados en este trabajo involucran las reflectancias en la banda roja, donde se produce la máxima absorción de radiación por la clorofila, y el infrarrojo cercano (NIR), donde se produce la máxima reflexión (Rouse et al., 1974). La comparación de estas dos bandas permite distinguir rápidamente las zonas de vegetación y de suelo, por lo que estos índices son buenos estimadores de la densidad y el vigor de la vegetación.

Tabla 3-1. Índices de vegetación utilizados en este trabajo. Verde, Rojo y NIR, se refiere a la reflectancia del pixel en estas bandas espectrales de la imagen SPOT.

<i>Índices de Vegetación</i>	<i>Fórmula Matemática</i>
NDVI (<i>Rouse et al., 1974</i>)	$\frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo}$
SR (<i>Birth and McVey, 1968</i>)	$\frac{NIR}{Rojo}$
RN (<i>Rossello and Weiss, 2005</i>)	$NIR * Rojo$
DVI (<i>Tucker, 1979</i>)	$NIR - Rojo$
RDVI (<i>Roujean and Breon, 1995</i>)	$\sqrt{NDVI * DVI}$
GEMI (<i>Pinty and Verstraete, 1992</i>)	$\eta(1 - 0.25\eta) \frac{Rojo - 0.125}{1 - Rojo}$ $\eta = \frac{2(NIR^2 - Rojo^2) + 1.5 * NIR + 0.5 * Rojo}{NIR + Rojo + 0.5}$
SAVI (<i>Huete, 1988</i>)	$\frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo + L} * (1 + L), L = 0.5$
OSAVI (<i>Rondeaux et al., 1996</i>)	$\frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo + L} * (1 + L), L = 0.16$
MSAVI2 (<i>Qi et al., 1994</i>)	$NIR + 0.5 - \sqrt{NIR^2 - 2(NIR - Rojo)}$
chIRIgreen (<i>Gitelson and Merzlyak, 2004</i>)	$\left(\frac{1}{Verde} - \frac{1}{NIR} \right) * NIR$

El índice de vegetación de la diferencia normalizada, NDVI por sus siglas en inglés (*Normal Difference Vegetation index*) es el más ampliamente utilizado en el estudio de cubiertas vegetales (Gilabert et al., 1997) y presenta la ventaja de estar normalizado. El **GEMI** (*Global Environmental Monitoring Index*) reduce el efecto de las perturbaciones atmosféricas en el estudio de las cubiertas vegetales, mientras que el **SAVI** (*Soil Adjusted Vegetation Index*) y el **OSAVI** (*Optimized Soil Adjusted Vegetation index*) y el **MSAVI2** (*Modified Soil Adjusted Vegetation index 2*) minimizan el efecto del suelo.

El **(Chl)RI_{green}** (Chlorophyll reflectance index green) es sensible al contenido de clorofila y su cálculo involucra las bandas espectrales del Verde y el NIR.

3.2.3 Función de transferencia

En el marco de este trabajo, una función de transferencia es aquella ecuación que relaciona los valores de una variable biofísica en los sitios de muestreo en campo (ESUs), con los datos radiométricos asociados a los mismos sitios, tomados de los píxeles correspondientes en una imagen satelital.

Para la definición de las funciones de transferencia se utilizó el método paramétrico, que consiste en ajustar un modelo empírico (se consideraron funciones lineales) entre la variable biofísica (variable dependiente) y los valores de reflectancia y/o los índices de vegetación asociados (variables independientes). Se consideraron 45 modelos lineales diferentes, que se probaron para cada una de las variables biofísicas estudiadas (Tabla 3-2).

Tabla 3-2 Modelos lineales probados para cada variable biofísica, donde a_i , b_i , c_j , d_j , e_k con $i=1,\dots,45$, $j=14,\dots,45$ y $k=36,\dots,45$, son los parámetros de ajuste de cada modelo lineal.

Modelo lineal (LAI, fAPAR y Clorofila _{a+b} *LAI)	Combinación de bandas y/o índices de vegetación
1	$a_1 + b_1 * \text{chIRIgreen}$
2	$a_2 + b_2 * \text{Verde}$
3	$a_3 + b_3 * \text{Rojo}$
4	$a_4 + b_4 * \text{NIR}$
5	$a_5 + b_5 * \text{RN}$
6	$a_6 + b_6 * \text{SR}$
7	$a_7 + b_7 * \text{DVI}$
8	$a_8 + b_8 * \text{NDVI}$
9	$a_9 + b_9 * \text{RDVI}$
10	$a_{10} + b_{10} * \text{GEMI}$
11	$a_{11} + b_{11} * \text{SAVI}$
12	$a_{12} + b_{12} * \text{OSAVI}$
13	$a_{13} + b_{13} * \text{MSAVI2}$
14	$a_{14} + b_{14} * \text{Verde} + c_{14} * \text{chIRIgreen}$
15	$a_{15} + b_{15} * \text{Rojo} + c_{15} * \text{chIRIgreen}$
16	$a_{16} + b_{16} * \text{NIR} + c_{16} * \text{chIRIgreen}$
17	$a_{17} + b_{17} * \text{Verde} + c_{17} * \text{NIR}$
18	$a_{18} + b_{18} * \text{Rojo} + c_{18} * \text{NIR}$
19	$a_{19} + b_{19} * \text{Verde} + c_{19} * \text{Rojo}$
20	$a_{20} + b_{20} * \text{Verde} + c_{20} * \text{NDVI}$
21	$a_{21} + b_{21} * \text{Rojo} + c_{21} * \text{NDVI}$
22	$a_{22} + b_{22} * \text{NIR} + c_{22} * \text{NDVI}$
23	$a_{23} + b_{23} * \text{Verde} + c_{23} * \text{Rojo} + d_{23} * \text{NIR}$
24	$a_{24} + b_{24} * \text{Verde} + c_{24} * \text{Rojo} + d_{24} * \text{NDVI}$
25	$a_{25} + b_{25} * \text{Verde} + c_{25} * \text{NIR} + d_{25} * \text{NDVI}$
26	$a_{26} + b_{26} * \text{Rojo} + c_{26} * \text{NIR} + d_{26} * \text{NDVI}$

27	$a_{27} + b_{27} * \text{Verde} + c_{27} * \text{Rojo} + d_{27} * \text{RN}$
28	$a_{28} + b_{28} * \text{Verde} + c_{28} * \text{NIR} + d_{28} * \text{RN}$
29	$a_{29} + b_{29} * \text{Rojo} + c_{29} * \text{NIR} + d_{29} * \text{RN}$
30	$a_{30} + b_{30} * \text{Verde} + c_{30} * \text{Rojo} + d_{30} * \text{SR}$
31	$a_{31} + b_{31} * \text{Verde} + c_{31} * \text{NIR} + d_{31} * \text{SR}$
32	$a_{32} + b_{32} * \text{Rojo} + c_{32} * \text{NIR} + d_{32} * \text{SR}$
33	$a_{33} + b_{33} * \text{Verde} + c_{33} * \text{Rojo} + d_{33} * \text{chlRlgreen}$
34	$a_{34} + b_{34} * \text{Verde} + c_{34} * \text{NIR} + d_{34} * \text{chlRlgreen}$
35	$a_{35} + b_{35} * \text{Rojo} + c_{35} * \text{NIR} + d_{35} * \text{chlRlgreen}$
36	$a_{36} + b_{36} * \text{Verde} + c_{36} * \text{Rojo} + d_{36} * \text{NIR} + e_{36} * \text{RN}$
37	$a_{37} + b_{37} * \text{Verde} + c_{37} * \text{Rojo} + d_{37} * \text{NIR} + e_{37} * \text{SR}$
38	$a_{38} + b_{38} * \text{Verde} + c_{38} * \text{Rojo} + d_{38} * \text{NIR} + e_{38} * \text{chlRlgreen}$
39	$a_{39} + b_{39} * \text{Verde} + c_{39} * \text{Rojo} + d_{39} * \text{NIR} + e_{39} * \text{DVI}$
40	$a_{40} + b_{40} * \text{Verde} + c_{40} * \text{Rojo} + d_{40} * \text{NIR} + e_{40} * \text{NDVI}$
41	$a_{41} + b_{41} * \text{Verde} + c_{41} * \text{Rojo} + d_{41} * \text{NIR} + e_{41} * \text{RDVI}$
42	$a_{42} + b_{42} * \text{Verde} + c_{42} * \text{Rojo} + d_{42} * \text{NIR} + e_{42} * \text{GEMI}$
43	$a_{43} + b_{43} * \text{Verde} + c_{43} * \text{Rojo} + d_{43} * \text{NIR} + e_{43} * \text{SAVI}$
44	$a_{44} + b_{44} * \text{Verde} + c_{44} * \text{Rojo} + d_{44} * \text{NIR} + e_{45} * \text{OSAVI}$
45	$a_{45} + b_{45} * \text{Verde} + c_{45} * \text{Rojo} + d_{45} * \text{NIR} + e_{45} * \text{MSAVI2}$

En todos los casos, primero se ajustó la función (para determinar los valores de los parámetros que la definen) y después se validó. Esto supuso contar con un conjunto de observaciones para el ajuste (o entrenamiento) y otro conjunto diferente para la validación (o prueba).

En este trabajo se dispuso de los 62 puntos de vegetación (ESUs), además de los 10 datos de suelo desnudo y 5 de claros, resultando un total de 77 puntos, lo que constituye un conjunto pequeño de datos, en relación al tamaño y la heterogeneidad de la zona de estudio

Cuando el conjunto de datos de que se dispone es relativamente pequeño, es probable que las funciones de transferencia que se obtengan dependan de la elección de los datos de entrenamiento y de prueba. Para minimizar este efecto, se recurre a la validación cruzada, que consiste en la partición del conjunto de datos en k subconjuntos, donde $(k-1)$ subconjuntos funcionan como datos de entrenamiento para el ajuste de la función, y uno para la validación. El proceso se repite k veces (iteraciones) dejando cada vez un subconjunto diferente para validación. De las k funciones ajustadas, se elige como función resultante para ese modelo, aquella que presenta el error de ajuste más pequeño.

Para este trabajo se consideró $k=n=77$ para ajustar las funciones, si bien la validación final se realizó considerando únicamente los 62 puntos de vegetación. De esta manera las funciones se ajustaron considerando los diferentes tipos de cobertura (vegetación, suelo, claros), pero se eligieron considerando como criterio principal su capacidad de estimación en los pixeles de vegetación.

Cálculos estadísticos

Se realizaron diferentes cálculos para evaluar tanto la calidad del ajuste de cada función, como su capacidad predictiva.

Para el ajuste de las regresiones lineales múltiples, se utilizó la función *Robusfit* de Matlab, que proporciona información del error de ajuste mediante la raíz del error cuadrático medio de mínimos cuadrados ($RMSE_{mc}$, por sus siglas en inglés).

$$RMSE_{mc} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k-1} (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - m}} \quad (11)$$

Además, la función *Robusfit* considera un algoritmo iterativo para asignarle un peso a los puntos de ajuste, aplicando una función *bisquare* a los residuos de cada iteración previa. A los puntos que no se ajustan bien se les asignan pesos

menores, lo que permite minimizar el efecto de los valores extremos (*outliers*). Con estos pesos se calcula el RMSE ponderado, PRMSE, dado por la ecuación (12):

$$PRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{k-1} w_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - m}} \quad (12)$$

Donde w_i son los pesos de la función *Robustfit* ($0 \leq w_i \leq 1$), y_i son los valores medidos, \hat{y}_i son los valores estimados, n es el número de puntos en la regresión (total de puntos en las $k - 1$ particiones de ajuste) y m es el número de coeficientes en el modelo a ajustar.

De las k funciones ajustadas para cada modelo lineal, se eligió como representante del modelo aquella que tuvo asociado el PRMSE más bajo.

En cada ajuste del modelo se consideraron valores extremos aquellos con un peso menor a 0.7; se tomaron en cuenta únicamente los puntos correspondientes a la vegetación (62 ESUs).

Validación cruzada

Para cada iteración, i , el error e_i se calculó como la diferencia entre la estimación, \hat{y}_i (obtenida con la expresión ajustada con los $(n-1)$ puntos considerados, para el único que no se tomó para el ajuste) y el valor medido en ese punto, y_i .

$$e_i = |y_i - \hat{y}_i| \quad (13)$$

Para conocer el nivel de dependencia de la función ajustada con respecto a las particiones de los datos, se calcula el CRMSE (RMSE cruzado).

$$CRMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i \quad (14)$$

Por otra parte, para cada una de las funciones ajustadas de cada variable biofísica, se calculó el *índice de concordancia*, d , que involucra los valores

estimados y medidos, así como sus respectivos promedios (Willmott and Wicks, 1980, Willmott 1981,1982) . El índice d es un valor normalizado que permite hacer comparaciones entre modelos.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{y}_i'| + |y_i'|)^2} \right] \quad 0 \leq d \leq 1. \quad (15)$$

Donde

$$\hat{y}_i' = \hat{y}_i - \bar{y}.$$

$$y_i' = y_i - \bar{y}.$$

donde \bar{y} es el promedio de los valores medidos.

Elección de la mejor función de transferencia

Entre las diferentes funciones de transferencia que se ajustaron y validaron para cada variable biofísica entre los datos de campo y los radiométricos, se consideró que la mejor sería aquella que cumpliera los siguientes requisitos:

- Buena concordancia entre los rangos de valores medidos y estimados, es decir, que no hubiera valores incoherentes.
- Los valores del RMSE más pequeños, tanto de ajuste como de validación, tomando en cuenta el número de los valores extremos; es decir, a menos número de valores extremos, mayor número de puntos representativos en el ajuste de la función.
- El índice de concordancia d más alto, ya que es un indicativo de la capacidad de la función de transferencia para estimar valores dentro de un rango amplio.

Una vez seleccionada la mejor función de transferencia para cada variable biofísica, se calculó el RMSE asociado a la estimación de la variable con esa

función, en todos los ESUs muestreados en campo. Este valor corresponde al error (absoluto y relativo) asociado al mapa que se construirá con esa función.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (16)$$

$$RMSE_{relativo} = \frac{RMSE}{\bar{y}} * 100 \quad (17)$$

También se calcula el sesgo estadístico, *Bias* y *Bias relativo*, para conocer si la función sobreestima o subestima los datos.

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{n} \quad (18)$$

$$Bias_{relativo} = \frac{Bias}{\bar{y}} * 100 \quad (19)$$

Finalmente, se analizan las distribuciones de las variables biofísicas, así como las relaciones entre ellas, dos a dos, considerando separadamente los datos de campo y los valores estimados.

3.2.4 Construcción de mapas de las variables biofísicas de la RBMM

Con el fin de obtener los mapas de variables biofísicas de la RBMM, se aplicaron las funciones de transferencia elegidas a cada pixel del mosaico SPOT obtenido en el Capítulo 2.

3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3.1 Función de transferencia

Se realizó un proceso iterativo de validación cruzada para probar 45 modelos lineales entre los datos biofísicos y datos radiométricos, ajustando un total de 77 funciones para cada modelo. De las 77 funciones, se eligió, para representar el modelo, la que presentaba el PRMSE más bajo, quedando 45 funciones. Después de eliminar las que estimaban valores aberrantes asociados a los puntos de suelo desnudo, quedaron 35 funciones válidas para el LAI, 10 para el fAPAR y 16 para la Clorofila. La Figura 3-1 muestra los valores estadísticos calculados en cada una de estas funciones.

En todos los casos el $RMSE_{mc}$ fue similar, pero ligeramente superior al PRMSE, lo que se explica porque este último no toma en cuenta los valores extremos. Para las tres variables biofísicas estudiadas, estos errores resultaron ser mayores que el CRMSE, asociado a la validación. Esto puede deberse al hecho de que el error de validación se calculó como un promedio de 77 errores, asociados cada uno a la estimación de un solo punto, mientras que los errores de ajuste se calcularon considerando 76 puntos. Estos errores están expresados en valor absoluto con las unidades en las que se midieron las variables, lo que explica las diferencias entre los rangos de valores. Se observa que para el LAI y el fAPAR, el CRMSE tuvo un comportamiento paralelo al del PRMSE, pero no al del $RMSE_{mc}$.

El número de valores extremos llegó a 12 en una de las funciones del LAI, 9 en las del fAPAR y 7 en las de la Clorofila. Estos valores podrían estar asociados a ESUs que presenten características particulares principalmente por la presencia de vegetación baja en abundancia (LAI down) y con valores de reflectancia altos en el Verde y Rojo. Estos sitios tuvieron asociado un valor de peso alrededor de cero en el ajuste de regresión.

El índice de concordancia, d , puede presentar valores entre 0 y 1, por definición. Para todas las variables y todas las funciones se mantuvo entre 0.3 y 0.45, lo que supone valores de concordancia relativamente bajos. Esto se explica por una parte por el hecho de que en su cálculo sólo se consideraron los puntos de vegetación (no los suelos, ni los claros), y por otra, porque el rango de valores de los datos de vegetación fue estrecho, ya que los sitios muestreados correspondían a densidades similares de arbolado. En todo caso, los valores más altos de d obtenidos, fueron suficientes para pensar que las funciones asociadas son capaces de estimar el rango de valores medidos y por lo tanto reproducir suficientemente la variabilidad de la zona de estudio.

Elección de la mejor función

Los criterios considerados para elegir la función de transferencia con la que construir un mapa de una variable biofísica son (de acuerdo con el proyecto VALERI): comportamiento coherente; menor error de ajuste ($RMSE_{mc}$ y $PRMSE$ pequeños), pocos valores extremos, menor error de validación ($CRMSE$ pequeño) y mayor índice de concordancia (d alto). En el caso en que todos los requisitos mencionados no se cumplan para una misma función, se da prioridad al índice de concordancia, con valores medios de los demás criterios.

Para el LAI, aquellas funciones que presentaron valores bajos del $PRMSE$, también presentaron valores bajos del $CRMSE$; estas funciones serían las que estimarían el LAI con mayor exactitud. Sin embargo, no presentaron valores altos de d , por lo que de ser elegidas estas funciones, el rango de valores estimados de LAI sería pequeño en relación al rango de valores medidos. La función que presentó el valor de d más alto es la n° 3, por lo que fue finalmente elegida; para esta función, el $PRMSE$ fue intermedio, si bien el $CRMSE$ fue de los más altos.

En el caso del fAPAR, la elección fue más simple, ya que la función n° 7 presentó el mayor valor de d , y sus valores de $PRMSE$ y $CRMSE$ fueron de los más bajos, por lo que se eligió como función de transferencia.

Para la Clorofila, la función que presentó el mayor valor de d es la nº 2, y sus errores asociados, PRMSE y CRMSE son intermedios, por los que esta función pasó a ser la función de transferencia.

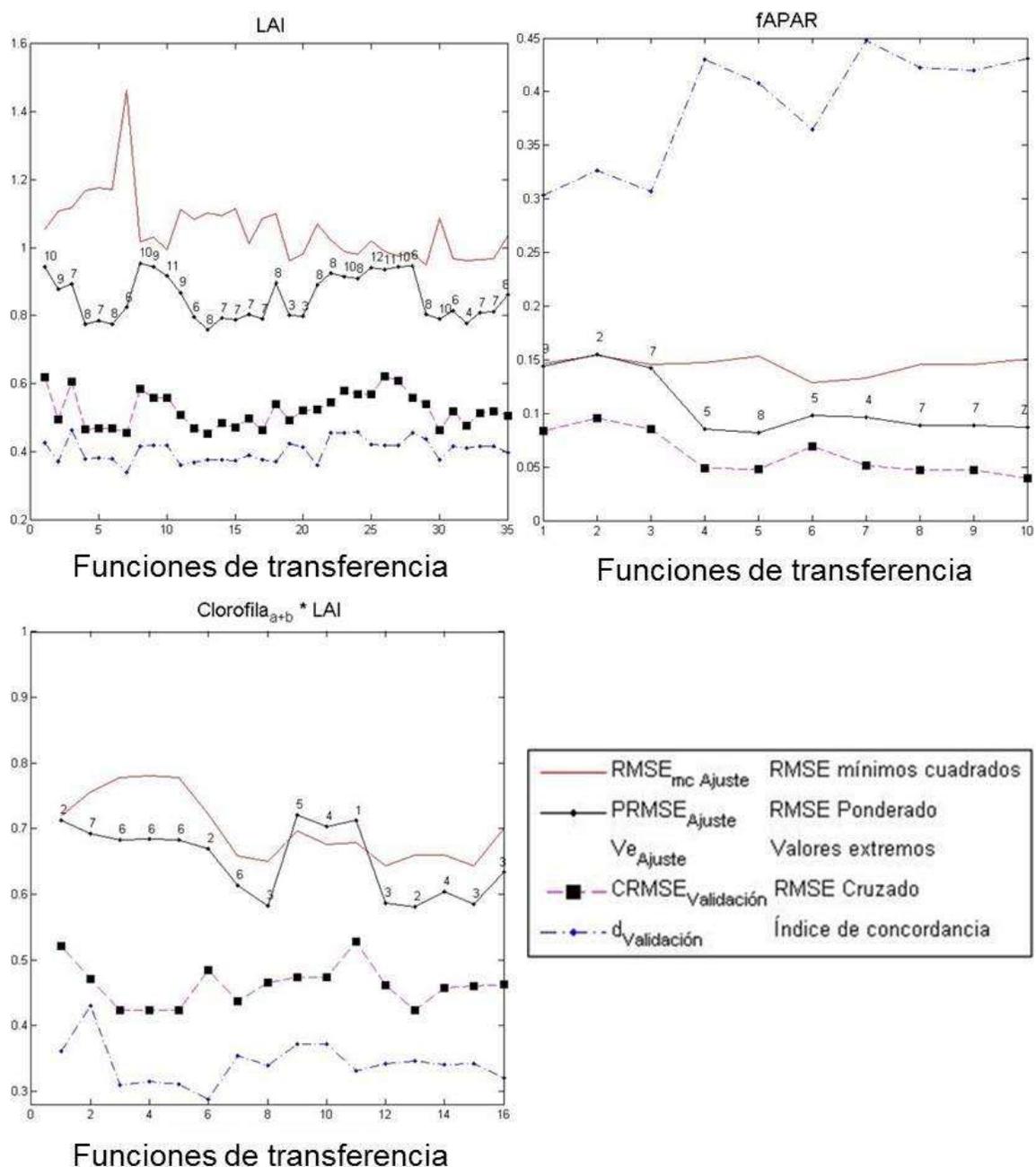


Figura 3-1. Errores de las funciones de transferencia de LAI. De ajuste (RMSE de mínimos cuadrados en color rojo, PRMSE en color negro, valores extremos en número) y validación (CRMSE en color magenta e índice de concordancia d en color azul).

Los valores de PRMSE asociados a las funciones elegidas fueron un poco más altos que los obtenidos en otros trabajos similares, como algunos sitios del proyecto VALERI correspondientes a bosque de coníferas. Por ejemplo para el LAI se obtuvo un PRMSE de 0.89, mientras que en el sitio de Larose (Canadá) y en Sierra Chincua, en el interior de la RBMM (2001), se obtuvieron valores de PRMSE del orden de 0.5. Sin embargo, en ambos casos el LAI promedio fue menor que el de este trabajo, por lo que en términos relativos el PRMSE resultó similar. En el caso del fAPAR, el PRMSE obtenido es de 0.1, mientras que en Larose se obtuvo un PRMSE de 0.03 (en Sierra Chincua no se analizó el fAPAR). El proyecto VALERI no consideró valores de clorofila, por lo que no existe un comparativo con los resultados obtenidos.

Con cada una de las funciones de transferencia elegidas, una para cada variable biofísica, se calculó el valor estimado correspondiente a cada ESU, incluyendo también los puntos de suelo y claros. En la Figura 3-2 se observan los valores medidos contra los estimados. Los valores de suelo desnudo y claros son sobreestimados en todos los casos, excepto para los claros con el fAPAR.

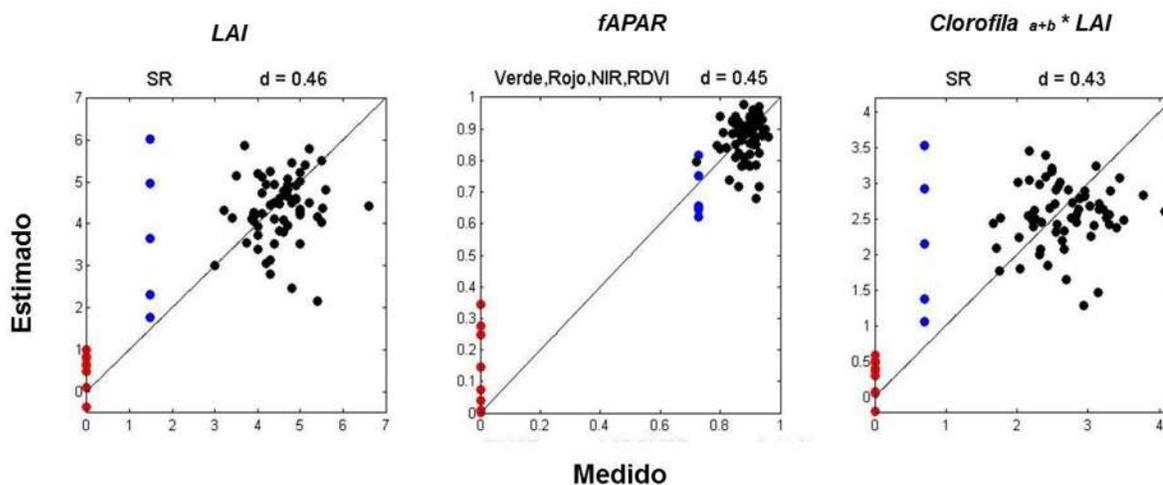


Figura 3-2. Valores medidos vs. Valores estimados. Se observan en negro los valores biofísicos en cada ESU, los valores de suelo desnudo en rojo y en azul los de claro.

Los errores de predicción de las funciones de transferencia se debieron a diferentes factores, como pueden ser: la heterogeneidad del sitio, el ruido

radiométrico, la localización del pixel, la precisión del geo-posicionador, etc. También hay que considerar el error asociado a la estimación de los datos de campo. En particular, el muestreo del contenido de Clorofila no fue tan exhaustivo como para garantizar una mejor representación para cada ESU, debido a la dificultad en la toma de muestras de las partes altas de los árboles, por lo que sólo se obtuvieron muestras de las partes bajas (hasta 8 m).

Considerando los valores correspondientes únicamente a la vegetación (62 ESUs), se calculó el RMSE asociado a la estimación de cada variable con su función de transferencia, en términos absolutos y relativos, así como el sesgo estadístico (*Bias* y *Bias relativo*), para evaluar si sobreestima o subestima los datos. La Tabla 3-3 muestra estos valores, junto con la ecuación de cada función y un resumen de los errores de ajuste y validación.

Las ecuaciones de las funciones de transferencia del LAI y la Clorofila fueron similares: lineales con respecto al SR (*Simple Ratio* = *NIR/Rojo*). El hecho de obtener una función equivalente para el LAI y la Clorofila indica que, en el dato de Clorofila (obtenido multiplicando el contenido de clorofila foliar, por el valor del LAI (Capítulo 1), pesa más el valor del LAI que el de la clorofila foliar. De hecho, la relación entre las dos ecuaciones ($0.31/0.56 = 0.55$) corresponde aproximadamente al promedio del contenido de clorofila foliar en el total de las muestras (Figura 1-10 del Capítulo 1). La ecuación obtenida para el fAPAR es un poco más compleja, pues involucra las tres bandas espectrales y el índice de vegetación RDVI. Los índices SR y RDVI son utilizados también en otros trabajos (Zurita Raúl, 2003, Roujean y Bréon, 1995, Verger et al., 2009), lo que evidencia su capacidad para estimar variables biofísicas.

El $RMSE_{relativo}$ se puede considerar como un indicador de la calidad en promedio del mapa que se obtendrá con cada función. El menor error corresponde al fAPAR (8.4%), mientras que el LAI y la Clorofila presentan errores similares, superiores al 20%.

Tabla 3-3 Funciones de transferencia de las variables biofísicas y sus errores de ajuste y validación.

Variabes biofísicas	Funciones de Transferencia	RMSE Mínimos cuadrados	PRMSE Ajuste <i>Robustfit</i>	CRMSE Validación Cruzada	<W> Promedio de los pesos	Ve Valores extremos <0.7	d Índice de Concordancia	RMSE n=62	RMSE relativo n=62 %	Bias	Bias relativo n=62 %
LAI	-0.56 + 0.53*SR	1.12	0.89	0.6	0.88	7	0.46	0.94	20.75	-0.18	6.56
fAPAR	-2.09 + 0.04*Verde + 0.24*Rojo – 0.15*NIR + 1.42*RDVI	0.13	0.1	0.05	0.9	4	0.45	0.07	8.41	-0.01	0.36
Clorofila	-0.31 + 0.31*SR	0.76	0.69	0.47	0.87	7	0.43	0.65	24.29	-0.12	4.58

El estadístico *Bias* muestra que en todas las funciones de transferencia hay una subestimación, siendo mayor para el LAI y menor para el fAPAR.

Se analizaron las relaciones entre las variables biofísicas, comparándolas dos a dos, tanto para los datos de campo como para los valores estimados, considerando únicamente vegetación. En la Figura 3-3 se observan los ajustes de regresión para las variables biofísicas estimadas y medidas.

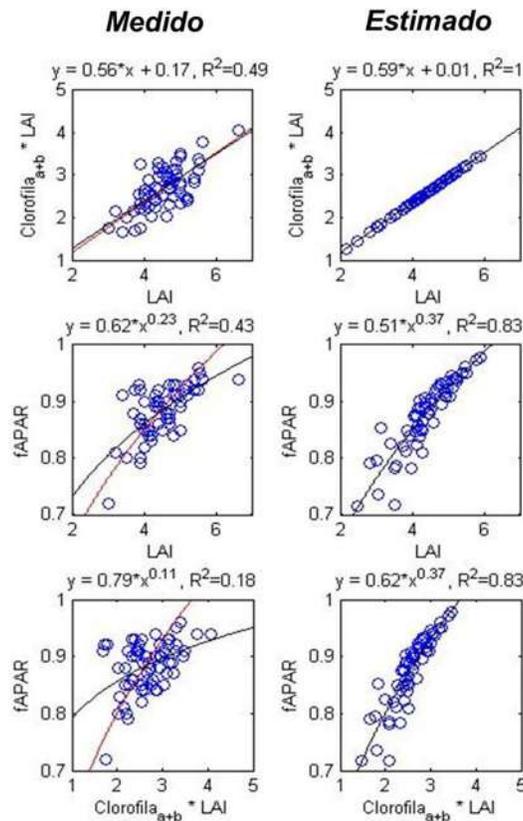


Figura 3-3. Comparación de las relaciones Medido-Estimado. Línea negra: ecuación de regresión. Línea roja: ecuación de regresión de los valores estimados.

En el caso de los valores medidos en campo, la relación entre la Clorofila y el LAI es lineal, con un coeficiente de correlación bajo ($R^2 = 0.49$). Para los valores estimados, la relación entre LAI y Clorofila es perfectamente lineal ($R^2 = 1$), como se deriva de la proporcionalidad entre las ecuaciones de sus funciones de transferencia. Las correlaciones entre fAPAR y LAI, así como fAPAR y Clorofila son altas, con $R^2 = 0.83$.

La Figura 3-4 muestra los histogramas de los valores medidos (son los presentados en la Figura 1-10 del Capítulo 1) y estimados para cada una de las variables biofísicas. Los rangos de valores son similares en ambos casos, al igual que el promedio de cada variable.

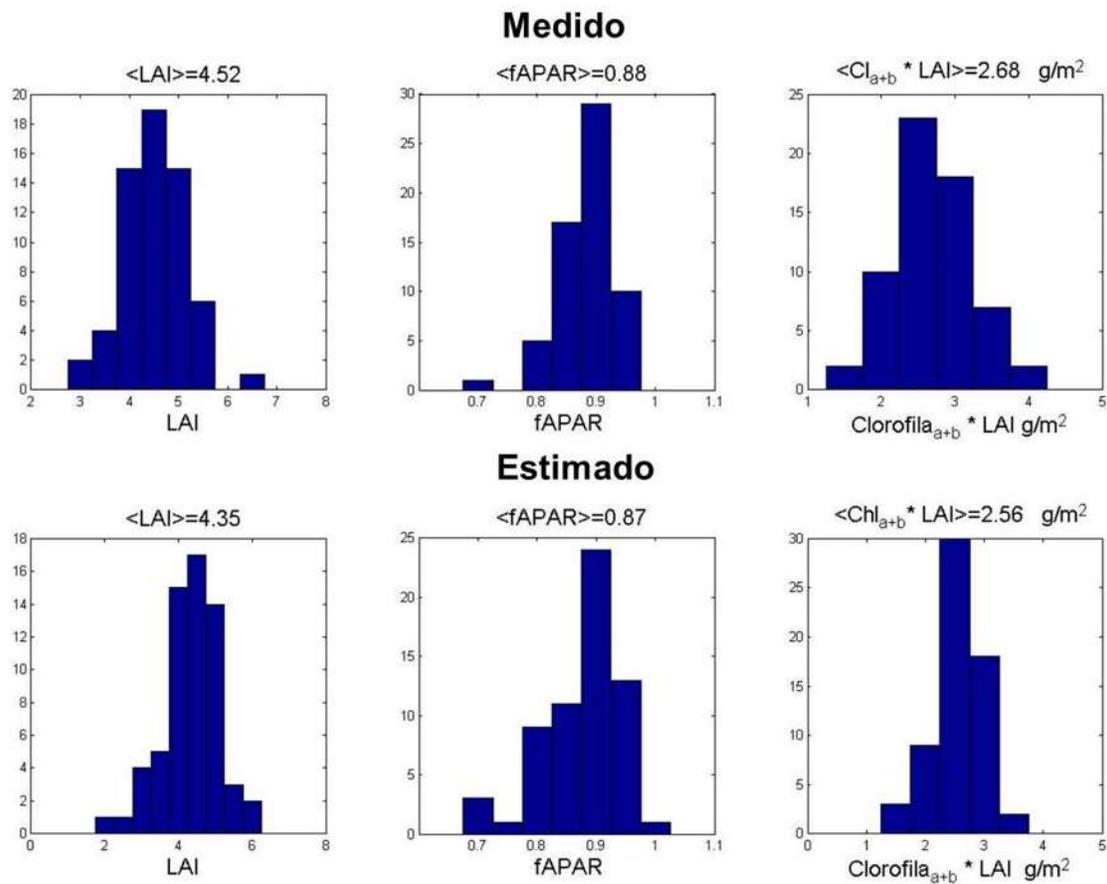


Figura 3-4. Histogramas de las variables biofísicas Medido-Estimado.

En la Tabla 3-4 se muestra la normalidad de los datos estimados, según la prueba de Shapiro-Wilk con un nivel de significancia de 0.05.

Tabla 3-4 Prueba de normalidad de las variables biofísicas estimadas.

Variable biofísica estimada	p
LAI	0.22
fAPAR	0.004
Clorofila _{a+b} * LAI	0.22

Las distribuciones del LAI y la Clorofila se consideran normales, pero no la de fAPAR. Esto es coherente con los resultados obtenidos al aplicar la misma prueba a los valores medidos en campo (Figura 1-10 y Tabla 1-1, del Capítulo 1).

3.3.2 Construcción de mapas de las variables biofísicas de la RBMM

Finalmente, para obtener los mapas de las variables biofísicas de la RBMM se aplicaron las funciones de transferencia a cada pixel del mosaico SPOT obtenido en el Capítulo 2 (Figura 2-9, del Capítulo 2). La Figura 3-5 muestra los mapas obtenidos.

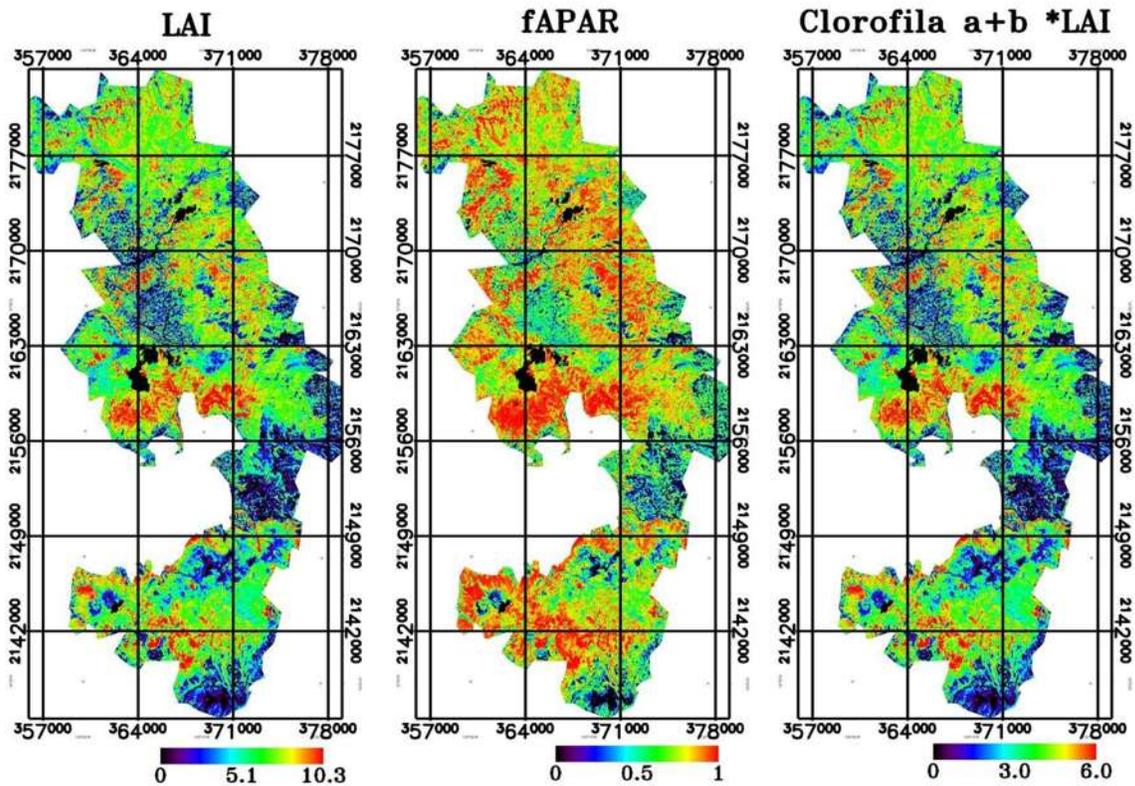


Figura 3-5. Mapas de las variables biofísicas de LAI, fAPAR, Clorofila_{a+b}*LAI de la RBMM para el verano del 2007.

Los diferentes tonos de azul corresponden a las zonas que presentan valores bajos de las tres variables. Se trata en general de zonas con poca o ninguna vegetación, como parcelas agrícolas no cultivadas, suelo desnudo y claros. El rojo indica los valores más altos. En particular se distingue una zona al centro-oeste de la reserva, que corresponde a pino y vegetación arbustiva, no a oyamel (Ramírez et al., 2008; Champo et al., 2012).

El mapa de LAI obtenido es similar al de Velasco López et al. (2010) para el mes de diciembre del 2001, en cuanto a la distribución de las zonas con alto y bajo LAI (salvo las deforestadas entre las dos fechas, como el ejido Crescencio Morales). En el mapa de 2007 el rango de valores es más amplio, lo cual puede deberse tanto a la función de transferencia utilizada, como a la diferencia estacional.

Dada la proporcionalidad entre las funciones de transferencia del LAI y la Clorofila, los mapas resultantes también son proporcionales.

3.4 CONCLUSIÓN

En el presente capítulo se probaron diferentes modelos lineales, con el fin de relacionar dos conjuntos de datos correspondientes a 77 puntos repartidos en la zona de estudio, representativos de la vegetación (bosque de oyamel), los claros y el suelo: los datos de campo de las variables biofísicas (LAI, fAPAR y Clorofila) (Capítulo 1) y los datos radiométricos (valores de reflectancia (Capítulo 2) e índices de vegetación).

Para cada variable biofísica, se ajustaron 45 modelos, de los que se eligió como función de transferencia aquel que presentó un índice de concordancia alto (alrededor de 0.45) y valores intermedios de los errores de ajuste y validación.

Aplicando las funciones de transferencia a cada pixel del mosaico SPOT (Capítulo 2), se obtuvieron los mapas de las variables biofísicas de la RBMM para el mes de Agosto del año 2007. La calidad de cada uno de los mapas se equiparó al error (RMSE relativo) asociado a la estimación de los datos de campo con cada una de las funciones. Para el LAI y la Clorofila, fue del orden del 20%, mientras que para el fAPAR fue del orden del 8%.

Las ecuaciones de las funciones de transferencia del LAI y la Clorofila son lineales con respecto al índice SR, por lo que son proporcionales entre sí. Esto indica que los mapas respectivos también lo son, por lo que resultan redundantes. Esto se debe a que, en los valores de Clorofila, la variabilidad introducida por el LAI pesó más que la asociada al contenido de clorofila foliar.

3.5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIRTH, G. S. & MCVEY, G. R. 1968. Measuring the color of growing turf with a reflectance spectrophotometer. *Agronomy Journal*, 60, 640-643.
- CHAMPO-JIMÉNEZ, O., ESPAÑA-BOQUERA, M. L. & 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.
- CHUVIECO, E. S. 1995. *Fundamentos de Teledetección Espacial*, Rialp.
- ESPAÑA BOQUERA, M., LOBIT, P. & CASTELLANOS MORALES, V. 2010. Estimación del contenido de clorofila en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca. *Revista fitotecnia mexicana*, 33, 175-181.
- GILABERT, M. A., GONZÁLEZ-PIQUERAS, J. & GARCÍA-HARO, J. 1997. Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección*, 8, 35-45.
- LÓPEZ-GARCÍA, J. 2007. Análisis de cambio de la cobertura forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (2006 - 2007). Agosto 2007. México. D.F.: Fondo para la conservación de la Mariposa Monarca (WWF y FMCN).
- MILLA, R. Z. (2003). "Determinación de variables biofísicas mediante teledetección en el marco de la agricultura de precisión."
- RAMIREZ, M., R. MIRANDA, R. ZUBIETA. (2008). "Vegetación y cubiertas del suelo 2006 (1: 75000)." Serie cartográfica Monarca 1.
- ROSSELLO, P. & WEISS, M. 2005. Larose site, boreal forest:GROUND DATA PROCESSING & PRODUCTION OF THE LEVEL 1 HIGH RESOLUTION MAPS. En línea: <http://www.avignon.inra.fr/valeri/>
- ROUJEAN, J.-L. & BREON, F.-M. 1995. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 51, 375-384.
- ROUSE, J. W., HAAS, R. H., SCELL, J. A., DEERING, D. W. & HARLAN, J. C. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. *NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, Md*, 371.

VELASCO LÓPEZ, S., CHAMPO JIMÉNEZ, O., ESPAÑA BOQUERA, M. & BARET, F. 2010. Estimación del índice de área foliar en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca. *Revista fitotecnia mexicana*, 33, 169-174.

VERGER, A., B. MARTÍNEZ, F. CAMACHO., F.J. GARCÍA. (2009). "Accuracy assessment of fraction of vegetation cover and leaf area index estimates from pragmatic methods in a cropland area." *International Journal of Remote Sensing* **30**(10): 2685-2704.

WILLMOTT, C. & WICKS, D. 1980. An empirical method for the spatial interpolation of monthly precipitation within California. *Phys. Geogr*, 1, 59-73.

WILLMOTT, C. J. (1981). "On the validation of models." *Physical geography* 2(2): 184-194.

WILLMOTT, C. J. (1982). "On the climatic optimization of the tilt and azimuth of flat-plate solar collectors." *Solar Energy* **28**(3): 205-216.

CONCLUSIÓN GENERAL

Con el fin de aportar información del estado que guarda el bosque de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca, se estableció el objetivo de cartografiar en la reserva las variables biofísicas más utilizadas en trabajos de evaluación de superficies naturales, a nivel de dosel. Se trata de: el índice de área foliar, LAI, que describe el tamaño de la interface vegetación/atmósfera y da una idea de la densidad de vegetación; la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida por la vegetación, fAPAR, que se corresponde con su capacidad fotosintética; y el contenido de clorofila, que es un indicador de salud o estrés. Ante la imposibilidad de realizar muestreos exhaustivos de estas variables en zonas amplias, se han propuesto estrategias de estimación, a partir de imágenes satelitales y algunos datos de campo. Tal es el caso de los trabajos realizados en el proyecto internacional VALERI, en cuya metodología se ha basado este estudio.

En este sentido en la primera fase del trabajo (Capítulo 1), entre Julio y Septiembre de 2007, se obtuvieron los datos de campo correspondientes a las variables objeto del estudio, en 62 sitios de muestreo de 20 m x 20 m, al interior de la reserva. Los datos consistieron en fotografías hemisféricas y muestras de hojas de las que se extrajo la clorofila. Las fotografías fueron analizadas con el programa CAN-EYE para obtener los valores de LAI y fAPAR. Para las zonas de suelo desnudo se consideró un valor de cero para todas las variables biofísicas y para los claros se obtuvieron valores aproximados.

En la segunda fase del trabajo (Capítulo 2) se buscó obtener los datos radiométricos asociados a cada uno de los puntos de muestreo, a partir de una imagen SPOT. Al no existir una imagen completa de la zona de estudio para la fecha de muestreo, se construyó un mosaico utilizando como base la imagen de Agosto, en la que se sustituyeron los pixeles no disponibles por partes de imágenes de fechas cercanas (Julio, Junio, Mayo de 2007), previamente corregidas. Del mosaico final, corregido topográficamente, se extrajeron los valores de reflectancia de cada pixel correspondiente a un punto de muestreo en

campo. Para representar los valores de suelo y claros, se tomaron pixeles adicionales, completando una base de datos de 77 puntos.

Para cada variable biofísica (Capítulo 3), se ajustaron y validaron 45 modelos lineales, entre los que se eligió el mejor, en términos de un alto índice de concordancia entre valores medidos y estimados, y errores de ajuste y validación razonables. De esta forma se obtuvo una función de transferencia para cada variable biofísica, que permite estimarla a partir de los datos de reflectancia. Los valores de índice de concordancia de las tres funciones están alrededor de 0.45, lo que indica que puede representar la variabilidad de la zona de estudio.

Para el LAI y la Clorofila las ecuaciones de las funciones de transferencia que se obtuvieron son lineales con respecto al índice SR y proporcionales entre sí. Esto se debe a que los datos de campo de contenido de clorofila del dosel se calcularon en cada punto de muestreo, como el producto del contenido de clorofila foliar por el LAI del sitio, por lo que las dos variables son interdependientes. La proporcionalidad de las ecuaciones indica que la estimación del contenido de clorofila en cada pixel equivale a estimar el LAI y multiplicarlo por el contenido de clorofila foliar promedio de la zona. En este sentido el mapa de clorofila resulta redundante.

Finalmente, se obtuvieron los mapas de las variables biofísicas de la RBMM para el mes de Agosto del año 2007 aplicando las funciones de transferencia a cada pixel del mosaico SPOT. La calidad del mapa se evaluó en términos del RMSE relativo asociado a la estimación de los datos de campo con la función de transferencia correspondiente. Para el LAI y la Clorofila, el error promedio es del orden del 20%, mientras que para el fAPAR es menor (8%).

La utilización de esta metodología para la obtención de mapas de variables biofísicas, tiene la ventaja de que, si bien se tienen que realizar muestreos de campo, éstos pueden limitarse a una cantidad relativamente pequeña de muestras, en particular si la zona de estudio es homogénea. Para zonas heterogéneas se debe cuidar que la variabilidad esté bien representada en la base

de datos. En todo caso, la obtención de valores de LAI y fAPAR a partir del análisis de fotografías hemisféricas es rápida, sencilla, no involucra consumibles de laboratorio, y puede retrasarse con respecto al muestreo. La obtención de datos de clorofila es más complicada, en particular si se trata de árboles grandes, zonas densas, de difícil acceso, etc.

Los resultados de este trabajo muestran que, para este caso, no fue útil realizar el mapa de clorofila, porque la variabilidad de la base de datos utilizada estaba más asociada a las diferencias de densidad de vegetación, que de contenido de clorofila. Sin embargo, en otras circunstancias, en las que se tenga una variabilidad asociada, por ejemplo, a situaciones de estrés o enfermedad, sería interesante construir un mapa, asegurándose de contar con una base de datos suficientemente representativa.

Existen iniciativas internacionales para la construcción de mapas de variables biofísicas a nivel global. Es el caso del proyecto CYCLOPES y su continuación, GEOLAND2. El enfoque es hacia la generación automática de series de tiempo con paso de 10 días, a partir del acervo histórico de imágenes satelitales, para los últimos 30 años. Estas series presentan la ventaja de permitir realizar un seguimiento de la vegetación, y estudiar los cambios de las superficies naturales del planeta con un enfoque fenológico. Sin embargo, presentan el inconveniente de su resolución espacial baja (1 km), que no resulta útil para trabajos regionales o locales, con el problema añadido de la presencia de píxeles mixtos.

La combinación de mapas de alta resolución espacial, para fechas puntuales, como los obtenidos en este trabajo, con series de tiempo, podría tener muchas aplicaciones en el ámbito del estudio de las superficies vegetales y su evolución.

RECOMENDACIONES

1. En el diseño del muestreo se debe asegurar la representatividad eligiendo ESUs que cubran toda la zona de estudio, incluyendo valores bajos y altos de las variables biofísicas a estudiar.
2. En el caso de la clorofila, no se recomienda construir un mapa de Clorofila, a menos que se busque detectar sitios donde se presente alguna situación de estrés o enfermedad y se realice un muestreo que asegure que estas zonas serán incluidas en el análisis.
3. La detección de las nubes en las imágenes se realizó de forma manual para garantizar un resultado preciso; sin embargo, se recomienda implementar una detección automática, en particular si el proceso se debe repetir muchas veces, por ejemplo si se trata de estudios de monitoreo.
4. Es importante que las imágenes que se utilicen para sustituir las zonas de nubes sean de fechas cercanas a la de la imagen base, para que la vegetación no haya sufrido cambios fenológicos importantes.

PERSPECTIVAS

En el futuro inmediato se buscará comparar los mapas obtenidos de LAI y fAPAR, con el recorte correspondiente de mapas globales de las mismas fechas, generados en proyectos internacionales como GEOLAND2. En el caso de la Clorofila, el mapa obtenido se comparará con mapas de índices de vegetación, como REP (Red Edge Position) o MTCI (MERIS Terrestrial Chlorophyll Index), calculados a partir de imágenes MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) de la RBMM, del verano 2007.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIRRE-SALADO, C. A., VALDEZ-LAZALDE, J. R., ÁNGELES-PÉREZ, G., DE LOS SANTOS-POSADAS, H. M. & AGUIRRE-SALADO, A. I. 2011. Mapeo del índice de área foliar y cobertura arbórea mediante fotografía hemisférica y datos SPOT 5 HRG: regresión y k-nn. *Agrociencia*, 45, 105-119.
- BARET, F., HAGOLLE, O., GEIGER, B., BICHERON, P., MIRAS, B., HUC, M., BERTHELOT, B., NIÑO, F., WEISS, M., SAMAIN, O., ROUJEAN, J. L. & LEROY, M. 2007. LAI, fAPAR and fCover CYCLOPES global products derived from VEGETATION: Part 1: Principles of the algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 110, 275-286.
- BARET, F. & WEISS, M. 2004. Can-Eye: processing digital photographs for canopy structure characterization. *CAN EYE tutorial document*, Avignon, France.
- BARET, F., WEISS, M., ALLARD, D., GARRIGUES, S., LEROY, M., JEANJEAN, H., FERNANDES, R., MYNENI, R., PRIVETTE, J. & MORISETTE, J. 2005. VALERI: a network of sites and a methodology for the validation of medium spatial resolution land satellite products. *Remote Sensing of Environment*.
- BARNES, J., BALAGUER, L., MANRIQUE, E., ELVIRA, S. & DAVISON, A. 1992. A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls a and b in lichens and higher plants. *Environmental and Experimental Botany*, 32, 85-100.
- BIRTH, G. S. & MCVEY, G. R. 1968. Measuring the color of growing turf with a reflectance spectrophotometer. *Agronomy Journal*, 60, 640-643.
- BROWER, L. P. 1985. New perspective on the migration biology of the monarch butterfly, *Danaus plexippus* L. . *Contributions in Marine Science [CONTRIB. MAR. SCI.]*, 68.
- BROWER, L. P. 1995. Understanding and misunderstanding the migration of the monarch butterfly (nymphalidae) in north america: 1857 - 1995. *Journal of the Lepidopterists' Society*, 49(4), 304-385.
- BROWER, L. P., CASTILLEJA, G., PERALTA, A., LOPEZ-GARCÍA, J., BOJORQUEZ-TAPIA, L., DIAZ, S., MELGAREJO, D. & MISSRIE, M. 2002. Quantitative changes in forest quality in a principal overwintering area of the monarch butterfly in Mexico, 1971-1999. *Conservation Biology*, 16(2), 346-359.
- BROWER, L. P., TAYLOR, O. R., WILLIAMS, E. H., SLAYBACK, D. A., ZUBIETA, R. R. & RAMÍREZ, M. I. 2012. Decline of monarch butterflies overwintering in Mexico: is the migratory phenomenon at risk? *Insect Conservation and Diversity*, 5(2), 95-100.
- BROWER, L. P., WILLIAMS, E. H., SLAYBACK, D. A., FINK, L. S., RAMÍREZ, M. I., ZUBIETA, R. R., GARCIA, M. I. L., GIER, P., LEAR, J. A. & HOOK, T. V. 2009. Oyamel fir forest trunks provide thermal advantages for overwintering

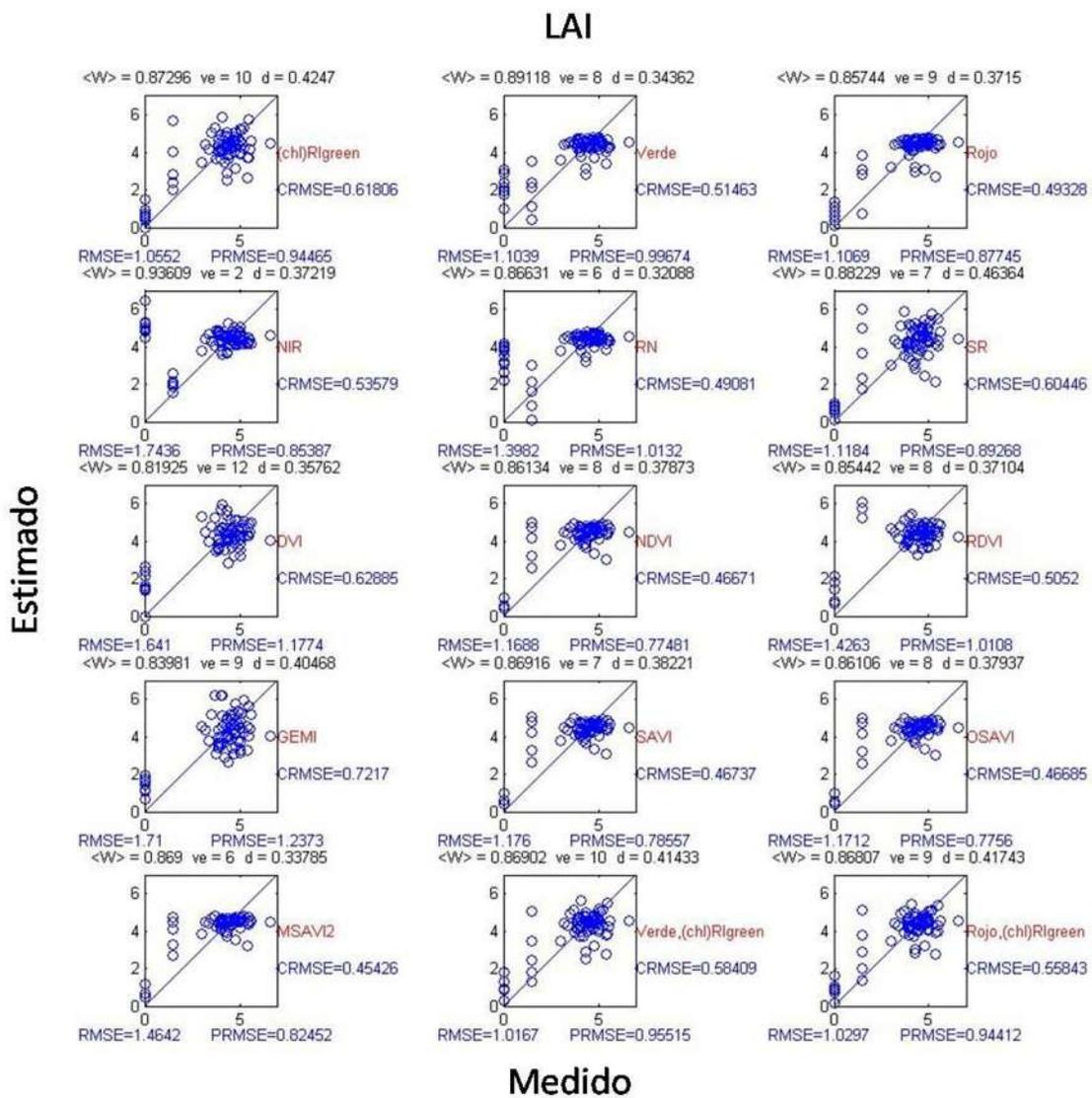
- monarch butterflies in Mexico. *Insect Conservation and Diversity*, 2(3), 163-175.
- CALVERT, W. H. & BROWER, L. P. 1986. The location of monarch butterfly (*Danaus Plexippus* L.) overwintering colonies in Mexico in relation to topography and climate. *Journal of the Lepidopterists' Society*, 40(3), 164-187.
- COFOM 2001. Atlas forestal del estado de Michoacán. Comisión Forestal del Estado de Michoacán. Morelia, Michoacán, México.
- CONANP 2001. Programa de manejo de la reserva de la biosfera Mariposa Monarca. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protejidas (CONANP). México, D.F.
- CHAMPO-JIMÉNEZ, O., ESPAÑA-BOQUERA, M. L. & 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.
- CHUVIECO, E. S. 1995. *Fundamentos de Teledetección Espacial*, Rialp.
- ESPAÑA BOQUERA, M., LOBIT, P. & CASTELLANOS MORALES, V. 2010. Estimación del contenido de clorofila en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca. *Revista fitotecnia mexicana*, 33, 175-181.
- FENSHOLT, R., SANDHOLT, I. & RASMUSSEN, M. S. 2004. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, 91, 490-507.
- GARCÍA-SERRANO, E., ULLOA-HERRERA, R., DE LA CRUZ-HERNÁNDEZ, J. A. & VÁZQUEZ-ESPINOSA, O. 2007. Monitoreo Social 2007 de los predios que participan en el Fondo para la Conservación de la Mariposa Monarca. *Fondo para la conservación de la Mariposa Monarca (WWF y FMCN). Agosto 2007. México. D.F.*
- GARDUÑO, B. N. 2011. Diagnostico Fitosanitario Forestal, Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca en el Estado de México.
- GILABERT, M. A., GONZÁLEZ-PIQUERAS, J. & GARCÍA-HARO, J. 1997. Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección*, 8, 35-45.
- GITELSON, A. A. & MERZLYAK, M. N. 2004. Non-Destructive Assessment of Chlorophyll Carotenoid and Anthocyanin Content in Higher Plant Leaves: Principles and Algorithms. *Papers in Natural resources*, 263.
- HONEY-ROSÉS, J., SALINAS, E. R., GARCÍA, J. L., PERALTA, A., ANGELES, P., CONTRERAS, I. & GALINDO-LEAL, C. 2004. Monitoreo Forestal del fondo monarca 2003.
- HUETE, A. R. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295-309.
- JACQUEMOUD, S., VERHOEF, W., BARET, F., BACOUR, C., ZARCO-TEJADA, P. J., ASNER, G. P., FRANÇOIS, C. & USTIN, S. L. 2009. PROSPECT+SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment*, 113, Supplement 1, S56-S66.
- JONCKHEERE, I., FLECK, S., NACKAERTS, K., MUYS, B., COPPIN, P., WEISS, M. & 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.
- LÓPEZ-GARCÍA, J. 2007. Análisis de cambio de la cobertura forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (2006 - 2007). Agosto 2007. México. D.F.: Fondo para la conservación de la Mariposa Monarca (WWF y FMCN). .
- MEYER, P., ITTEN, K. I., KELLENBERGER, T., SANDMEIER, S. & 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.
- MYNENI, R. B., HOFFMAN, S., KNYAZIKHIN, Y., PRIVETTE, J. L., GLASSY, J., TIAN, Y., WANG, Y., SONG, X., ZHANG, Y., SMITH, G. R., LOTSCH, A., FRIEDL, M., MORISETTE, J. T., VOTAVA, P., NEMANI, R. R. & RUNNING, S. W. 2002. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 83, 214-231.
- PINTY, B. & VERSTRAETE, M. 1992. GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio*, 101, 15-20.
- QI, J., CHEHBOUNI, A., HUETE, A. R., KERR, Y. H. & SOROOSHIAN, S. 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48, 119-126.
- RAMÍREZ, I. & ZUBIETA, R. 2005. Análisis regional y comparación metodológica del cambio en la cubierta forestal en la Región Mariposa Monarca. *Instituto de Geografía and World Wildlife Foundation*.
- RAMÍREZ, M. I., AZCÁRATE, J. G. & LUNA, L. 2003. Effects of human activities on monarch butterfly habitat in protected mountain forests, Mexico. *The Forestry Chronicle*, 79(2), 242-246.
- RONDEAUX, G., STEVEN, M. & BARET, F. 1996. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55, 95-107.
- ROSSELLO, P. & WEISS, M. 2005. Larose site, boreal forest:GROUND DATA PROCESSING & PRODUCTION OF THE LEVEL 1 HIGH RESOLUTION MAPS. En línea: <http://www.avignon.inra.fr/valeri/>.
- ROUJEAN, J.-L. & BREON, F.-M. 1995. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 51, 375-384.
- ROUSE, J. W., HAAS, R. H., SCELL, J. A., DEERING, D. W. & HARLAN, J. C. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. *NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, Md*, 371.
- TEILLET, P. M., GUINDON, B. & GOODENOUGH, D. G. 1982. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 8, 84-106.
- TENORIO, G. C., CASAS, A., FARFÁN, B., VILLASEÑOR, J. L. & MANRÍQUEZ, G. I. 2003. Flora y vegetación de las zonas núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 43-62.

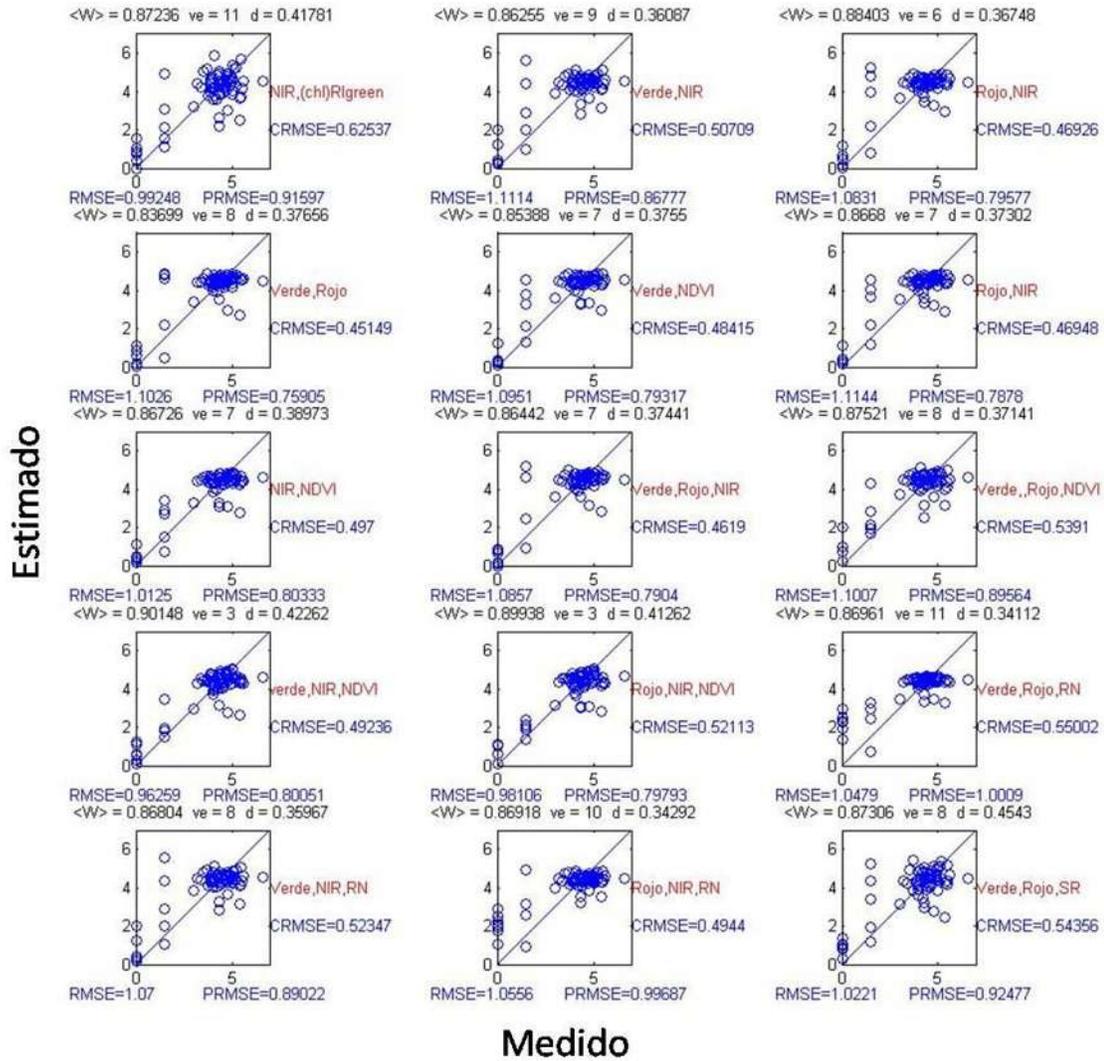
- TUCKER, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127-150.
- VELASCO LÓPEZ, S., CHAMPO JIMÉNEZ, O., ESPAÑA BOQUERA, M. & BARET, F. 2010. Estimación del índice de área foliar en la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca. *Revista fitotecnia mexicana*, 33, 169-174.
- VERHOEF, W. 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 16, 125-141.
- WATSON, O. J. 1947. Comparative physiological studies in the growth of field crops I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and with in and between year. *Ann Bot*, 11, 41-46.
- WEISS, M., BARET, F., SMITH, G., JONCKHEERE, I. & 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.
- WENZE, Y., TAN, B., DONG, H., RAUTIAINEN, M., SHABANOV, N. V., WANG, Y., PRIVETTE, J. L., HUENNRICH, K. F., FENSHOLT, R., SANDHOLT, I., WEISS, M., AHL, D. E., GOWER, S. T., NEMANI, R. R., KNYAZIKHIN, Y. & MYNENI, R. B. 2006. MODIS leaf area index products: from validation to algorithm improvement. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 44, 1885-1898.
- WILLMOTT, C. & WICKS, D. 1980. An empirical method for the spatial interpolation of monthly precipitation within California. *Phys. Geogr*, 1, 59-73.

ANEXO 1

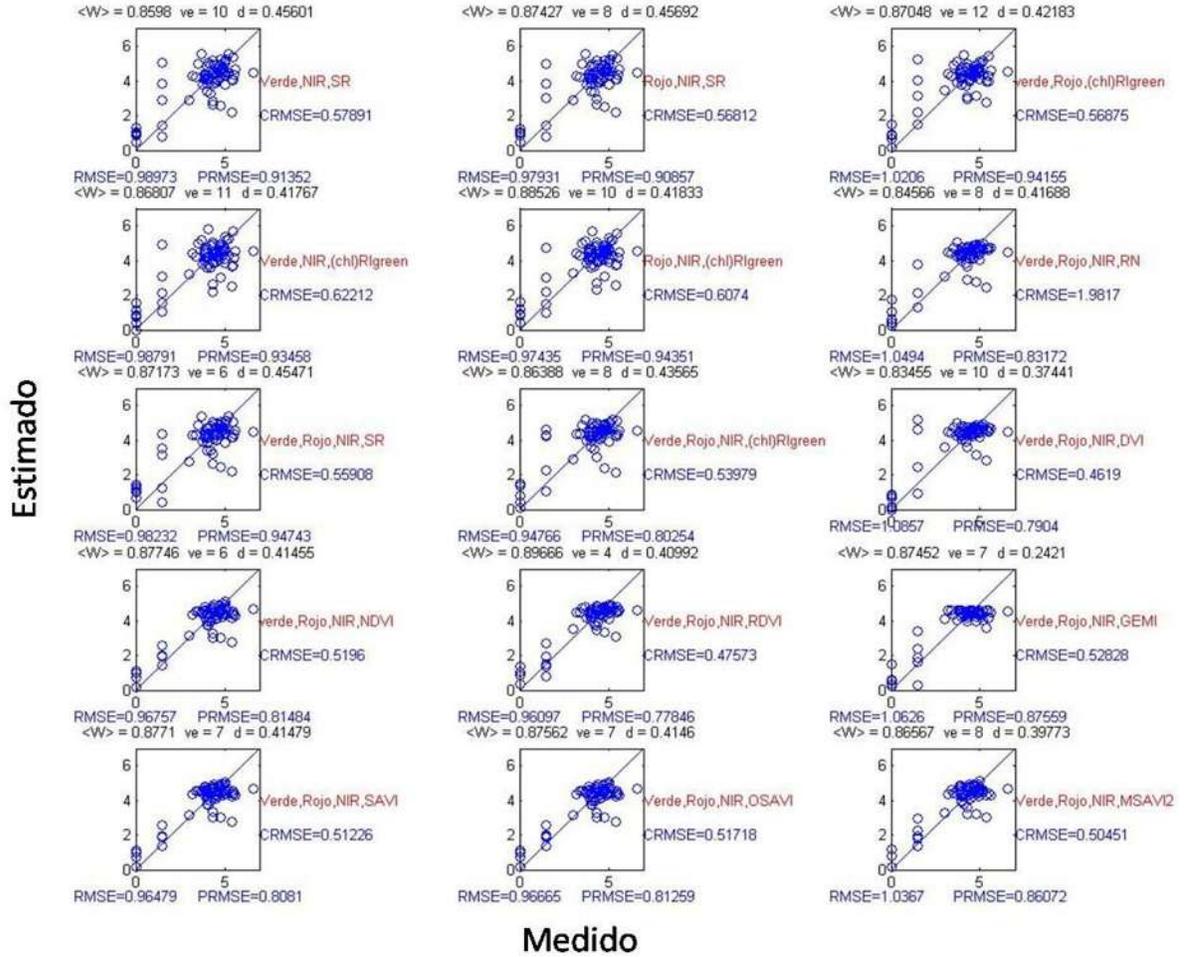
En las siguientes gráficas se muestran los valores medidos contra los estimados por las 45 funciones de transferencia de la Tabla 3-2 para cada una de las variables biofísicas. Los datos son correspondientes a suelo desnudo, claros y vegetación (ESUs). Se muestra también los errores de ajuste y validación. Los datos radiométricos que intervienen en la función de transferencia aparecen en rojo.



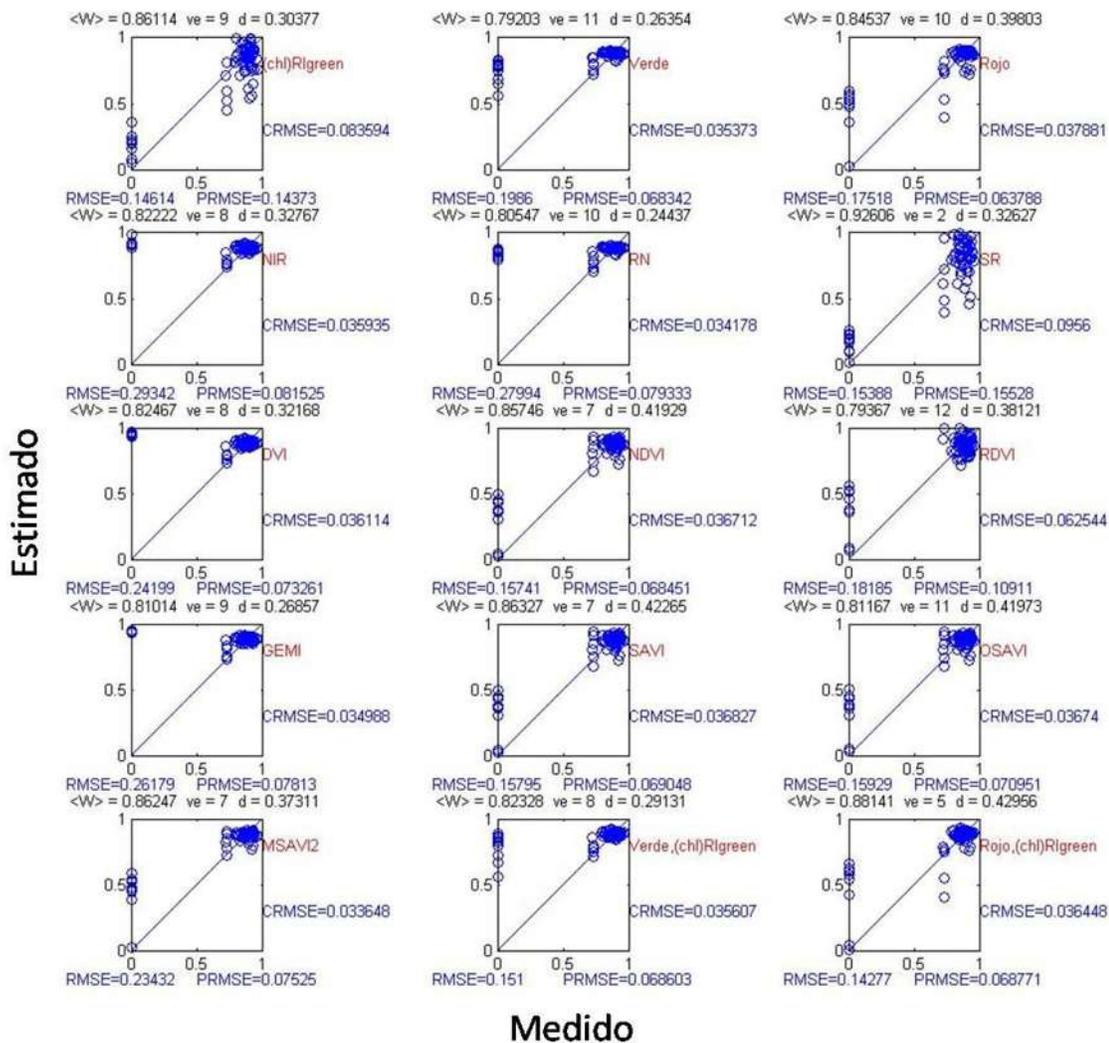
LAI



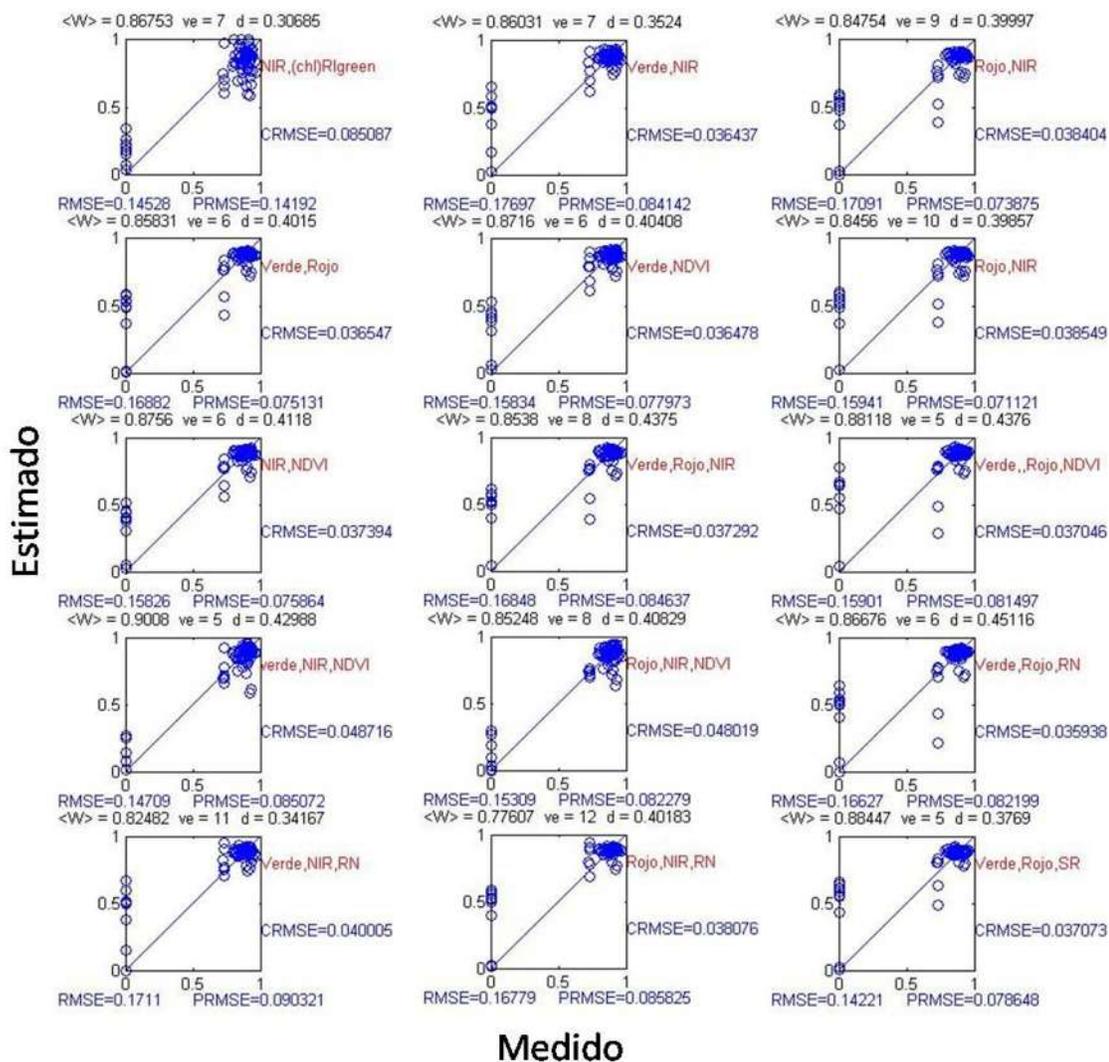
LAI



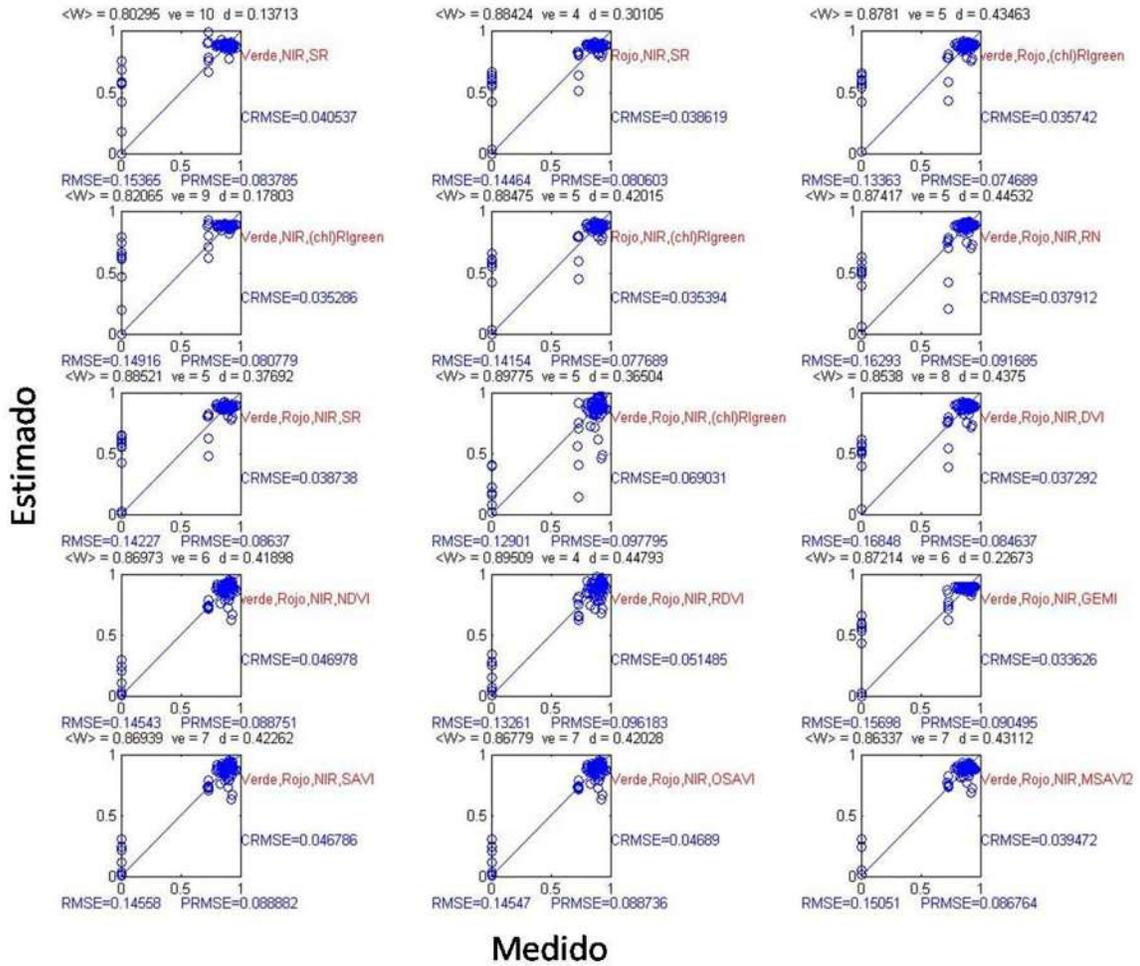
FAPAR



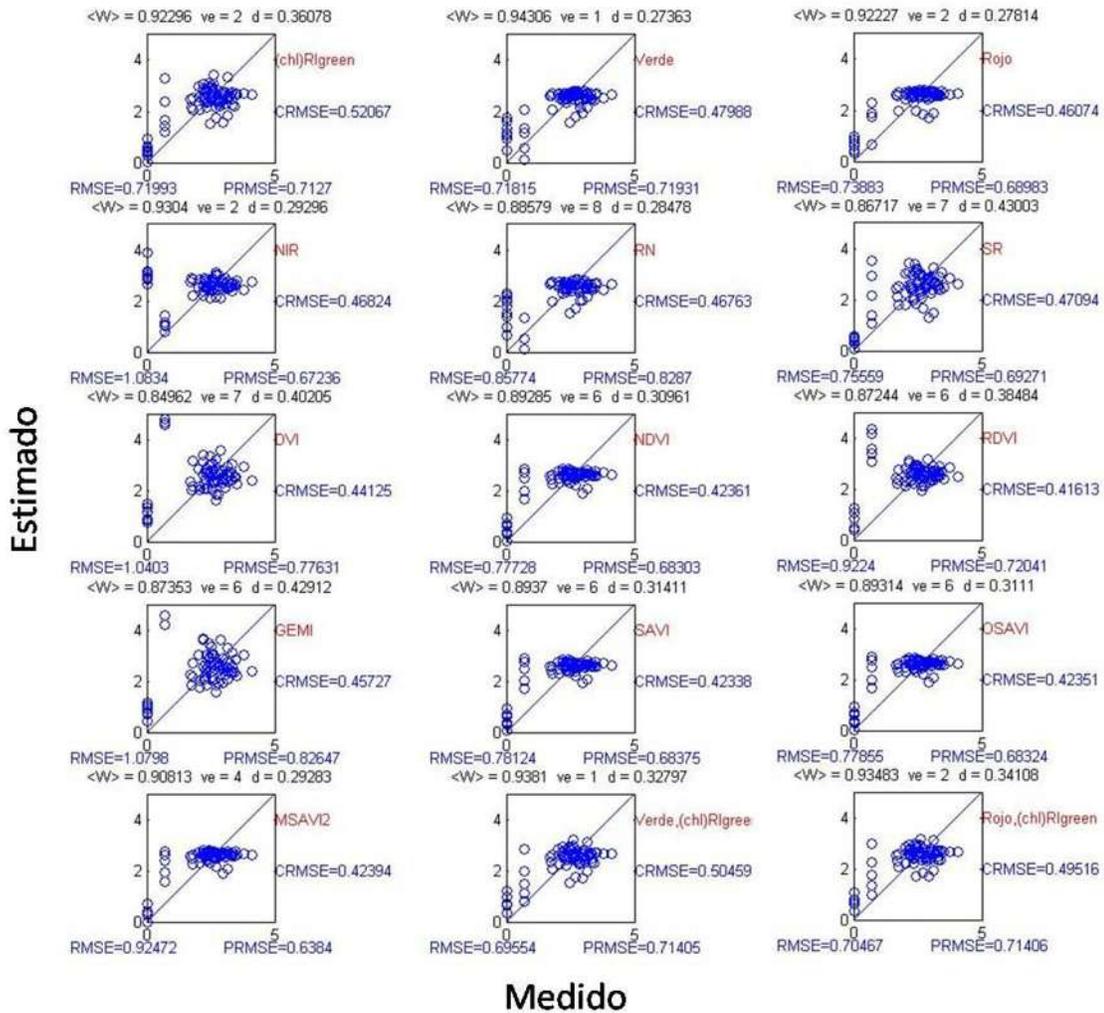
fAPAR



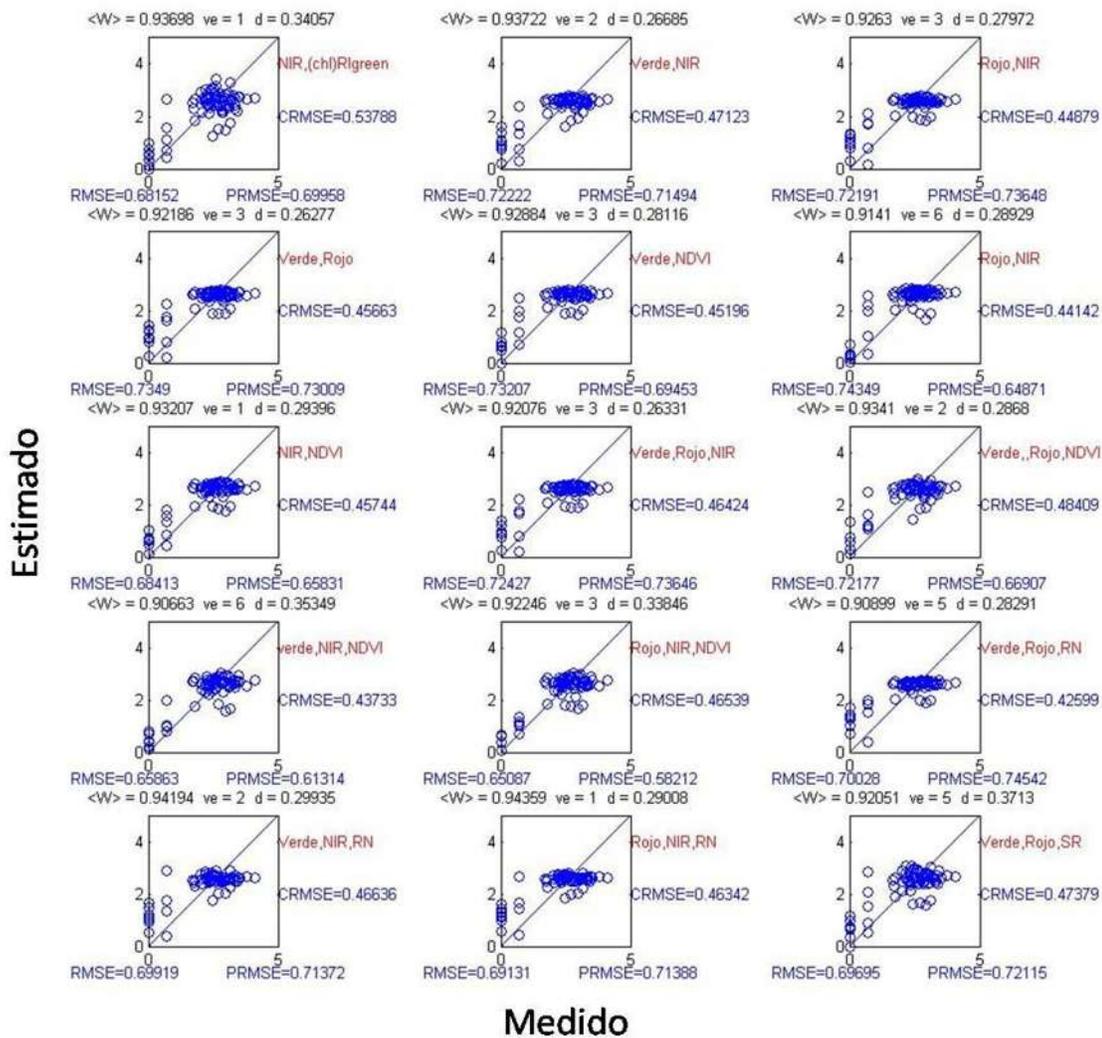
fAPAR



Clorofila_{a+b}*LAI



Clorofila_{a+b}*LAI



Clorofila_{a+b}*LAI

