



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS
DE HIDALGO**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS Y
FORESTALES**

PROGRAMA INSTITUCIONAL DE DOCTORADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

**EVALUACIÓN DE LA DEFORESTACIÓN DEL BOSQUE TEMPLADO DE
MICHOACÁN (2000-2006). PROPUESTA METODOLÓGICA EMPLEANDO LA
SERIE *LAI* DEL PROYECTO *CYCLOPES***

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

PRESENTA:

LUIS HUMBERTO VALDERRAMA LANDEROS

TUTORA:

DRA. MARÍA LUISA ESPAÑA BOQUERA

COTUTOR:

DR. FRÉDÉRIC BARET

MORELIA, MICH. AGOSTO 2011



**INSTITUTO DE
INVESTIGACIONES
AGROPECUARIAS
Y FORESTALES**



UNIVERSIDAD MICHOCANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO

Coordinación de Estudios de Posgrado

Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Biológicas

**Evaluación de la deforestación del bosque
templado de Michoacán (2000-2006). Propuesta
metodológica empleando la serie LAI del
proyecto CYCLOPES**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

DOCTOR EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA

LUIS HUMBERTO VALDERRAMA LANDEROS

TUTORA: DRA. MARÍA LUISA ESPAÑA BOQUERA

COTUTOR: DR. FRÉDÉRIC BARET

AGOSTO 2011

INDICE

I. RESUMEN GENERAL.....	xii
II. SUMMARY	xiv
III. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
IV. HIPÓTESIS.....	11
IV.1 Hipótesis general.....	11
IV.2 Hipótesis particulares	11
V. OBJETIVOS	12
V.1 Objetivo general	12
V.2 Objetivos específicos.....	12
VI. RESULTADOS	13
VI.1 CAPITULO I. Consistencia entre mapas globales y un mapa regional en el estado de Michoacán, México.....	15
VI.1.1 SUMMARY.....	17
VI.1.2 RESUMEN	17
VI.1.3 Introduction	18
VI.1.4 Materials and Methods.....	21
VI.1.5 Results and discussion	26
VI.1.6 Conclusion	37
VI.1.7 References.....	38
VI.1.8 Anexo VI.1.1 Mapas originales empleados en el estudio	42
VI.1.9 ANEXO VI.1.2. Principales características de los proyectos	43
VI.1.10 ANEXO VI.1.3. Estimadores complementarios.....	44
VI.1.11 CONCLUSIONES DEL CAPITULO I	51

VI.2	CAPITULO II. Construcción y validación de un mapa cobertura del estado de Michoacán, a partir del estudio fenológico de los principales tipos de vegetación con datos LAI de la serie CYCLOPES del año 2000.	53
VI.2.1	RESUMEN	53
VI.2.2	SUMMARY	54
VI.2.3	INTRODUCCIÓN	55
VI.2.4	MATERIALES Y MÉTODOS	57
VI.2.5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	66
VI.2.6	CONCLUSIONES	83
VI.2.7	Anexo 2.1. Descripción del LAI	85
VI.2.8	Anexo 2.2. Análisis de los huecos en la serie de tiempo CYCLOPES en el estado de Michoacán	87
VI.2.9	REFERENCIAS	95
VI.3	CAPITULO III Análisis de la deforestación en el estado de Michoacán a partir de la serie LAI-CYCLOPES (1999-2006)	100
VI.3.1	RESUMEN	100
VI.3.2	SUMMARY	101
VI.3.3	INTRODUCCIÓN	102
VI.3.4	MATERIALES Y MÉTODOS	103
VI.3.5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	110
VI.3.6	CONCLUSIONES	133
VI.3.7	REFERENCIAS	135
VII.	CONCLUSION GENERAL	136
VIII.	PERSPECTIVAS Y RECOMENDACIONES	138
IX.	BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA	139

ÍNDICE DE FIGURAS

Figure VI.1. Land cover maps with the unified legend for the 6 classifications investigated.	31
Figure VI.2. Levels of spatial agreement in the 5 global land cover maps.	36
Figura A.VI.1.1. Mapas globales y mapa regional incluidos en el análisis con su leyenda original (B. Broadleaf, E. Evergreen, D. Deciduous, F. Forest, G. Grassland, S. Shrubland).	42
Figura A.VI.1.3.1. Distribución del tamaño de los objetos dentro de cada una de las seis clasificaciones consideradas, en función del tamaño del objeto, que se expresa como el logaritmo natural del área, $\log(\text{Area})$). Las letras representan una clasificación específica: U = UMD, I = IGBP, M = MODIS, 2 = GLC2000, G = GLOBCOVER; C = CONABIO.	46
Figura A.VI.1.3.2. Distribución de la dimensión fractal en función del tamaño del objeto. El tamaño del objeto se expresa como el logaritmo natural del área, $\log(\text{Area})$). Las letras representan una clasificación específica: U = UMD, I = IGBP, M = MODIS, 2 = GLC2000, G = GLOBCOVER; C = CONABIO.....	47
Figura A.VI.1.3.3. Distribución del tamaño de los objetos dentro de cada uno de los seis mapas considerados, con las leyendas unificadas, en función del tamaño del objeto, expresado como el logaritmo natural del área ($\log(\text{Area})$). Las letras representan una clasificación específica: U = UMD, I = IGBP, M = MODIS, 2 = GLC2000, G = GLOBCOVER; C = CONABIO.	48
Figura A.VI.1.3.4. Distribución de la dimensión fractal correspondiente en función del tamaño del objeto, expresado como el logaritmo natural del área ($\log(\text{Area})$). Las letras representan una clasificación específica: U = UMD, I = IGBP, M = MODIS, 2 = GLC2000, G = GLOBCOVER; C = CONABIO.....	49
Figura A.VI. 1.3.5. Comparación entre los índices de exactitud global calculado en los mapas originales y los calculados erodando las fronteras de los objetos por 1 (\blacktriangle) o 2 píxeles (\blacksquare). Los índices de exactitud global fueron calculados para las 15 combinaciones de las 6 clasificaciones. La línea sólida delgada es la relación 1:1. La línea punteada y la línea sólida corresponden a la regresión lineal que pasa por el origen, respectivamente para la erosión de 1 y 2 píxeles.....	50
Figura A.VI.2.1.. Esquema del índice de área foliar y su comportamiento hipotético sobre el tiempo.....	85
Figura A.VI.2.2.1. Distribución espacial de la disponibilidad de datos en el área de estudio.....	90
Figura A.VI.2.2.2. Distribución promedio de la frecuencia de huecos respecto a rangos de altitud como porcentaje del total de datos.	91

Figura A.VI.2.2.3. Distribución de altitud en el estado de Michoacán.	92
Figura A.VI.2.2.4. Segmentos altitudinales y frecuencia de huecos por segmento.....	94
Figura VI.1. Mapa INF2000, versión simplificada empleada en este trabajo	61
Figura VI.2. Variables obtenidas por TIMESAT, ejemplo con un pixel.....	64
Figura VI.3. Distribución espacial de la variables fenológica <i>Inicio de estación</i> para el año 2000. P&M: pastizal y matorral, CU: cultivos, BM: bosque mixto, BC: bosque de coníferas y BHA: boque de hoja ancha.	67
Figura VI.4. Distribución espacial de la variables fenológica <i>Fin de estación</i> para el año 2000. P&M: pastizal y matorral, CU: cultivos, BM: bosque mixto, BC: bosque de coníferas y BHA: boque de hoja ancha.	68
Figura VI.5. Distribución espacial de la variables fenológica <i>Longitud de estación</i> para el año 2000. P&M: pastizal y matorral, CU: cultivos, BM: bosque mixto, BC: bosque de coníferas y BHA: boque de hoja ancha.	69
Figura VI.6. Distribución espacial de la variables fenológica <i>Mitad de estación</i> para el año 2000. P&M: pastizal y matorral, CU: cultivos, BM: bosque mixto, BC: bosque de coníferas y BHA: boque de hoja ancha.	70
Figura VI.7. Distribución espacial de la variables fenológica <i>Mínimo</i> para el año 2000. P&M: pastizal y matorral, CU: cultivos, BM: bosque mixto, BC: bosque de coníferas y BHA: boque de hoja ancha.	71
Figura VI.8. Distribución espacial de la variables fenológica <i>Máximo</i> para el año 2000. P&M: pastizal y matorral, CU: cultivos, BM: bosque mixto, BC: bosque de coníferas y BHA: boque de hoja ancha.	72
Figura VI.9. Distribución espacial de la variables fenológica <i>Amplitud</i> para el año 2000. P&M: pastizal y matorral, CU: cultivos, BM: bosque mixto, BC: bosque de coníferas y BHA: boque de hoja ancha.	73
Figura VI.10. Distribución espacial de la variables fenológica <i>Derivada izquierda</i> para el año 2000. P&M: pastizal y matorral, CU: cultivos, BM: bosque mixto, BC: bosque de coníferas y BHA: boque de hoja ancha.	74
Figura VI.11. Distribución espacial de la variable fenológica <i>Derivada Derecha</i> para el año 2000. P&M: pastizal y matorral, CU: cultivos, BM: bosque mixto, BC: bosque de coníferas y BHA: boque de hoja ancha.	75
Figura VI.12. Distribución espacial de la variable fenológica <i>Integral extendida</i> para el año 2000. P&M: pastizal y matorral, CU: cultivos, BM: bosque mixto, BC: bosque de coníferas y BHA: boque de hoja ancha.	76

Figura VI.13. Distribución espacial de la variable fenológica <i>Integral corta</i> para el año 2000. P&M: pastizal y matorral, CU: cultivos, BM: bosque mixto, BC: bosque de coníferas y BHA: bosque de hoja ancha.	77
Figura VI.14. Perfiles temporales de LAI promedio, de la serie CYCLOPES para los 5 principales tipos de vegetación en la región de estudio en el año 2004.	77
Figura VI.15. Perfiles temporales agregados de los principales tipos de vegetación.	78
Figura VI.16. Gráfico de Pareto con la varianza que explica cada componente y acumulada.	80
Figura VI.17. Mapa de vegetación CYCL2000. Las áreas sin color dentro del mapa corresponden a las zonas sin información fenológica debido a problemas de huecos o bien a objetos sin fenología (cuerpos de agua y zonas urbanas)	81
Figura VI.18. Mapa INF2000 simplificado a los 4 grupos de vegetación.	104
Figura VI.19. Precipitación mensual promedio de todas las estaciones en Michoacán por año.	105
Figura VI.20. Promedios mensuales de las temperaturas diarias observadas por año en el estado de Michoacán.	107
Figura VI.21. <i>Inicio de estación</i> . Distribución anual de la variable.	111
Figura VI.22. <i>Fin de estación</i> . Distribución anual de la variable (eje de ordenadas de los histogramas en número de píxeles).	112
Figura VI.23. <i>Longitud de estación</i> . Distribución anual de la variable (eje de ordenadas de los histogramas en número de píxeles).	113
Figura VI.24. <i>Mitad de estación</i> . Distribución anual de la variable (eje de ordenadas de los histogramas en número de píxeles).	114
Figura VI.25. <i>Mínimo</i> . Distribución anual de la variable (eje de ordenadas de los histogramas en número de píxeles).	115
Figura VI.26. <i>Máximo</i> . Distribución anual de la variable (eje de ordenadas de los histogramas en número de píxeles).	116
Figura VI.27. <i>Amplitud</i> . Distribución anual de la variable (eje de ordenadas de los histogramas en número de píxeles).	117
Figura VI.28. <i>Derivada Izquierda</i> . Distribución anual de la variable (eje de ordenadas de los histogramas en número de píxeles).	118
Figura VI.29. <i>Derivada derecha</i> . Distribución anual de la variable (eje de ordenadas de los histogramas en número de píxeles).	119
Figura VI.30. <i>Integral larga</i> . Distribución anual de la variable (eje de ordenadas de los histogramas en número de píxeles).	120
Figura VI.31. <i>Integral corta</i> . Distribución anual de la variable (eje de ordenadas de los histogramas en número de píxeles).	121

VI.32. Variables climatológicas (temperatura diaria observada, promedio mensual y precipitación acumulada mensual) y valores de LAI promedio mensuales de cada grupo de vegetación estudiado.....	122
Figura VI.33. Gráfico de Pareto con la varianza contenida por cada componente y la variable acumulada.....	124
Figura VI.34. Mapas CYLC1999-2006 obtenidos para el área de estudio. Las áreas sin color dentro del mapa corresponden a las zonas sin información fenológica debido a problemas de huecos o bien a objetos sin fenología (cuerpos de agua y zonas urbanas).....	125
Figura VI.35. Frecuencias de moda en la asignación de clase para cada pixel. Las áreas sin color dentro del mapa corresponden a las zonas sin información fenológica debido a problemas de huecos o bien a objetos sin fenología (cuerpos de agua y zonas urbanas).....	126
Figura VI.36. Composición por clases en número de pixeles para cada mapa anual.	127
Figura VI.37. Frecuencia de clasificación de cada pixel en cada clase.	128
Figura VI.38. Distribuciones de la frecuencia promedio de la moda para los pixeles identificados como sospechosos de cambio en la clase BHP. Permanentes e intermitentes.....	129
Figura VI.39. Pixeles de cambio de bosque de coníferas a otra categoría entre el periodo 2000-2006	130
Figura VI.40. Área de 2km marcada por el borde de la clase Cultivos y los pixeles de cambio.....	132

INDICE DE CUADROS

Table VI.1. CONABIO original (L0) and merged (L1) legends. The numbers assigned to the L1 merged legends (#) were selected to agree with those of other classifications.	24
Table VI.2. Area distribution of the 6 classification maps investigated (%). Empty cells correspond to specific legends not represented in the considered classification. B. Broadleaved, D. Deciduous, E. Evergreen, F. Forest, G. Grassland, N. Needleleaf, S. Shrubland.....	27
Table VI.3. Correspondence between the original and the proposed merged legends. Dark grey cells correspond to semantic assignment criterions; light grey cells correspond to spatial assignment criterions. B. Broadleaved, D. Deciduous, E. Evergreen, F. Forest, G. Grassland, N. Needleleaf, S. Shrubland.	30

Table VI.4. Area distribution (%) for the 6 classifications considered using the 6 unified classes. BLF: Broadleaf Forest; NLF: Needleleaf Forest; CL: Cropland; GL&SL: Grassland & Shrubland; UR: Urban; WB: Water Bodies..... 32

Table VI.5. Values of overall accuracy (Oa) for pairs of classifications based on the unified legend. Confidence intervals at 95% probability are indicated between parenthesis..... 33

Table VI.6. Confusion matrix computed over the merged legend for the 5 global and the reference regional CONABIO land cover maps. Values are expressed in percentage (%) of the total number of pixels in the area. Values in the diagonal corresponding to an agreement with CONABIO's classification are in bold italics. Classes omitted and committed are highlighted with grey colors (values higher than that in the diagonal cell). BLF: Broadleaf Forest; NLF: Needleleaf Forest; CL: Cropland; GL&SL: Grassland & Shrubland; UR: Urban; WB: Water Bodies. 34

Table VI.7. User's (Ua, right value) and producer's (Pa, left value) accuracy for the 6 unified legends and for each of the 5 global classification maps with respect to CONABIO's regional classification map. BLF: Broadleaf Forest; NLF: Needleleaf Forest; CL: Cropland; GL&SL: Grassland & Shrubland; UR: Urban; WB: Water Bodies. 34

Cuadro A1.1. Principales características de los mapas empleados. * Número de clases empleadas en Michoacán/ Numero de clases empleadas para todo el globo.43

Cuadro A.VI.1.3.1. Número de objetos en las 6 clasificaciones consideradas, empleando la leyenda unificada..... 48

Cuadro VI.1. Leyenda original del mapa del INF2000 y el esquema de simplificación empleado. 60

Cuadro VI.2. Variables obtenidas por TIMESAT sobre una serie de tiempo 65

Cuadro VI.3. Factores obtenidos para la construcción de los 5 primeros componentes principales de las variables originales, en negrita, el mayor coeficiente y sus correspondientes variables 79

Cuadro VI.4. Matriz de confusión entre el mapa INF2000 y el mapa CYCL2000. 82

Cuadro VI.5. Precipitaciones mensuales promedio de todas las estaciones en el estado de Michoacán (mm)..... 105

Cuadro VI.6. Promedios mensuales y promedio anual de las temperaturas diarias para el estado de Michoacán (grados centígrados)..... 106

Cuadro VI.7. Coeficientes obtenidos para calcular los componentes principales, en negritas los factores con mayor participación en la varianza 123

Cuadro VI.8: Resumen de la validación de los píxeles de cambio bajo un enfoque borroso 131

Cuadro VI.9. Resumen de la validación de los píxeles de no cambio bajo un enfoque borroso 131

ABREVIACIONES/ABREVIATIONS

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

CEOS: Comité de Satélites de Observación de la Tierra/ Committe on Earth Observing Satellites.

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

CONABIO: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad/ National Commission for the Knowledge and Use of Biodiversity

CONAGUA: Comisión Nacional del Agua/ National Comission of Water

CONAFOR: Comisión Nacional Forestal/ National Forestry Commission

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

ESA: Agencia Espacial Europea/ European Spatial Agency

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación/ Food and Agriculture Organization of the United Nations

Fcover: Fracción de cobertura de vegetación/ Fraction of vegetation cover

fAPAR: Fraccion de radiación fotosintéticamente activa absorbida/ Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation

GEO: Grupo de Observaciones de la Tierra/ Group on Earth Observations.

GEOSS: Red Mundial de sistemas de observación de la tierra/ Global Earth Observation System of Systems.

GLC2000: Cobertura Terrestre global 2000/ Global Land Cover 2000

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

GOF-C-GOLD: Observación Mundial de la Dinámica de la Cobertura Forestal y la Tierra/ Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics

UMSNH: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

IGBP: Programa Internacional Geósfera-Biosfera/ International Geosphere-Biosphere Programme

INE: Instituto Nacional de Ecología/National Institute of Ecology

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

INF2000: Inventario Nacional Forestal 2000/ National Forestry Inventory 2000

INRA: Instituto Nacional de investigación agrícola/ Institute National pour la recherche agronomique

LAI: Índice de área foliar/ Leaf area index

MODIS: Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada/ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

NDVI: Índice Normalizado de Vegetación/ Normalized Difference Vegetation Index

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

SEMARNAT: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales/ Ministry of Environment and Natural Resources.

SEMAR: Secretaría de Marina/ Ministry of Navy

SPOT: Sistema para la observación de la tierra/ Système pour l'observation de la Terre.

UMd: Universidad de Maryland/ University of Maryland

UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México/ National Autonomous University of Mexico

I. RESUMEN GENERAL

Los procesos de deforestación y los problemas derivados, como el cambio climático la erosión y la pérdida de productividad de los suelos, la escasez de alimentos, afectan el balance de los sistemas naturales y tienen una influencia más directa en la habitabilidad del planeta. De ahí el creciente interés por desarrollar estrategias de monitoreo de las superficies naturales a nivel global. Desde 1946 la FAO ha llevado a cabo evaluaciones constantes de la deforestación mundial valiéndose de la información que cada uno de los países miembros le proporciona; sin embargo, no es posible establecer un grado de certeza, ya que cada país miembro utiliza su propia metodología para reportar sus datos

Recientemente se han realizado intentos de cartografía global, para contribuir a la evaluación y seguimiento de las superficies vegetales del planeta. Su exactitud a nivel local puede ser muy variable. En la primera parte del trabajo se buscó contribuir a la validación de los mapas globales para el caso particular del estado de Michoacán, México. Para ello se compararon cinco mapas globales con uno de referencia (el mapa de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad de México), tomando como criterio la consistencia de área y la espacial. La comparación se realizó primero respetando las leyendas originales y después considerando una leyenda unificada con seis clases generales. En el primer caso se observaron incoherencias, debidas en parte a las diferencias en los sistemas de nomenclatura y a los criterios de clasificación. Con la leyenda unificada, la exactitud global entre los mapas varió de 9% hasta 62%. Sólo 2% de los píxeles coincide en 4 mapas (ciudades y agua principalmente) y el 88% coincide en 2 ó 3 mapas. La separación de las zonas agrícolas de otros tipos de vegetación natural fue el principal problema. Los mapas más recientes, basados en la nomenclatura propuesta por la FAO, fueron los más exactos.

En la segunda parte del trabajo, se construyó un mapa de cobertura del estado de Michoacán a partir de la serie LAI CYCLOPES del año 2000 y un mapa de referencia local. Se consideraron cinco clases generales de vegetación: bosque de coníferas, bosque mixto, bosque de hoja ancha, cultivos y pastizal-matorral. Para

cada pixel, se extrajeron once las variables fenológicas a partir de los valores de LAI, con el programa TIMESAT. Para cada variable se realizó un análisis comparativo del comportamiento para cada tipo de vegetación. Se constató que el comportamiento caducifolio o perennifolio es la característica que permite separar las diferentes clases, desde un punto de vista fenológico, por lo que se estableció la leyenda: bosques de hoja perenne (de coníferas y mixtos), bosques de hoja caduca (de hoja ancha), cultivos y pastizal-matorral. Se propuso una metodología para construir un mapa de vegetación a partir de la información fenológica. El mapa construido (CYCL2000) se comparó con el de referencia (INF2000), tomando como criterios la exactitud total, de usuario y del productor. Los resultados fueron modestos. Se obtuvo una exactitud total del 62.99%. Los bosques de hoja caduca fueron los mejor identificados, con una exactitud del productor del 80.09% y una exactitud del usuario del 62.1. Los bosques de hoja perenne, importantes en este estudio por su relación con la deforestación, presentaron una exactitud del productor del 74.07% y del usuario del 69.89% y los cultivos obtuvieron una exactitud del productor del 62.93% y del usuario del 61.07%.

En la tercera parte del trabajo se analizó la serie completa disponible de datos LAI del proyecto CYCLOPES (1999-2007). Se calcularon las 11 variables fenológicas de cada pixel para cada año con el algoritmo TIMESAT. La variación interanual de cada variable se analizó con respecto a algunas variables ambientales generales (promedios mensuales de precipitación y temperatura), con el fin de establecer cuáles son las más dependientes de factores externos. Se realizó análisis de componentes principales para determinar las que contienen la mayor cantidad de información. Se distinguieron las variables *Mínimo de LAI*, *Derivada derecha* y *Derivada izquierda*, caracterizadas por presentar una clara dependencia con la condición caducifolia o perennifolia de la vegetación. Se propuso una metodología para construir mapas de cobertura anuales, a partir de un mapa de referencia (INF2000), considerando los principales tipos de vegetación (bosque de hoja perenne, bosque de hoja caduca, cultivos y pastizal-matorral). Se buscó que los mapas fueran comparables entre sí. La comparación de los mapas obtenidos entre sí, año con año, permitió identificar las tendencias generales de cada tipo de

cobertura; en particular se constató la disminución de la superficie de bosque de hoja perenne. Se identificaron los píxeles de bosque de hoja perenne que cambiaron de clase en algún momento de la serie y quedaron en la nueva clase, con el fin de estimar la deforestación en el estado de Michoacán durante el periodo 2000-2006. En total se detecta una deforestación de 42,378 ha, de las cuales 13,249 ha pasan a bosque de hoja caduca y 29,129 ha a cultivos o a pastizal-matorral. Se realizó una validación con imágenes de mayor resolución (Landsat para 2000 y SPOT para 2006), sobre una muestra de 10% de los píxeles de cambio. La proporción de aciertos fue del 71% incluyendo los casos más ambiguos, y del 42% sin considerarlos. El 84% de los píxeles de cambio se encuentra dentro de un área de 2 km alrededor de la clase cultivos, lo que se puede explicar por el gran tamaño de los píxeles, en comparación con la heterogeneidad de la zona de estudio, si bien también puede estar relacionado con el hecho de que las zonas cercanas a las actividades humanas son más susceptibles de sufrir cambios.

II. SUMMARY

Deforestation processes and their negative consequences such as climatic change, soil erosion and loss of productivity and food scarcity, compromise the balance of natural systems and amplify their effect on the planet's habitability. Therefore, there is an increasing interest for developing worldwide monitoring strategies of natural areas. Since the year 1946, FAO has led a constant evaluation program of global deforestation based on information contributed by member countries; however, it has been impossible to establish a certainty level for these assessments given that each member country uses their own methodology.

Recent attempts have been made for achieving a global cartography to contribute to the evaluation and monitoring of the planet's vegetated areas, but exactitude levels vary considerably. In the first part of the present work an effort is made to contribute to the validation of global land cover maps for the state of

Michoacan, Mexico. To that means, five global maps and one national reference map (of the National Commission for Knowledge and Use of Biodiversity of Mexico) were compared using as criteria the surface and spatial consistencies. The comparison was first made with the original legends, later adopting a unified legend with six general classes. In the former case, inconsistencies were observed, in part due to differences in nomenclature systems and classification criteria. Using the unified legend, the overall exactitude between maps ranged from 9% to 62%. Only 2% of the pixels agree in four (mainly, urban areas and water bodies) and 88% agree in two or three of the compared maps. The main problem encountered was discrimination between croplands and natural vegetation types. More recently elaborated maps based on the FAO nomenclature were the most precise.

In the second part, a land cover map of the state of Michoacan was constructed based on the LAI CYCLOPES series for the year 2000 and on a local reference map. Five general vegetation types were considered: needleleaf forest, mixed forest, broadleaf forest, cropland and grassland-shrubland. For each pixel, eleven phenological variables were extracted from the LAI values using the TIMESAT algorithm. For each phenological variable a comparative analysis was made of the behavior of each vegetation type. It was corroborated that, from a phenological perspective, the deciduous or perennial behavior is the characteristic that allows for discrimination between classes. In consequence, the following legend was established: evergreen (needleleaf and mixed) forest, deciduous (broadleaf) forest, cropland and grassland-shrubland. A methodology was proposed for building a vegetation map based on phenological information. The resulting map (CYCL2000) was compared with the reference map (INF2000) using as criteria the overall, producer's and user's accuracies. The results were modest. An overall accuracy of 62.99% was obtained. The better identified vegetation type was deciduous forest with a producer's accuracy of 80.09% and a user's accuracy of 62.1%. Evergreen forests, of relevance to the present work because of their relation to deforestation processes, had a producer's accuracy of 74.07% and a user's accuracy of 69.89%, while cropland had a producer's accuracy of 62.93% and a user's accuracy of 61.07%.

In the third part of the present work the complete available series of LAI data of the CYCLOPES (1999-2007) project was analyzed. The eleven phenological variables were calculated for each pixel using the TIMESAT algorithm. The interannual variation of each variable was analyzed relative to some general environmental variables (monthly averages of precipitation and temperature) in order to determine which variables are more dependent to external factors. A principal component analysis was made to establish which variables contain the largest amount of information. The variables Minimal LAI, Right derivative and Left derivative were distinguished for their clear dependency with the deciduous-perennial character of the vegetation. A methodology was proposed for building annual land cover maps from a reference map (INF2000) taking into account the main vegetation types (evergreen forest, deciduous forest, cropland and grassland-shrubland). Attempts were made for making maps comparable. Cross comparison of the obtained maps by year allowed for the identification of general trends for each land cover class; in particular, the diminishing of the surface covered by evergreen forests was corroborated. The pixels of evergreen forest that were converted to a different class at a given time in the series were identified in order to assess the extension of the deforestation in the state of Michoacan during the 2000-2006 time period. Overall, needleleaf forest loss was detected in 42,378 ha, of which 13,249 ha were converted to broadleaf forest and 29,129 ha to cropland or grassland-shrubland. A validation was made on a sample with 10% of the converted pixels using higher resolution images (Landsat for the year 2000 and SPOT for 2006). The proportion of agreement was of 71% when including the most ambiguous cases, and of 42% when these were excluded. 84% of the converted pixels are concentrated in an area within 2 km from cropland borders, which may be accounted for by the large size of pixels relative to the heterogeneity of the study zone; although such result may also be related to the higher susceptibility to experience changes of those areas located near human activities.

III. INTRODUCCIÓN GENERAL

Contexto internacional

Los procesos de deforestación y cambio de uso de suelo ocupan muchos esfuerzos de investigación a todos los niveles (Watson *et al.*, 2000), ya que los bosques tienen un papel vital en el balance de los sistemas naturales (Sharma and Rowe, 1992). Entre los problemas asociados a la pérdida de bosques están el cambio climático (Ordoñez and Masera, 2001), la erosión y la pérdida de productividad de los suelos (Fen-Li, 2005), la escasez de alimentos, el aumento en el riesgo por eventos naturales atípicos (Wisner *et al.*, 1994), entre otros. Los cambios en la cobertura de suelo son el elemento de mayor peso en estos cambios globales (Turner II *et al.*, 1994) y probablemente tienen una influencia más directa en la habitabilidad del planeta, que el cambio climático por sí solo. Por lo anterior, es importante desarrollar estrategias de monitoreo de las superficies naturales del planeta a nivel global (Skole *et al.*, 1997). (Lambin *et al.*, 2003).

Desde 1946 la FAO ha llevado a cabo evaluaciones constantes de la deforestación mundial valiéndose de la información que cada uno de los países miembros le proporciona (Ridder, 2007). Así, reporta que la deforestación fue de casi 9 millones de hectáreas por año en el periodo 1990-2000, y alcanzó 7 millones de hectáreas por año en el periodo 2000-2005 (FAO, 2009). De acuerdo a datos reportados por CONAFOR a la FAO, México es el único país en Norteamérica que sigue reportando altas tasas de deforestación: 348 mil hectáreas por año para el periodo 1990-2000 y 260 mil por año para el periodo 2000-2005, mientras que Canadá ha mantenido invariable su superficie forestal y los Estados Unidos la ha incrementado, gracias al establecimiento de plantaciones forestales (FAO, 2009). En los anuarios publicados por la FAO es posible comparar cifras y establecer los cambios entre categorías gruesas de uso de suelo y vegetación; sin embargo, no es posible establecer un grado de certeza, ya que cada país miembro utiliza su propia metodología para reportar sus datos (Running *et al.*, 1999).

En este contexto, es necesario contar con información objetiva, confiable y global sobre los recursos naturales y desarrollar sistemas de seguimiento de los cambios de la cobertura vegetal a nivel mundial (Lambin and Geist, 2001). También es importante incentivar la realización de estudios locales, además de mejorar la coordinación a diferentes niveles (Herold *et al.*, 2009), buscando establecer estándares que lleven a la adopción de las mejores prácticas en el uso de la información disponible (Fox *et al.*, 2008).

Las imágenes obtenidas por los satélites de observación de la Tierra son, en muchos sentidos, el único medio para evaluar los cambios de cobertura en grandes áreas del planeta (Jensen, 2000). El rápido avance tecnológico que ha caracterizado a las últimas décadas, así como el abatimiento de los costos de distribución y almacenamiento de la información, han abierto una gran cantidad de posibilidades en el campo de la teledetección aplicada al seguimiento de cambios en la cobertura terrestre (Rogan and Chen, 2004), convirtiendo a esta herramienta en un valioso elemento para estudios ecológicos (Paruelo, 2008).

La comparación de imágenes de diferentes fechas permite detectar y plasmar en mapas los cambios en un periodo de tiempo, sean estos producto de desastres naturales o inducidos por las actividades humanas (Colditz, 2007), (Verbesselt *et al.*, 2010), para esto se han desarrollado varias técnicas y distintos enfoques de análisis (Desclée *et al.*, 2006). La alta frecuencia temporal de adquisición de imágenes de algunas plataformas espaciales, permite construir series de tiempo para llevar a cabo trabajos de monitoreo y realizar estimaciones de variables biofísicas de interés (Lambin, 1999). Esto abre la posibilidad de estudiar la dinámica de la cobertura terrestre con nuevas herramientas (Bontemps *et al.*, 2008) y caracterizar funcionalmente a los ecosistemas (Lambin *et al.*, 2003).

En 1981 sensores AVHRR a bordo de los satélites meteorológicos de la familia NOAA, comenzaron a tomar sistemáticamente imágenes la superficie de la tierra con una alta frecuencia temporal (Tucker *et al.*, 2005). Estas imágenes constituyen la primera fuente de datos para la construcción de series de tiempo (Eidenshink and Faudeen, 1994). La siguiente generación de sensores como SeaWiFS, puesto en órbita en 1997 (McClain *et al.*, 2004), SPOT VEGETATION

en 1998 (Fraser *et al.*, 2000), MODIS a finales de 1999 (Wolfe *et al.*, 2002) y MERIS en 2002 (Goryl and Huot, 2003) (estos dos últimos con una mejor resolución espacial), han enriquecido el acervo de información e impulsado la investigación en el área del análisis de las series de tiempo derivadas. Para algunas regiones del mundo, la combinación de datos AVHRR de los satélites NOAA y SPOT-VEGETATION han permitido crear series que van desde 1985 hasta el 2006, con el propósito del monitoreo de las dinámicas de la vegetación (Swinnen and Veroustraete, 2008). De esta manera, en las últimas tres décadas, los sensores remotos han evolucionado hasta convertirse en poderosas herramientas para el monitoreo de los ecosistemas, con la mayor parte de la investigación hecha preponderantemente en los ecosistemas templados y boreales, y con menos experiencias en las regiones tropicales y neotropicales (Sánchez-Azofeifa *et al.*, 2003).

La mayor parte de las series de tiempo se construye a partir de índices de vegetación (el más utilizado es el NDVI), en lo cual las imágenes NOAA-AVHRR han tenido un desempeño destacado, pues han permitido la construcción de mapas globales de cobertura terrestre (Loveland *et al.*, 2000), la estimación de áreas herbáceas y leñosas (Roderick *et al.*, 1999) e incluso la identificación y monitoreo de cultivos, en donde las condiciones del terreno lo permiten (Jakubauskas *et al.*, 2002), (Salam and Rahman, 2010).

Con series de tiempo del sensor SPOT VEGETATION se han realizado experiencias interesantes en la categorización de tipos de vegetación, incluso en áreas ecuatoriales, en donde la alta cobertura de nubes resulta un obstáculo en esta labor (Vancutsem *et al.*, 2009). Con fuentes de datos de mejor resolución, como MODIS, se han podido llevar a cabo detecciones puntuales en fenómenos locales. Eklundh *et al.*(2009) estudia la defoliación por plagas en áreas forestales, a partir de compuestos de 16 días de índices de vegetación.

Con el transcurso del tiempo y como resultado de varias investigaciones y experiencias (Baret and Guyot, 1991), fueron señaladas algunas limitaciones con el uso del NDVI y otros índices de vegetación, por lo que muchos trabajos se enfocaron desarrollar estimaciones de variables biofísicas (Ganguly *et al.*, 2008) a partir de datos de series de tiempo. Los productos biofísicos permiten obtener

más información sobre procesos biológicos que se verifican sobre la superficie del planeta que los valores de reflectancia de las imágenes satelitales tradicionales o las fotografías aéreas, y son más estables que los índices de vegetación (Wang *et al.*, 2005).

El LAI, que se define como la mitad del área verde total del dosel (se considera sólo el haz de las hojas), por unidad de superficie de terreno (Weiss *et al.*, 2004), es una variable biofísica que refleja muy bien las interacciones entre la vegetación y los ciclos que se generan en la biósfera (Scurlock *et al.*, 2001). Los patrones fenológicos deducidos a partir del LAI han sido empleados en varios trabajos para identificar un amplio rango de tipos de vegetación (Wardlow *et al.*, 2007). Weiss (2007), cita al menos 6 diferentes series de tiempo de LAI para el año 2002, con diferentes niveles de cobertura y en periodos que iban de 1993 al 2007.

Cada tipo de vegetación tiene un patrón temporal de evolución que corresponde a su patrón fenológico (Lobo and Maisongrande, 2008) y es inducido por el ciclo solar anual (Sparks and Menzel, 2002). La definición de fenología considerada cambia ligeramente de la convencional, que se basa en observaciones *in situ*; sin embargo coincide en estudiar el crecimiento vegetal por ciclos anuales (Reed *et al.*, 2009a). Se ha encontrado también que estos patrones, a grandes escalas y baja resolución, son coherentes con la variación climática interanual, lo que tiene implicaciones para el estudio del cambio climático y la estabilidad de los ecosistemas (García *et al.*, 2001), (Lambin and Linderman, 2006). Esto permite estudiar a gran escala la dinámica estacional e interanual de la vegetación y abre nuevas posibilidades para el análisis y seguimiento de los fenómenos naturales y de los efectos de las actividades humanas sobre el entorno (White *et al.*, 2009), pues el entendimiento de la fenología de la vegetación y su variación espacio-temporal, es un requisito para poner en evidencia y predecir los cambios que vendrán en la dinámica de los sistemas terrestres (Jeganathan *et al.*, 2010).

El proyecto CYCLOPES

Reconociendo la naturaleza multidisciplinaria de los datos satelitales y la conveniencia de coordinar esfuerzos para promover el uso efectivo de los mismos, en 1984 se estableció el CEOS como el mayor foro internacional para la coordinación de los programas de satélites (Embleton and Kingwell, 1997). Desde 2003, a raíz de la *Conferencia Internacional sobre la Observación de la Tierra*, el CEOS se está constituyendo en el brazo espacial del GEO, acuerdo intergubernamental para organizar un programa de observación global (GEO/GEOSS). La contribución europea a este esfuerzo internacional es la iniciativa GMES, coordinada por la ESA y la Unión Europea, para dotar a Europa de medios de vigilancia del medio ambiente y de control de las políticas y de los tratados internacionales, a partir del desarrollo y la explotación de medios de observación espacial, junto con una red de medidas en el suelo (GEOLAND, 2009).

En el marco del GMES, se inició en 2004 el proyecto CYCLOPES, que ha permitido desarrollar productos biofísicos (LAI, fAPAR y Fcover) empleando algoritmos basados en redes neuronales aplicadas a compuestos de 10 días derivados del captor SPOT/VEGETATION, con resolución de 1 km y abarcando casi todo el planeta (Baret et al., 2007). Actualmente los productos de este proyecto cubren el periodo 1999-2007 (POSTEL, 2008) .

El proyecto GEOLAND-2, que inició en el 2007 como continuación de CYCLOPES, busca mejorar sus productos y extender la serie de datos al periodo 1982-1998, gracias al captor NOAA/AVHRR. Estos datos permitirán seguir retrospectivamente la evolución de los paisajes en el periodo 1982-2007 y evaluar los posibles cambios observados como efecto de las presiones combinadas del hombre y del clima. Aún más, con estos datos se podrán estudiar los ciclos climáticos y su efecto en la cobertura vegetal, lo que permitirá detectar tendencias de cambio, consecuencia de ciclos naturales o inducidos.

Debido a sus características, los datos CYCLOPES son una fuente de información sumamente interesante para el monitoreo de los cambios en la cobertura terrestre sobre zonas amplias (Garrigues *et al.*, 2008). Por tratarse de

variables biofísicas, presentan algunas ventajas sobre los índices de vegetación (Gobron *et al.*, 2006). Además es la primera vez que se pone a libre disposición del público información con un nivel de análisis superior al de las imágenes estándar y concatenada en periodos regulares de tiempo, en una sola fuente de datos.

Además de CYCLOPES, como menciona Weiss (2007), existen varias fuentes para obtener datos de LAI en series de tiempo. Las más ampliamente utilizadas son derivadas de los productos MODIS (Knyazikhin *et al.*, 1999), que se presentan con una resolución de 1 km en compuestos de 8 días, desde el año 2000 hasta la fecha. A partir de estos productos, actualmente se desarrollan múltiples investigaciones, tanto en el empleo de estos datos, como en el desarrollo a partir de estos, de productos mejorados (Xiao *et al.*, 2011) con aplicaciones en modelos climatológicos y sistemas de soporte de decisiones.

Contexto nacional y estatal

Para el caso de México, el INEGI es por ley la agencia dedicada a la tarea de generar información estadística y geográfica sobre la situación del país y de sus recursos naturales (INEGI, 2009). Eventualmente, dependiendo del contexto de trabajo, diferentes instancias, universidades, institutos, comisiones o empresas privadas, generan este tipo de datos, en coordinación con el INEGI.

En el ámbito forestal, la CONAFOR es la encargada de estudiar la deforestación en el país. Actualmente está desarrollando el *Sistema de Información Forestal*, que se nutre con datos recabados por distintos proyectos, resultado de los diferentes programas operativos de la misma comisión e información externa obtenida por instancias estatales o de consultoría (CONAFOR, 2009). Tradicionalmente, para el país, existe un gran desorden en las bases de datos generadas en cuanto a cobertura vegetal y tasas de deforestación asociadas (Mas *et al.*, 2009), producto en parte de la misma heterogeneidad de ecosistemas en el país, lo que dificulta calificar la calidad de la información, si bien se realizan esfuerzos en la estandarización de nomenclaturas y metodologías.

Existen pocas experiencias en la exploración de datos en series de tiempo para analizar cambios de cobertura o la construcción de cartas de vegetación. Trucotte (1993) empleando imágenes AVHRR y el concepto de vegetación clímax, identificó áreas de cambio de vegetación, encontrando la mayoría en las áreas con mayor actividad agrícola. Béjar (2004), en un ejercicio de evaluación empleando este mismo tipo de imágenes, encontró que la gran diversidad de ecosistemas dificultaba la obtención de mapas exactos, pero había mejoras al agrupar los tipos de vegetación similares y al eliminar del análisis las áreas de borde entre clases. Pompa (2008), empleó imágenes MODIS, pero fuera de un enfoque de serie de tiempo, para identificar áreas deforestadas en algunos sistemas montañosos del noroeste del país.

En el ámbito regional, Michoacán, es uno de los pocos estados a nivel nacional que han tratado de desarrollar trabajos de seguimiento e inventario de sus superficies forestales con recursos propios. Sin embargo, los costos asociados a este tipo de trabajos provocan que no se realicen de forma sistemática o periódica. Así, entre 1990 y 1995, la COFOM trabajó en la generación de un inventario forestal estatal a partir de fotografías aéreas y espacio-mapas; nuevamente en 2007, se inició la actualización del inventario con el levantamiento de 800 puntos de muestreo en campo, la toma de numerosas fotografías aéreas y la interpretación de imágenes satelitales SPOT (CONAFOR, 2009).

El estudio más detallado realizado hasta ahora sobre la dinámica de cambio en el estado fue desarrollado por la UNAM para el año 2000. Este trabajo estimó una tasa anual de deforestación para bosques y selvas de 1.8% y 1% respectivamente, lo que representa una pérdida de aproximadamente 46 mil ha/año de superficies arboladas. Los cambios más importantes se dieron en regiones con una débil presión humana, alejadas de las grandes zonas urbanizadas, lo que sugiere una falta de manejo que integre y armonice actividades forestales, agrícolas y pecuarias (Bocco *et al.*, 2001).

El proyecto se basó en espaciomaps generados por el INEGI a partir de imágenes Landsat TM, a escala 1/250,000. Su interpretación se hizo de manera visual utilizando los atributos estándar en la fotointerpretación (tono, color,

textura, tamaño, forma, emplazamiento) y realizando una verificación en campo de los resultados. La aplicación de estos métodos, sobre grandes espacios representa un trabajo muy arduo y puede eventualmente comportar una parte de incertidumbre en función del operador. Este trabajo, sin embargo, permitió realizar una cartografía muy completa del estado de Michoacán que sirve como referencia de la situación de los recursos forestales en las últimas décadas. La reactualización de este mapa para dar seguimiento al proceso de deforestación supondría un trabajo considerable.

Planteamiento del trabajo

El presente trabajo de investigación busca explorar el potencial de las nuevas series de datos de teledetección disponibles a nivel global, para estudios en un ámbito regional. En particular se busca analizar la capacidad de los datos CYCLOPES para caracterizar el uso del suelo y su evolución en el estado de Michoacán, poniendo énfasis en el seguimiento de los procesos de deforestación en los bosques de clima templado. Con este trabajo se contribuye además a la labor de validación de esta nueva fuente de datos, utilizando información local y buscando enriquecer la visión de la dinámica estacional e interanual de la cobertura terrestre.

De las variables biofísicas generadas por el proyecto CYCLOPES, en este trabajo se estudia el índice de área foliar, dado que, por su potencial para describir patrones fenológicos dentro de una serie de tiempo, permite buscar cambios en la cobertura terrestre causados por eventos naturales, variaciones climáticas o bien causas antropogénicas (Baret *et al.*, 2007).

Alcance del trabajo

Las series de tiempo presentan muchas ventajas sobre las imágenes en una sola fecha, al permitir abordar el estudio de las superficies naturales desde un enfoque fenológico. Por el momento presentan el inconveniente de su baja resolución espacial, y son todavía cortas. Sin embargo pueden consolidar en el futuro, como una poderosa herramienta de los datos satelitales y se están consolidando como la principal herramienta para los estudios de cambio y el

monitoreo de las superficies naturales. De ahí el interés de analizar su potencial y comenzar a desarrollar metodologías para su utilización.

La serie CYCLOPES es muy reciente y aún no ha sido utilizada en trabajos publicados. Sin embargo, por sus características y su calidad, existe la seguridad de que tendrá numerosas aplicaciones. Así mismo, se tiene la garantía de que se seguirá generando y se mantendrá de libre acceso.

La idea de los creadores del proyecto CYCLOPES es lograr que se generalice la utilización de la serie de datos, como herramienta para el monitoreo permanente de los cambios en la cobertura terrestre, con el fin de asegurar la actualización constante de las estadísticas de deforestación a nivel global. Eso requiere del desarrollo de metodologías que sean fáciles de utilizar y adaptables a cualquier entorno, para lo cual deben considerar únicamente los tipos de vegetación más elementales y requerir poca supervisión y pocos datos de entrada, ya que en muchos casos no van a existir o no tendrán la exactitud o confiabilidad necesarias.

Una metodología con estas características, como la propuesta en este trabajo, es más probable que se adopte, dentro de una estrategia de monitoreo permanente, ya sea por parte de instancias internacionales que busquen resultados confiables y homogéneos a nivel global, o por instancias relacionadas con el sector forestal a nivel local o regional en cualquier lugar del planeta.

Esta metodología propuesta se aplicaría en una primera fase de *detección de zonas de riesgo* y, si existe la posibilidad, se podría implementar una segunda fase, de *verificación o detección precisa*, con la utilización de imágenes de alta resolución y/o datos de campo. Como el análisis de imágenes de alta resolución es muy complejo, en la práctica se limita, en la mayoría de los casos, a la interpretación visual. Esto garantiza, de alguna manera, resultados más exactos, pero no resulta ágil ni fácilmente repetible, por lo que resulta ineficiente y normalmente imposible aplicarlo de manera general a territorios extensos. Sin embargo, sí se podría aplicar a zonas previamente detectadas como sospechosas de cambio. De ahí la ventaja de aplicar un procedimiento de en dos

fases: una automática, de detección, y si se tiene la posibilidad, otra más manual, de confirmación.

En la metodología propuesta en este trabajo se consideran únicamente 4 clases generales de cobertura vegetal: bosque de coníferas (pino o pino-encino, en la parte final del trabajo, por su patrón fenológico será llamado bosques de hoja perenne), bosque de hoja ancha (bosques de hoja caduca), cultivos y matorral-pastizal. Se utiliza como apoyo un mapa local, de exactitud confiable, generado con imágenes de alta resolución y datos de campo y es suficiente con este mapa para analizar una serie de 9 años, lo cual corresponde en general al tiempo de actualización de los inventarios forestales nacionales.

IV.HIPÓTESIS

IV.1 Hipótesis general

La serie de tiempo de LAI del proyecto CYCLOPES permite detectar los cambios de cobertura en el estado de Michoacán.

IV.2 Hipótesis particulares

1. Los mapas de cobertura generados a nivel global con datos de baja resolución reflejan adecuadamente los diferentes tipos de vegetación en el estado de Michoacán.
2. Las variables fenológicas derivadas de la serie de tiempo de LAI del proyecto CYCLOPES permiten distinguir, con un nivel razonable de exactitud, los principales tipos de vegetación en el estado de Michoacán y construir mapas de cobertura.
3. La comparación de mapas anuales de cobertura derivados a partir de la variables fenológicas evidencia los cambios de cobertura.

V. OBJETIVOS

V.1 Objetivo general

Explorar el potencial de la series de datos LAI del proyecto CYCLOPES para caracterizar el uso del suelo y su evolución en el estado de Michoacán, poniendo énfasis en el seguimiento de los procesos de deforestación en los bosques de clima templado.

V.2 Objetivos específicos

1. Contribuir a la labor de validación de los datos CYCLOPES, utilizando información local.
2. Enriquecer la visión de la dinámica estacional e interanual de la cobertura terrestre.
3. Valorar la capacidad de los mapas globales para describir la cobertura vegetal del estado de Michoacán.
4. Establecer una leyenda con los grupos de generales de vegetación para generar que en mapas a partir de datos de baja resolución espacial.
5. Explorar la capacidad de los datos fenológicos contenidos en la serie LAI de la serie CYCLOPES, para distinguir los principales tipos de vegetación en el estado de Michoacán.
6. Proponer una metodología para construir mapas anuales de cobertura a partir de los datos LAI de la serie CYCLOPES y un mapa local de referencia.
7. Identificar las áreas de cambio de cobertura en el estado a partir de la comparación de mapas anuales.

VI.RESULTADOS

El trabajo se realizó en tres etapas, que corresponden a tres capítulos (o artículos):

Etapa 1. Identificación de los principales tipos de paisajes a partir de datos de resolución espacial media disponibles en proyectos a nivel global.

En esta etapa se compararon 5 mapas de cobertura terrestre generados a nivel global (Universidad de Maryland (UMd), Global land cover characterization versión 2 (IGBP), MODIS, GLC2000 y GLOBCOVER) para evaluar la congruencia de las clases de cobertura detectadas por medios automáticos con imágenes con una resolución de pixel entre 300 m y 1 km. Se utilizó como referencia el mapa de cobertura terrestre generado a nivel nacional por CONABIO. El objetivo fue establecer las clases generales de vegetación que se puede esperar detectar en la zona de estudio con datos de baja resolución. Esta etapa se realizó durante una estancia en Aviñón, Francia con el Dr. Frédéric Baret, en el marco de una beca mixta otorgada por el CONACYT. Se generó un artículo titulado: "Consistency between global and regional land cover maps in the state of Michoacan, Mexico", aceptado para su publicación en la revista *Chapingo, Serie Forestal y del Medio Ambiente* en el Vol. XVII No. 3- 2011.

Etapa 2: Estudio fenológico de los principales tipos de vegetación del estado de Michoacán a partir de los datos LAI de la serie CYCLOPES para año 2000.

Los datos de la serie CYCLOPES del año 2000 correspondientes al área de estudio se analizaron con el algoritmo TIMESAT, para obtener las características fenológicas de las clases generales de vegetación, según la distribución espacial del mapa generado para el mismo año para el Inventario Nacional Forestal de CONAFOR, verificado ampliamente con datos de campo INF2000, que se tomó como referencia en una versión simplificada. A partir de la información fenológica se construyó un mapa de vegetación, CYCL2000, que se comparó con el mapa de referencia, con el objetivo de evaluar el nivel de

exactitud que se puede esperar de la información de cobertura generada a partir de los datos CYCLOPES.

Etapa 3. Identificación de áreas de bosque de clima templado deforestadas en el estado de Michoacán para el periodo (2000-2006).

En esta etapa se propone una metodología para generar mapas anuales de las clases de vegetación generales, a partir de los datos CYCLOPES (1999-2007) y el mapa de referencia (INF2000). El resultado es un conjunto de 8 mapas, correspondientes al periodo 1999-2006, que se comparan para detectar los píxeles sospechosos de haber sufrido un proceso de deforestación, entendido éste como el cambio de bosque a otra clase de cobertura. Los píxeles detectados se verificaron empleando el mosaico CIRCA 2000 compuesto de imágenes Landsat TM, de 15m de resolución, e imágenes SPOT de 2006, de 10m ó 20m de resolución, en un ejercicio de validación del método propuesto.

VI.1 CAPITULO I. Consistencia entre mapas globales y un mapa regional en el estado de Michoacán, México.

En este capítulo se aborda la tipología de paisajes en el estado de Michoacán. Para ello comparan los resultados de los diferentes proyectos de clasificación global de uso de suelo y vegetación, obtenidos utilizando imágenes de resolución media (de 300 m a 1 km de resolución), con el fin de buscar las consistencias entre las clases y evaluar la dificultad a esa escala para discriminar las distintas coberturas sobre el terreno. Los trabajos utilizados fueron los siguientes:

UMd (University Maryland) (1993)

IGBP-DISCover (1993)

GLC2000 (2000)

MODIS (2004)

GLOBCOVER (2006)

Esta parte del trabajo fue desarrollada durante una estancia en el INRA de Aviñón con el Dr Frédéric Baret y redactada en inglés. Se presenta en el formato en el que fue enviado a la revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente. Por cuestiones de espacio, se dejaron como anexos una serie de información y cálculos complementarios, que consisten en lo siguiente:

Anexo VI.1.1: Mapas con la leyenda original correspondientes al trabajo. Consiste en una figura donde es posible apreciar los mapas con la leyenda original para el área de estudio.

Anexo VI.1.2: Principales características de los proyectos. Se presenta un cuadro resumen con las características más relevantes de cada uno de los mapas empleados.

Anexo VI.1.3: Estimadores complementarios. Al comparar los distintos trabajos, se propusieron estimadores que, por razones de espacio, no fueron considerados en el artículo enviado, pero que aportan información complementaria interesante. Se evaluó la similaridad de los mapas desde un

enfoque de la fragmentación y complejidad visual. También se presenta una estimación de los cambios en la exactitud de los mapas al considerar el efecto del borde o de frontera entre clases.

La intención en el desarrollo del trabajo presentado en este capítulo, fue desarrollar elementos que permitieran contar con mayor información sobre los tipos de cobertura vegetal en el estado y el desempeño de datos provenientes de satélites de observación terrestre en el área de estudio con resoluciones de medias (300m) a gruesas (1km).

Consistency between global and regional land cover maps in the state of Michoacan, Mexico

VI.1.1 SUMMARY

For some years attempts have been made for constructing global maps using different types of images, methods and systems of nomenclature. These maps are difficult to validate and local-level accuracy can be very variable. The aim of the present study was to contribute to the validation of global land cover maps, comparing five of them for the particular case of the state of Michoacan, Mexico. The regional land cover map produced by the National Commission for Knowledge and Use of Biodiversity of Mexico was taken as reference, and consistency and spatial area as criteria. The comparison considering the original legends revealed inconsistencies, due in part to differences in classification systems. After a merged legend with six general classes was established, the overall accuracy between maps ranged from 9% to 62%. Only 2% of the pixels matched in 5 maps (mainly towns and water) and 88% agreed in 2 or 3 maps. The main problem is the discrimination between cropland areas and other kinds of vegetation. The more recent maps based on the nomenclature proposed by FAO had an increased accuracy, but not enough to consider them as appropriately detecting the main land covers. The use of global land cover maps in situations of great biodiversity must be adequately contextualized.

Key words: UMD, IGBP, MODIS, GLC2000, GLOBCOVER

VI.1.2 RESUMEN

Desde hace algunos años se han realizado intentos de cartografía global, para contribuir a la evaluación y seguimiento de las superficies vegetales del planeta. Estos mapas se construyeron utilizando diferentes tipos de imágenes, metodologías y sistemas de nomenclatura, por lo que son difíciles de validar y su exactitud a nivel local puede ser muy variable. El objetivo de este trabajo fue contribuir a la validación de los mapas globales, comparando cinco de ellos para el caso particular del estado de Michoacán, México. Se tomó como referencia el

mapa de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad de México y como criterios la consistencia de área y espacial. La comparación respetando las leyendas originales puso de manifiesto incoherencias, debidas en parte a las diferencias en los sistemas de nomenclatura y a los criterios de clasificación. Después se estableció una leyenda unificada con seis clases generales y la exactitud global entre los mapas varió de 9% hasta 62%. Sólo 2% de los píxeles coincide en 4 mapas (ciudades y agua principalmente) y el 88% coincide en 2 ó 3 mapas. El principal problema es la separación de las zonas agrícolas de otros tipos de vegetación natural. Se observó una mejor exactitud de los mapas más recientes, basados en la nomenclatura propuesta por la FAO, pero aún no suficiente para considerar que detectan adecuadamente los principales tipos de cobertura. El uso de mapas globales en situaciones locales de gran biodiversidad debe ser adecuadamente contextualizado.

Palabras clave: UMD, IGBP, MODIS, GLC2000, GLOBCOVER

VI.1.3 Introduction

Human activities have changed the face of the planet over the past centuries, even faster so since the industrial revolution. Climate change, desertification, deforestation, loss in biodiversity and, very recently, the scarcity of food resources and raw material production are some of the consequences of human activities that reciprocally induce strong constraints on their development. In an effort to support the design of environmental policies that help to mitigate or reverse the current trend, a number of regional, national and global initiatives have provided reports on global changes; an endeavor which requires highly precise information for understanding and modeling environmental modifications (Lambin and Geist, 2001). Satellite observations provide a comprehensive and frequent description of the earth surface that potentially can enhance the quality, internal consistency and reproducibility of information about global land cover and its change.

The first global land cover maps were developed at the University of Maryland (UMd) at a resolution of 1 degree (Defries and Townshend, 1994). Major improvements were achieved using products derived from the AVHRR

dataset, also developed at the University of Maryland (Hansen and Reed, 2000). At the same time, but using a different classification method, Loveland et al. (2000) within the International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) were developing the IGBP-DISCover global land cover map. A few years later –based on a legend similar to the one developed within the IGBP-DISCover classification– a new set of global 1 km data was derived from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) observations (Friedl *et al.*, 2002). Using observations of the VEGETATION sensor, the GLC2000 project derived another world map of land cover at a resolution of 1km (Bartholomé *et al.*, 2005) using the FAO land cover classification system nomenclature (LCCS) (Gregorio and Jansen, 2000). More recently, also based on the LCCS nomenclature, 300 m MERIS observations were used to produce a higher spatial resolution coverage map of the earth within the GLOBCOVER project (Bicheron *et al.*, 2006; Defourny *et al.*, 2006).

Obviously, there is a need to evaluate and compare these medium resolution (300 m to 1 km) global products. Hansen *et al.* (2000) compared the UMD land cover maps using existing high resolution maps derived from Landsat images. IGBP-DISCover (Scepan, 1999), MODIS (Morissette *et al.*, 2006) and GLC2000 (Mayaux *et al.*, 2006) were also validated using Landsat images. The validation of GLOBCOVER products has been recently completed (Defourny *et al.*, 2009) following the standards that were derived from previous exercises and that had been published under various formats (Muchoney *et al.*, 1999): a validation process in which the GOF-C-GOLD and CEOS played key roles in the standardization of methods.

GOF-C-GOLD and CEOS have proposed guidelines for improving the validation practices (Strahler *et al.*, 2006). One of the advised ways for better validation of global land cover maps is their comparison with existing national or regional maps derived from data having higher spatial resolution. However, the comparison between the various available global land cover products having approximately the same spatial resolution should only serve to produce complementary results. Such comparative exercise has been achieved between IGBP-DISCover and UMD products by Hansen and Reed (2000). To that means, the legends were aggregated into similar classes, after which comparisons were

made of total areas per class and of per-pixel consistency. Although area consistency was generally found at the aggregated classes level, significant discrepancies can be seen for the spatial distribution (per-pixel comparison). However, the diversity of definitions used for defining classes impacts both the total area and the spatial distribution, as was demonstrated for forests by Herold (2006). See and Fritz (2006) and, more recently, Fritz and See (2007) compared the MODIS and GLC2000 global maps using fuzzy statistics, which allowed to account for the known differences in legend definitions. The authors produced global disagreement maps that in some regions show hotspots of large discrepancies, which may be used to further investigate the nature of the problem and to propose methodological improvements.

The few regional land cover maps available for Mexico are based on different legend systems that sometimes present difficulties for their comparison (Velazquez *et al.*, 2008); however, a land cover map of Mexico that can be considered as fairly reliable was developed by the National Commission for Knowledge and Use of Biodiversity of Mexico (CONABIO), which was derived from the series II land cover map of the National Institute of Statistics and Geography of Mexico (INEGI). The land cover map of CONABIO was used as a reference for comparison.

The aim of the present study was to contribute to the assessment of global maps of Earth's surface in a particular region: the state of Michoacan de Ocampo (Michoacan), Mexico. This area was identified by Fritz and See (2007) as a hotspot of discrepancies between GLC2000 and MODIS products –probably due to the wide range of land cover types and patterns associated to its complex topography. Furthermore, the state of Michoacan –located between the Nearctic and the Neotropical regions– is one of the five Mexican states having most biodiversity (SEMARNAP, 1997). Emphasis was put on the comparison of the main available global land cover products, i.e., UMd, IGBP, MODIS, GLC2000 and GLOBCOVER, and on the CONABIO regional land cover map based on high spatial resolution data and local expertise.

VI.1.4 Materials and Methods

VI.1.4.1 The state of Michoacan

Michoacan is one of the Mexican states having a Pacific shore, located between 17° 54' and 20° 23' northern latitude and 100° 03' and 103° 44' western longitude, with a surface of 59,864 km². The topography of the state is very complex and comprises five large natural units: the Trans-Mexican Volcanic Belt (*Faja Volcánica Transmexicana*), the Sierra Madre del Sur, the coastal plain (*Planicie Costera*), the Balsas Depression and the Mexican plateau (*Altiplanicie Mexicana*). The elevation varies from 0 up to almost 4000 m.a.s.l. (Bocco et al., 2001). Climatic conditions are therefore contrasting: warm sub humid along the coast; warm and semi warm sub humid at the western face of the Sierra Madre del Sur with semi dry and very warm conditions in the lowlands and depressions; semi cold and sub humid in the Trans-Mexican Volcanic Belt; and warm to temperate in the highest areas. The combinations of altitudes and expositions strongly influence the distribution of vegetation.

The main types of vegetation encountered in Michoacan are (Inventario, 1995; González-Medrano, 2004):

- Forest with dominant pine or oak species.
- Low tropical dry deciduous forest with dominant species of *Bursera*, *Pithecellobium*, *Lysiloma* and *Lonchocarpus*.
- Subtropical shrubland with species of *Acacia*, *Opuntia*, *Fouquieria*, *Prosopis* and *Mimosa*.
- Agriculture, predominantly with avocado (*Persea americana*), sesame (*Sesamus indicus*), lemon (*Citrus limon*), maize (*Zea mays*), sorghum (*Sorghum bicolor*), beans (*Phaseolus vulgaris*) and wheat (*Triticum aestivum*).
- Grassland as secondary vegetation.

Global land cover classifications considered

VI.1.4.2 Global Land covers maps considered

Five available global classification maps at a spatial resolution between 300 m and 1 km were considered. The Lambert conformal conic projection used by

INEGI was selected as the reference projection system, applying a 1000 X 1000 m grid for resampling. These global land cover classifications are briefly described below.

University of Maryland (UMd). It is based on NOAA AVHRR data acquired during the time period from 1981 to 1994, using monthly maximum value composite of NDVI. The UMd legend agrees with the scheme proposed by IGBP-DISCOVER using 14 classes. The final product was downloaded from: <http://glcf.umiacs.umd.edu/data/landcover/>, with a geographic (Lat/Long) projection (Hansen et al., 2000).

Global Land Cover Characterization Version 2 (IGBP) of North America. It was based on the same AVHRR data set as the UMd classification but only for the time period from April 1992 to March 1993. The IGBP land cover classification was used to define the classes. The final product was downloaded from: <http://edc2.usgs.gov/glcc/>, with a Lambert Azimuthal Equal Area projection.

MODIS. It was derived from MODIS TERRA sensor data captured between January 2004 and December 2004. The MOD12Q1 Land Cover Classification product used 17 classes of land cover in the IGBP global vegetation classification scheme (Friedl et al, 2002). The final product was downloaded from: <http://edcdaac.usgs.gov/modis/mod12q1v4.asp>, with a Sinusoidal projection.

GLC2000. It was derived from the VEGETATION sensor with 1 km spatial sampling for the time period from November 1999 to December 2000. The year 2000 was considered as a reference for environmental assessment by the United Nation's Ecosystem-related International Conventions (Latifovic *et al.*, 2000). The classification resulted from the compilation of regional classification maps that were harmonized using 29 classes based on FAO's LCCS nomenclature. The final product was downloaded from: <http://www-gvm.jrc.it/glc2000/> with a geographic (Lat/Long) projection system.

GLOBCOVER. MERIS full spatial resolution (300 m) was used for the time period from December 2004 to January 2006. The globe was decomposed into 22 eco-regions for which specific rules derived from expert knowledge were used for automatic classification. The legend was based on the LCCS nomenclature with 25 classes. The final product was downloaded from: <http://postel.mediasfrance.org/fr/PROJETS/Pre-operationnels->

GMES/GLOBCOVER/, with geographic (Lat/Long) projection system.

The CONABIO regional land cover classification map

The CONABIO map in vector format at a 1:1,000 000 scale with a Lambert conformal conic projection is available for download from: <http://www.biodiversidad.gob.mx/region/geoinformacion.html>. In addition, different sources of data covering the 1990 to 1996 time period including Landsat images, aerial photographs and field information were also used. The classification was mainly based on photo interpretation techniques and the legend system was highly detailed (Miranda and Hernández, 1963; Rzedowski, 1978). A simplification of CONABIO's legend was thus proposed to increase the consistency with the five global classification legends considered. Merging the original CONABIO classes was driven by prior knowledge on the seasonal characteristics associated to vegetation types (Table VI.1). Therefore, in the present study only the resulting simplified (L1) land cover map was used.

Table VI.1. CONABIO original (L0) and merged (L1) legends. The numbers assigned to the L1 merged legends (#) were selected to agree with those of other classifications.

#	CONABIO L0	CONABIO L1
1	Oak forest	Evergreen broadleaf forest
	Mesophyll mountain forest	
	Forest gallery	
2	Deciduous and semi deciduous low tropical forest	Deciduous broadleaf forest
4	Coniferous forest other than pine	Evergreen needle forest
	Pine forest	
6	Evergreen and semi evergreen thorny seasonal low forest	Mixed Forest
	Semi evergreen and deciduous seasonal forest	
7	Tamaulipeco thorny and sub tropic shrubland	Shrubland
	Sarcocrasicaule shrubland	
9	Grassland	Grassland
	Flooded grassland	
	Halophyte and gipsofile vegetation	
11	Forestry (plantation) and farming land use	Croplands
12	Principal cities	Urban
14	Water bodies	Water
21	Prosopis spp. and Acacia spp. Shrublands	Woodland
	Palmer	
	Savanna	
27	Bare soil	Bare soil
32	Mangrove	Closed (>40%) broadleaved semi-deciduous and/or evergreen forest regularly flooded, saline water

VI.1.4.3 Metrics used

The metrics proposed for the comparison of land cover classification maps were derived from the GOF-C-GOLD (Strahler et al., 2006) guidelines for best practices in validation processes, which are mainly based on evaluation of area and spatial consistency. In addition, an agreement map was also investigated to locate places of agreement/disagreement among the classifications.

Area consistency. The first criterion to compare classifications with similar legends is based on the area extent of each class, regardless of the spatial distribution. This is achieved after transforming the original legends into a merged legend.

Spatial consistency. A confusion matrix (contingency table) was used to evaluate the spatial consistency for hard classifications (Rossiter, 1994). As advised by Strahler et al. (2006) and later by Liu et al. (2008), three main metrics derived from the confusion matrix are generally used to evaluate the spatial consistency between two maps. The overall accuracy (Oa) is computed as the percentage of pixels sharing the same legend. The two additional metrics are used to evaluate classification performances for individual classes (Congalton, 1991). For a given class, the producer accuracy (Pa) is the percentage of reference pixels successfully classified. Pa is linked to the omission error, i.e., the percentage of pixels incorrectly excluded from a particular class. Conversely, the user accuracy (Ua) is the percentage of pixels of the considered class in the map that are well classified according to the reference map. Ua is linked to the commission error, i.e., when a pixel is committed to an incorrect class.

Agreement map. Based on a merged legend, a map was generated where each pixel was assigned a value equal to the number of maps agreeing in the same class (McCallum *et al.*, 2006). The index of agreement ranges from 0 – where none of the global maps agree – to 5 when the 5 global maps are in agreement.

VI.1.4.4 Comparison methodology

A first comparison is performed according to the original legends of the studied maps. In a second stage, first a merged legend is proposed that is capable of collecting and replacing the original legends, after which an equivalent map with the merged legend is obtained for each of the studied maps. Finally, the comparison is repeated with the newly generated maps.

The herein proposed merged legend is based on the semantic approach used by Herold et al. (2009). For LCCS based maps this was facilitated by the hierarchical character of the classification. The aggregation process was eventually refined for scarce marginal classes and for cases in which semantic

assignment was not clear or it led to obvious errors considering their location. The semantic simplification process is complex and tedious and might lead to several possible solutions, depending on semantic interpretation and on the weight assigned to the semantic or spatial criteria used. However, the proposed merged legend allowed for a more rigorous and quantitative comparison.

VI.1.5 Results and discussion

VI.1.5.1 Comparison based on the original legends

The original number of classes used for Michoacan ranged from 12 (CONABIO L1, UMd) to 17 (GLOBCOVER). Compilation of legends from the original land cover classification resulted in 33 distinct classes (Table VI.2). Among them, only 8 classes were common, including the four main types of closed forest, the “Broadleaved evergreen shrubland,” “Grassland,” “Cropland,” “Urban” and “Water Bodies,” which represented from 27.8% (UMd), up to 85.2% (IGBP) of the total state's area. Conversely, 17 classes were specific to only one land cover classification, some of them corresponding to a large fraction of the area, such as “woody savannas” in the case of MODIS (48.6%). It was noticed that some marginally represented classes seemed to be erratic, such as the “wooded tundra” (0.07%) and “mixed tundra” (0.01%) classes of IGBP, which were unexpected in this temperate to tropical area.

Table VI.2. Area distribution of the 6 classification maps investigated (%). Empty cells correspond to specific legends not represented in the considered classification. B. Broadleaved, D. Deciduous, E. Evergreen, F. Forest, G. Grassland, N. Needleleaf, S. Shrubland.

#	Class name	Land Cover Maps					
		UMd	IGBP	MODIS	GLC2000	GLOBCOVER	CONABIO
1	Tropical or Sub-tropical B. E. F. - Closed Canopy	6.3	0.3	5.7	0.3	0.8	8.5
2	Tropical or Sub-tropical B. D. F. - Closed Canopy	2.7	3.2	5.8	3.3	57	26
3	Temperate or Sub-polar B. D. F. - Closed Canopy				7.2		
4	Temperate or Sub-polar N. E. F. - Closed Canopy	3.3	6.1	1.4	29.5	14	19
5	Temperate or Sub-polar N. E. F. - Open Canopy				0.4		
6	Temperate or Sub-polar Mixed B. or N. F.- Closed Canopy	1.3	26	14	13	5.6	2.4
7	Temperate or Sub-polar B. E. S. - Closed Canopy	2.2	46	0.4	0	1.5	3.9
8	Temperate or Sub-polar N. E. S. - Open Canopy	0		0.8	0.3		
9	Temperate or Subpolar G.	10	2.4	4.1	0.9	0.3	0.3
10	Temperate or Sub-polar G. with a Sparse Tree Layer		0.1		0		
11	Cropland	6.8	10	0.7	43.6	3	39
12	Urban and Built-up	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1
13	Consolidated Rock Sparse Vegetation				0.8		
14	Water bodies	1.8	0.6	2.2	0.6	0.8	1.2
15	Herbaceous Wetlands				0.01		
16	Wooded Tundra		0.1				
17	Mixed Tundra		0				
18	Dryland Cropland and Pasture		1.2				
19	Savanna		2.1	14			
20	Irrigated Cropland and Pasture		1.2				
21	Woodland	24					0.1
22	Wooded Grassland	42					
23	Deciduous needleleaf forest			0			
24	Woody savanna			49			
25	Permanent wetlands			0.4			
26	Cropland/natural vegetation mosaic			0		2.3	
27	Barren or sparsely vegetated			2.4		0.1	0.1
28	Mosaic vegetation (G./S./F.) (50-70%) / cropland (20-50%)					3.8	
29	Mosaic F. or S. (50-70%) and G. (20-50%)					9.9	
30	Mosaic G. (50-70%) and F. or S. (20-50%)					0.4	
31	Closed (>40%) G.					0	
32	Closed (>40%) B. semi-D. and/or E. F. regularly flooded.					0	
33	Consolidated bare areas						0
% total area of the three dominant classes		76	83	76	86.1	81	83
% Total area		100	100	100	100	100	100

The three dominant classes in each classification represented between 75.5% (UMd) and 86.1% (GLC2000) of the total state's area. Closer inspection reveals that the legends of the three dominant classes differ considerably among

the six classifications. Moreover, even if the same legend is shared between two classifications, the corresponding area can be very different. The dominant classes in the CONABIO reference map are: “Broadleaf forest,” “Needleleaf forest,” “Mixed forest” and “Cropland,” the latter being dominant. In the three global maps based on the IGBP legend (UMd, IGBP and MODIS), the dominant vegetation types are sparse tree layer vegetation or shrubland. The dominant classes in the Umd map are “Woodlands” and “Wooded Grasslands;” in the IGBP map, “Broadleaf shrubland,” “Mixed forests” and “Croplands;” while in the MODIS map over half of the territory is classified as “Savanna.” This appears to mean that –according to the classification criteria of the above-mentioned projects– the wooded areas of the state of Michoacan are not included in the “Forest” class because these areas are not similar to the more homogeneous and dense wooded areas in other parts of the planet. More areas of “Needleleaf forest” (pine forest) and “Mixed forest,” less areas of “Broadleaf forest” and slightly more areas of “Cropland” are present in the GLC2000 map relative to the same in the map of CONABIO. However –despite being based on the same legend– the GLOBCOVER map considers over half of the territory of Michoacan as covered by “Broadleaf forest” and as having a slightly smaller surface of “Needleleaf forest” and a small percentage of “Cropland” relative to the CONABIO map; a disagreement that could be in part explained by the inclusion of orchards within broadleaf forests. In general, the above-mentioned discrepancies are due to the complex mosaic and mixing patterns between these types of vegetation, as well as to the great variability of the seasonal dynamics observed in these classes.

VI.1.5.2 Comparison based on a merged legend

The aggregation process resulted in six major "merged" classes common to the six classifications: “Broadleaf forest” (BLF), “Needleleaf forest” (NLF), “Cropland” (CL), “Grassland and Shrubland” (GL&SL), “Urban” (UR) and “Water Bodies” (WB) (Table 3, dark gray cells). Assignment was made by strictly semantic criteria, i.e., only classes explicitly labeled as forest in the original legend were included in one of the two forest classes in the merged legend (BLF and NLF). As a consequence, the class GL&SL aggregated together all types of sparse tree layer vegetation and shrubland such as “Savanna” and “Woody

grasslands.” The aggregation process was eventually refined for scarcely represented, marginal classes and for cases in which semantic assignment was not clear or it led to obvious errors considering their location (Table VI.3, light gray cells), such as, for example, the inclusion in the “Cropland” merged class of the “Temperate or Sub-polar N. E. S. - Open Canopy” (merged class #8 in Table VI.3), “Temperate or Sub-polar G. with a Sparse Tree Layer” (#10), “Deciduous needleleaf forest” (#23) and “Permanent wetlands” (#26) classes (Table VI.3).

Table VI.3. Correspondence between the original and the proposed merged legends. Dark grey cells correspond to semantic assignment criterions; light grey cells correspond to spatial assignment criterions. B. Broadleaved, D. Deciduous, E. Evergreen, F. Forest, G. Grassland, N. Needleleaf, S. Shrubland.

Unified Legends Original Legends		1	2	3	4	5	6
		Broadleaf Forest	Needleleaf Forest	Cropland	Grassland&Shrubland	Urban	Water Bodies
1	Tropical or Sub-tropical B. E. F. - Closed Canopy	Dark					
2	Tropical or Sub-tropical B. D. F. - Closed Canopy	Dark					
3	Temperate or Sub-polar B. D. F. - Closed Canopy	Dark					
4	Temperate or Sub-polar N. E. F. - Closed Canopy		Dark				
5	Temperate or Sub-polar N. E. F. - Open Canopy		Dark				
6	Temperate or Sub-polar Mixed B. or N. F.- Closed Canopy		Dark				
7	Temperate or Sub-polar B. E. S. - Closed Canopy				Dark		
8	Temperate or Sub-polar N. E. S. - Open Canopy			Dark			
9	Temperate or Subpolar G.				Dark		
10	Temperate or Sub-polar G. with a Sparse Tree Layer			Dark			
11	Cropland			Dark			
12	Urban and Built-up					Dark	
13	Consolidated Rock Sparse Vegetation						Dark
14	Water Bodies						Dark
15	Herbaceous Wetlands						Dark
16	Wooded Tundra						Dark
17	Mixed Tundra						Dark
18	Dryland Cropland and Pasture				Dark		
19	Savanna				Dark		
20	Irrigated Cropland and Pasture				Dark		
21	Woodland				Dark		
22	Wooded Grassland				Dark		
23	Decidius needleleaf forest			Dark			
24	Woody savanna				Dark		
25	Permanent wetlands			Dark			
26	Cropland/natural vegetation mosaic			Dark			
27	Barren or sparsely vegetated			Dark			
28	Mosaic (G./S./F.) (50-70%) / cropland (20-50%)				Dark		
29	Mosaic F. or S. (50-70%) and G. (20-50%)				Dark		
30	Mosaic G. (50-70%) and F. or S. (20-50%)				Dark		
31	Closed (>40%) G.			Dark			
32	Closed (>40%) B. semi-D. and/or E. F. regularly flooded.	Dark					
33	Consolidated bare areas			Dark			

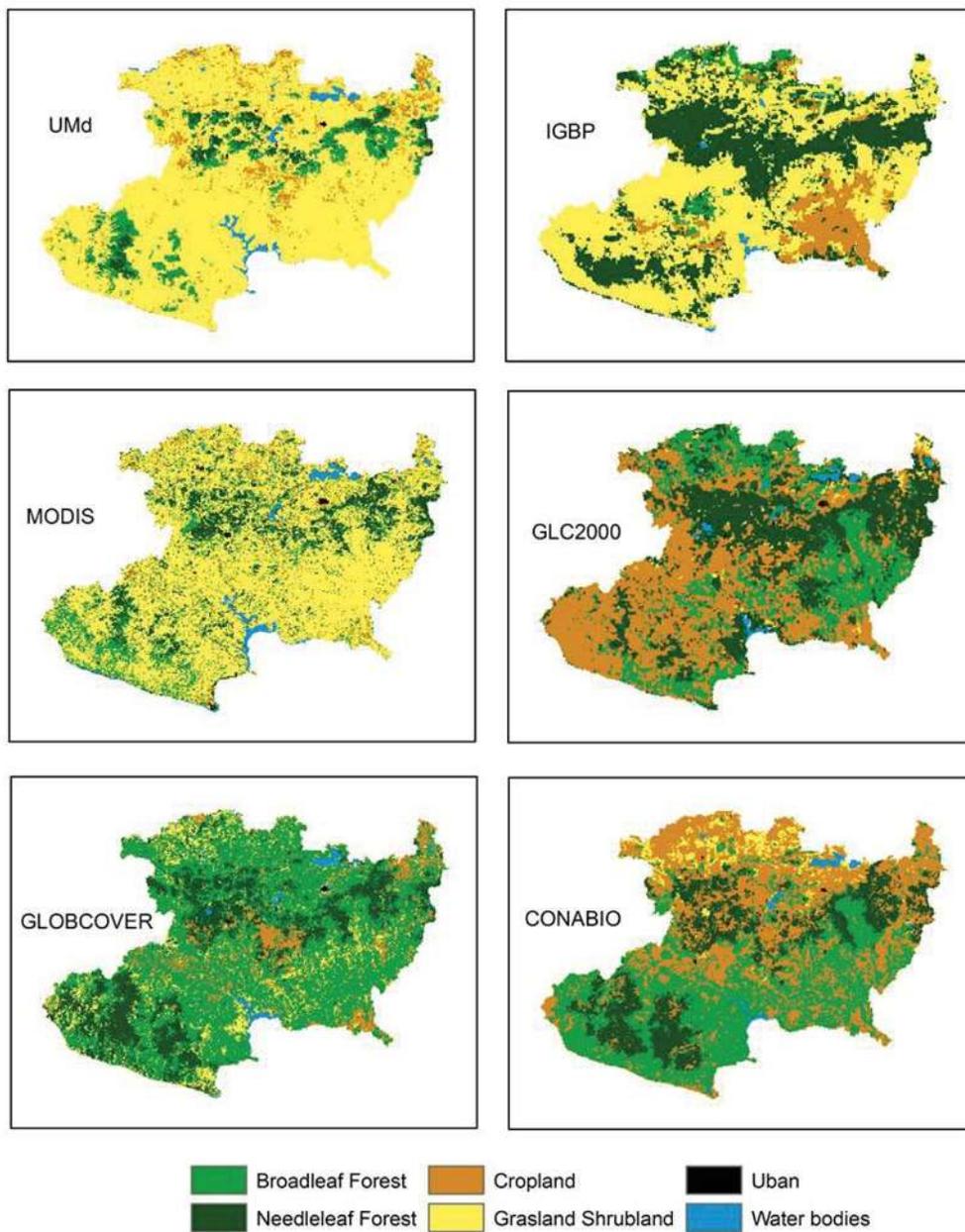


Figure VI.1. Land cover maps with the unified legend for the 6 classifications investigated.

The comparison of Table VI.4 and Fig. VI.1 shows a good consistency in the extent of the two marginal classes “Urban” and “Water Bodies,” which confirmed previous observations (Fritz and See, 2007). However, large

discrepancies were observed in the other four merged classes. The UMd, IGBP and MODIS maps reported large fractions of “Grassland and Shrubland” and low proportions of “Broadleaf Forests,” which is a consequence of the semantic assignment of cover types included in the “Grassland and Shrubland” class. The UMd map shows few needleleaf forests, which are overrepresented in the IGBP map. The croplands areas are minimal in the UMd and MODIS maps, while being totally misplaced in the IGBP map. The GLC2000 and CONABIO map report larger areas of “Cropland” than the other herein compared classifications, but the spatial distribution of the class in the former two maps is different, both because the GLC2000 map identifies large areas of broadleaf forest in the reference map as croplands, and because the croplands in the north of the state are classified as “Broadleaf forest.” As it did with the original legend, The GLOBECOVER map assigns over 50% of the state's area as “Broadleaf forest,” while the “Cropland” area is scarcely represented because orchards of avocado and other fruit trees are included in “Broadleaf forest.” However, the needleleaf forest appears to be adequately represented.

Table VI.4. Area distribution (%) for the 6 classifications considered using the 6 unified classes. BLF: Broadleaf Forest; NLF: Needleleaf Forest; CL: Cropland; GL&SL: Grassland & Shrubland; UR: Urban; WB: Water Bodies.

Map/Class	BLF	NLF	CL	GL&SL	UR	WB
UMd	9.0	4.6	6.8	77.7	0.1	1.8
IGBP	3.4	32.2	10.2	53.4	0.1	0.7
MODIS	11.5	14.9	3.5	67.7	0.2	2.2
GLC2000	23.8	29.8	43.6	1.2	0.1	1.4
GLOBECOVER	57.3	20.5	9.1	10.6	0.1	2.3
CONABIO	36.7	18.9	38.8	4.3	0.1	1.2
Average	23.6	20.2	18.7	35.8	0.1	1.6

The agreement clearly shows two clearly different groups (Table VI.5): the first one includes the UMd, IGBP and MODIS maps, all using legends similar to that of IGBP; the second group contains the GLC2000 and GLOBECOVER maps, both derived from the LCCS legend system. The former group has the highest value of overall accuracy between UMd and MODIS.

In contrast, when comparing the global land cover maps with the regional land cover map of CONABIO, the first group showed a poor performance, while the second reached the higher values of accuracy in general. However, the best

value ($O_a = 45.6\%$) observed for GLOBCOVER is much lower than the global validation score of the GLOBCOVER map ($O_a = 75\%$), calculated over 3,167 worldwide distributed reference samples at a spatial resolution of 300 m (Bicheron et al, 2006; Defourny et al, 2009).

Table VI.5. Values of overall accuracy (O_a) for pairs of classifications based on the unified legend. Confidence intervals at 95% probability are indicated between parenthesis.

Oa	UMd	IGBP	MODIS	GLC2000	GLOBCOVER	CONABIO
UMd	100	48.4 (±0.4)	62.2 (±0.4)	9.3 (±0.3)	17.1 (±0.4)	13.6 (±0.3)
IGBP		100	46.8 (±0.4)	22.3 (±0.4)	21.2 (±0.3)	17.1 (±0.3)
MODIS			100	13.9 (±0.3)	21.8 (±0.4)	16.5 (±0.3)
GLC2000				100	35.0 (±0.4)	40.2 (±0.4)
GLOBCOVER					100	45.6 (±0.4)
CONABIO						100

The confusion matrix between the CONABIO map and the five global classification maps is shown in Table 6. Errors of omission or commission are highlighted in bold (when the cell value is greater than the diagonal).

Table VI.6. Confusion matrix computed over the merged legend for the 5 global and the reference regional CONABIO land cover maps. Values are expressed in percentage (%) of the total number of pixels in the area. Values in the diagonal corresponding to an agreement with CONABIO's classification are in bold italics. Classes omitted and committed are highlighted with grey colors (values higher than that in the diagonal cell). BLF: Broadleaf Forest; NLF: Needleleaf Forest; CL: Cropland; GL&SL: Grassland & Shrubland; UR: Urban; WB: Water Bodies.

		CONABIO					
		BLF	NLF	CL	GL&SL	UR	WB
UMd	BLF	1.35	5.87	1.75	0.01	0.00	0.01
	NLF	0.30	3.02	1.22	0.02	0.00	0.01
	CL	1.21	0.46	4.64	0.42	0.01	0.06
	GL&SL	33.54	9.63	30.51	3.73	0.06	0.30
	UR	0.00	0.00	0.05	0.00	0.03	0.00
	WB	0.39	0.02	0.49	0.10	0.00	0.81
	IGBP	BLF	0.69	0.06	2.05	0.46	0.00
NLF	7.37	11.06	12.25	1.40	0.01	0.17	
CL	6.30	0.48	3.03	0.41	0.00	0.00	
GL&SL	22.28	7.34	21.16	1.99	0.05	0.59	
UR	0.01	0.01	0.03	0.00	0.04	0.00	
WB	0.10	0.02	0.20	0.06	0.00	0.27	
MODIS	BLF	3.73	3.71	3.86	0.23	0.00	0.02
	NLF	3.45	6.25	4.48	0.64	0.00	0.05
	CL	0.72	0.10	2.43	0.24	0.01	0.04
	GL&SL	28.37	8.89	27.36	3.07	0.03	0.13
	UR	0.02	0.02	0.13	0.00	0.06	0.01
	WB	0.51	0.01	0.42	0.10	0.00	0.93

		CONABIO					
		BLF	NLF	CL	GL&SL	UR	WB
GLC2000	BLF	11.36	1.59	8.64	2.12	0.00	0.15
	NLF	6.36	10.93	11.43	0.81	0.04	0.29
	CL	18.76	6.29	17.18	1.24	0.01	0.09
	GL&SL	0.13	0.05	1.01	0.04	0.01	0.00
	UR	0.01	0.00	0.06	0.00	0.03	0.00
	WB	0.11	0.11	0.39	0.12	0.00	0.64
	GLOBCOVER	BLF	25.87	5.55	22.91	2.93	0.00
NLF		4.14	11.72	4.07	0.49	0.00	0.08
CL		1.68	0.86	6.41	0.12	0.01	0.06
GL&SL		4.70	0.59	4.60	0.65	0.01	0.07
UR		0.01	0.01	0.06	0.00	0.04	0.00
WB		0.36	0.16	0.72	0.14	0.03	0.87

Omission (column wise)

Commission (line wise)

Both

The values of Pa and Ua were obtained from the confusion matrix and are shown in Table 7.

Table VI.7. User's (Ua, right value) and producer's (Pa, left value) accuracy for the 6 unified legends and for each of the 5 global classification maps with respect to CONABIO's regional classification map. BLF: Broadleaf Forest; NLF: Needleleaf Forest; CL: Cropland; GL&SL: Grassland & Shrubland; UR: Urban; WB: Water Bodies.

<i>Ua Pa</i>	BLF	NLF	CL	GL&SL	UR	WB
UMd	15.1 3.7	66.0 15.9	68.3 12.0	4.8 87.1	38.0 34.5	45.1 68.8
IGBP	20.3 1.9	34.3 58.3	29.6 7.8	3.7 46.1	48.8 38.2	42.4 23.0
MODIS	32.3 10.1	42.0 32.9	68.6 6.3	4.5 71.7	25.6 61.8	47.2 78.5
GLC2000	47.6 30.9	36.6 57.6	39.4 44.4	2.9 0.8	29.3 32.1	46.6 54.8
GLOBCOVER	45.1 70.4	57.2 62.0	70.2 16.5	6.1 15.0	34.3 41.8	38.1 74.3

The inspection of the Pa and Ua metrics by class, and of the omission and commission errors in the confusion matrix shows the following facts:

Broadleaf Forest (BLF). Ua is relatively low for UMD, IGBP and MODIS due to confusion with the NLF and CL. Pa is even worse due to the omission of pixels

classified as GL&SL. Ua best performances are observed for GLC2000 and GLOBCOVER, but with some confusion with CL. Pa for GLOBCOVER is very good, while poor results are achieved for GLC2000 because most BLF pixels were classified as CL.

Needleleaf forest (NLF). Ua reaches moderate values, with the poorest performance for IGBP and GLC2000 due to confusion with CL. Low Pa values are observed for UMD and MODIS due to pixels classified as GL&SL and, to a lesser extent, as BLF.

Cropland (CL). High values of Ua are achieved for UMD, MODIS and GLOBCOVER; however, with lower values for IGBP and GLC2000 due to confusion with BLF. Very low values of Pa are observed for UMD, IGBP and MODIS due to pixels classified as GL&SL, and for GLOBCOVER, due to pixels wrongly classified as BLF.

Grassland and shrubland (GL&SL). Very low values of Ua were observed mainly due to confusion with BLF and CL, and to a lesser extent, with NLF. By contrast, the Pa values are very high for UMD and MODIS, and less so for IGBP. Very low values of Pa are observed for GLC2000 and GLOBCOVER, mainly due to pixels classified as BLF.

Urban (UR). Urban areas represent a very small fraction of the total area (Table VI.6) and may be sensitive to geometric uncertainties. Low Ua are observed for MODIS and GLC2000 due to confusion with LC.

Water Bodies (WB). Medium values of Ua are observed for most classification maps due to confusion with CL and BLF. Higher Pa values are associated to all Mclassifications maps, with the exception of IGBP in which pixels classified as GL&SL are missing.

In the group of maps based on the IGBP legend the merged class GL&SL is almost equally distributed between “Broadleaf forest,” “Croplands” and, to a lesser extent, “Needleleaf forest.” What this means is that areas classified as savannas in the MODIS map or as “Sparse Tree Layer Vegetation” in the UMD map –both of which were classified as GL&SL in the merged legend– showed more spatial coincidence with the “Broadleaf forest” and “Croplands” classes than with the GL&SL areas in the CONABIO map. Therefore, there is an error in the initial labeling of these areas in the original map that lead to classification error

when applying the semantic criterion for establishing the merged legend. But the most severe error is seen in the confusion of shrubland areas (“Broadleaf forest” and/or GL&SL) and “Croplands” within a single class. This problem is a consequence of both the characteristics of the vegetation in the study area, and of its spatial distribution in relation to the spatial resolution of maps.

Both the results of the area extents and the spatial consistency showed clear differences between the global classification maps, confirming that Michoacan is a hotspot of discrepancies (Fritz and See, 2007). To better understand these differences, a map of agreement among all global maps of vegetation cover was calculated (Fig. VI.2). Places where there is total agreement in all maps represent only 2% of the area and mainly relate to water bodies (WB), urban areas (UR) and needleleaf forests (NLF). By contrast, 88% of the pixels show an agreement between 2 or 3 maps, corresponding mainly to broadleaf forest (BLF) and cropland (CL). In general, there was an agreement between maps with type IGBP (UMD, IGBP, MODIS) or type LCCS (GLC2000, GLOBCOVER) legends. Few pixels (0.1% of the total) were associated with different classes for each global map.

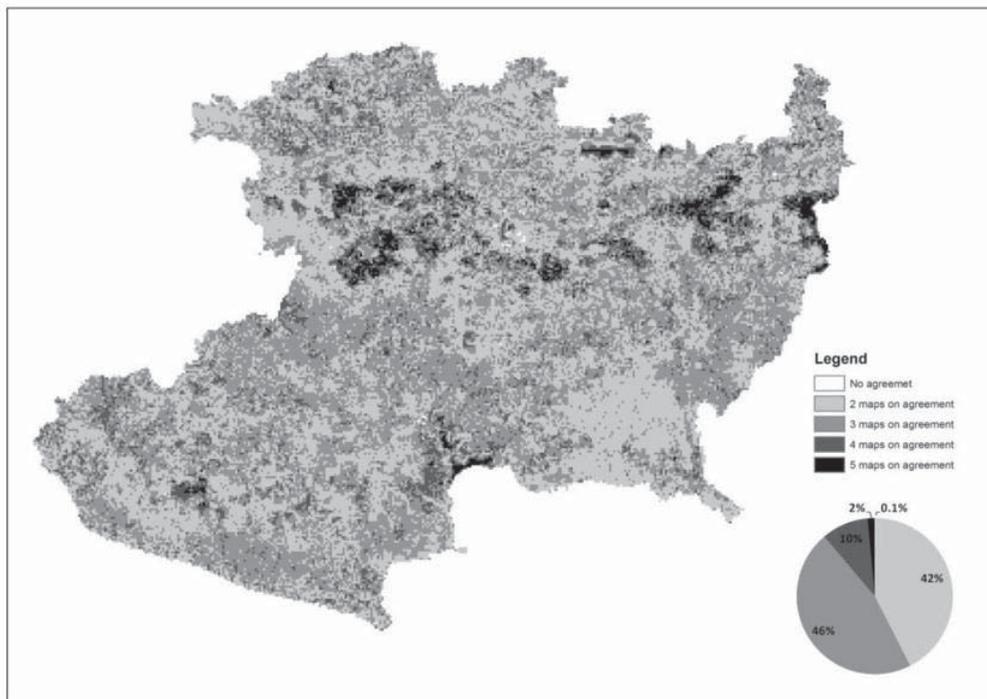


Figure VI.2. Levels of spatial agreement in the 5 global land cover maps.

VI.1.6 Conclusion

The study presents the results of the comparison between available global maps generated from data derived from medium-resolution sensors. A regional land cover map (CONABIO) generated from higher spatial resolution data and local experience was used as a reference.

The diversity of the legends explains the low level of consistency between the compared maps. Each one of the compared maps was constructed according to global classification criteria because of which shrubland classes are predominant in some maps (Umd, IGBP and MODIS; all based on a type IGBP legend) while forests predominate in others (GLC2000 and GLOBCOVER, based on a type LCCS legend).

To reduce the inconsistencies between the maps and to allow for a better comparison, a merged legend was proposed with 6 classes (“Broadleaf forest,” “Needleleaf forest,” “Cropland,” “Grassland & Shrubland,” “Urban” and “Water Bodies”). The use of a strict semantic criterion for class assignment established a marked difference between the IGBP-based maps and the reference map due to the excessive predominance of the Grassland & Shrubland class. The error in assignment to a given class is caused by the classification criteria of the original map and that for legend merging. In order to avoid such problem it is necessary to count with a very general and objective global classification system that is derived from the discussion in plural workgroups that take into account local experience and information in most biodiverse regions; as is the case of the state of Michoacan. However, the largest emergent problem in all herein analyzed maps is the confusion in the discrimination between croplands (and orchards) and broadleaf forest classes, a problem that is both due to the characteristics of the study area as to the low spatial resolution of data.

The territory of the state of Michoacan combines large mosaics made of cultivated and natural areas and the presence of marked contrasts in topography, characteristics which defy any hard classification assignment from medium spatial resolution observations. When high spatial resolution and high frequency sensors are in orbit –and when free access to the images occurs in an

operational and sustained way– their datasets will certainly enhance the performances of current land cover maps derived from the available medium resolution sensor datasets. Such high spatial resolution sensors would then fulfill the requirements needed not only for local and global land cover mapping, but also for other major issues related to land cover change.

Global land cover mapping appears to be a difficult task, as demonstrated by the large discrepancies between the currently available products. However, the information contained in global land cover maps may pave the road towards to the study of ongoing environmental processes including change in land cover distribution; therefore it is most important to know the strength and limitations of such maps.

VI.1.7 References

Bartholomé, E., Belward, A. S., & GLC2000. (2005). GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(9), 1959-1977. doi: 10.1080/01431160412331291297

Bicheron, P., Leroy, M., Brockmann, C., Krämer, U., Miras, B., Huc, M., . . . Gross, D. (2006). GLOBCOVER: a 300 m global land cover product for 2005 using ENVISAT MERIS time series Retrieved Jun 2008, 2006, from <http://postel.mediasfrance.org/fr/PROJECTS/Pre-operationnels-GMES/GLOBCOVER/>

Bocco, G., Mendoza, M., & Masera, O., R. (2001). La dinámica del cambio de uso de suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*(44), 18-38.

Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of clasifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*(37), 35-46.

Defourny, P., Bicheron, B., Brockmann, C., Bontemps, S., Bogaert, V. E., Vancutsem, C., . . . Arino, O. (2009). The first 300m global land cover map for 2005 using ENVISAT MERIS time series: a product of the GlobCover system.

Defourny, P., Vancutsem, C., Bicheron, P., Brockmann, C., Nino, F., Schouten, L., & Leroy, M. (2006). *GLOBCOVER: a 300 m global land cover product for 2005 using Envisat MERIS time series.*

- Defries, R., & Townshend, J. R. G. (1994). NDVI-derived land cover classification at global scale. *International Journal of Remote Sensing*, 15(17), 3567-3586. doi: 10.1080/01431169408954345
- Di Gregorio, A., & Jansen, L. J. M. (2000). *Land cover classification system: LCCS: classification concepts and user manual*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Friedl, M. A., McIver, D. K., Hodges, J. C., F., Zhang, X. Y., Muchoney, D., Strahler, A. H., . . . Cooper, A. (2002). Global Land Cover Mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, 83 (1-2), 287-302.
- Fritz, S., & See, L. (2007). Identifying and quantifying uncertainty and spatial disagreement in the comparison of Global Land Covers for different applications. *Global Change Biology*, 14(5), 1057-1075. doi: 10.1111/j.1365-2486.2007.01519.x
- González-Medrano, F. (2003). Las comunidades vegetales de México. *Propuesta para la unificación de la clasificación y nomenclatura de la vegetación de México*. Instituto Nacional de Ecología, México, DF.
- Hansen, M. C., DeFries, M., R, Townshend, J. R. G., & Sohlberg, R. (2000). Global Land Cover Classification at 1 Kilometer spatial resolution using a classification tree approach. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6/7), 1331-1364.
- Hansen, M. C., & Reed, B. (2000). A Comparison of the IGBP-DISCover and University of Maryland 1km global land cover products. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6&7), 1365-1373.
- Herold, M. (2006). A joint initiative for harmonization and validation of land cover data sets. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 44(7), 1719-1727. doi: 10.1109/TGRS.2006.871219
- Herold, M. (2008). Some challenges in global land cover mapping: An assessment of agreement and accuracy in existing 1 km data sets. *Remote Sensing of Environment*(112), 2538-2556.
- Inventario, F. (1995). *Memorias Regionales 1995*. Morelia: Gobierno del Estado de Michoacán.
- Lambin, E. F., & Geist, H. J. (2001). Global land-use and land-cover change: what have we learned so far? *Global Change News Letter* (46), 27-30.

- Latifovic, R., Zhu, Z., Cihlar, J., Beaubien, J., & Fraser, R. (2000). The Land Cover Map for North America in the Year 2000, from http://www-term.jrc.it/glc2000/Products/northamerica/MetadataLC35_NA2000.pdf
- Liu, D., Song, K., Townshend, J. R. G., & Gong, P. (2008). Using local transition probability models in Markov random fields for forest change detection. *Remote Sensing of Environment*(112), 2222-2231.
- Loveland, T. R., Reed, B. C., Brown, J. F., Ohlen, O., Zhu, J., Yang, L., & Merchant, J. W. (2000). Development of a Global Land Cover Characteristics Database and IGBP DISCover from 1-km AVHRR Data. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6/7), 1303-1330.
- Mayaux, P., Eva, P., Gallego, H., Strahler, J., Herold, A. H., Agrawal, M., . . . Roy, P. (2006). Validation of the global land cover 2000 map. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 44(7).
- McCallum, I., Obersteiner, M., Nilsson, S., & Shvidenko, A. (2006). A Spatial comparison of four satellite derived 1 km global land cover datasets. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation* 8 (8), 246-255.
- Miranda, F., & Hernández, X. (1963). Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Boletín de la Sociedad Botánica Mexicana*(28).
- Morissette, J. T., Baret, F., Privette, J. L., Myneni, R. B., Nickeson, J. E., Garrigues, S., . . . Cook, R. (2006). Validation of Global Moderate Resolution LAI products: a framework proposed within the CEOS Land product validation subgroup. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 44(7), 1804-1817. doi: 10.1109/TGRS.2006.872529
- Muchoney, D., Strahler, A. H., Hodges, J. C., F., & LoCastro, J. (1999). The IGBP discover confidence sites and the System for Terrestrial Ecosystem parameterization: Tool for validating global land cover data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65(9).
- Rositer, D. G. (1994). *Lectures Notes: "Land Evaluation"*. Cornell University, College of Agriculture and Life Science, Department of Soil, Crop and Atmospheric Science. Retrieved from <http://www.itc.nl/personal/rositter/Docs/Scas494/s494ch6.pdf>
- Rzedowski. (1978). *Vegetación de México*. México D.F: Editorial Limusa.
- Scepan, J. (1999). Thematic Validation of High Resolution Global Land Cover Data Sets. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65, 1051-1060.

See, & Fritz. (2006). Towards a global hybrid land cover map for the year 2000. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 44(7), 1740, 1746.

SEMARNAP. (1997). *Estadísticas del Medio Ambiente*. México D.F.: INEGI.

Strahler, A., Boschetti, L., Foody, G., Friedl, M. A., Hansen, M. C., Herold, M., . . . Woodcock, C. E. (2006). Global Land cover Validation: Recommendations for Evaluation and Accuracy Assessment of Global Land Cover Maps Retrieved from http://nofc.cfs.nrcan.gc.ca/gofc-gold/Report%20Series/GOLD_25.pdf

Velazquez, A., Mas, J. F., Díaz-Gallegos, J. R., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, P. C., Castro, R., . . . Palacio, J. L. (2008). Patrones y Tasas de Cambio de Uso de Suelo en México Retrieved September 2008, from <http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/gacetitas/62/velasquez.html>

VI.1.8 Anexo VI.1.1 Mapas originales empleados en el estudio

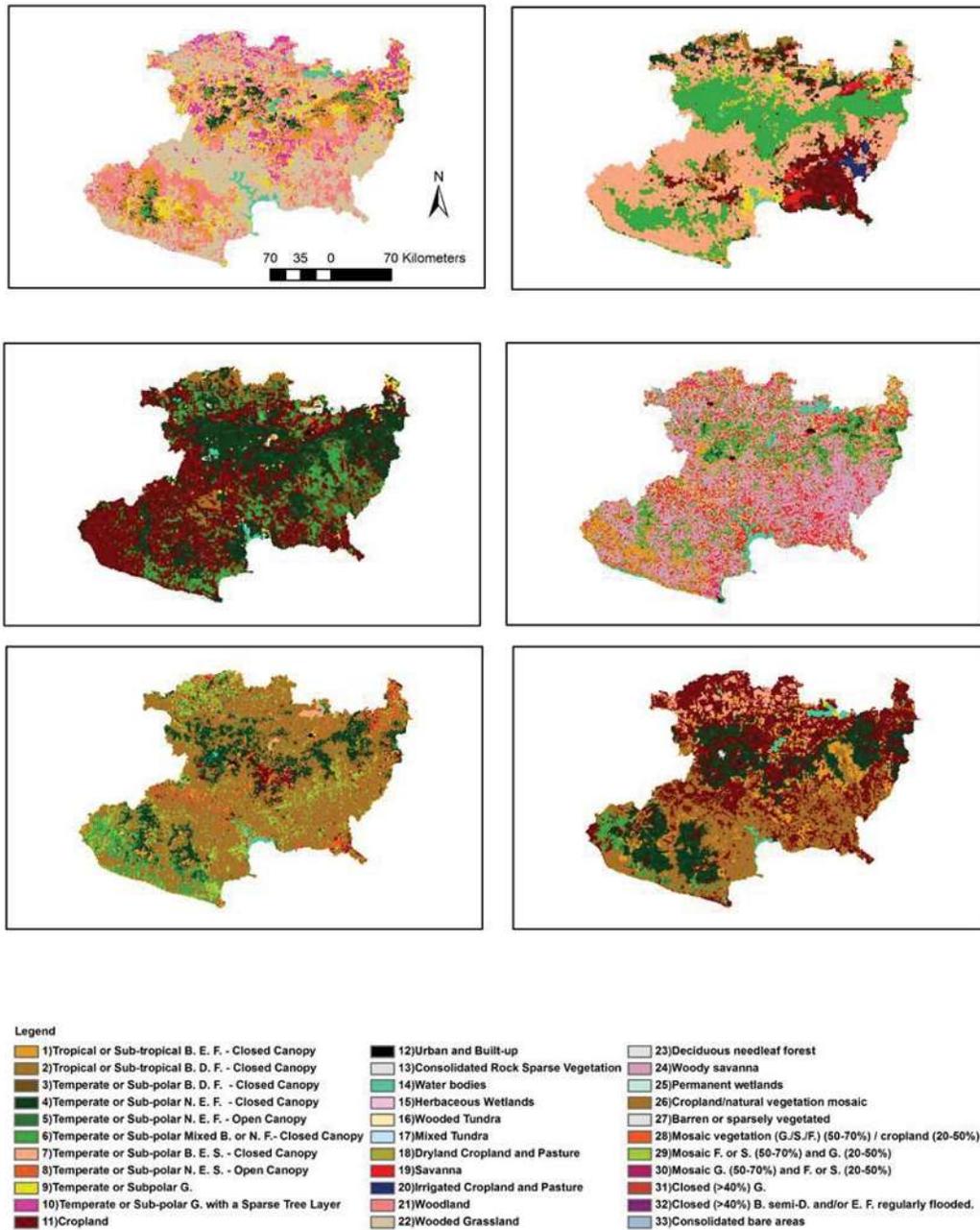


Figura A.VI.1.1. Mapas globales y mapa regional incluidos en el análisis con su leyenda original (B. Broadleaf, E. Evergreen, D. Deciduous, F. Forest, G. Grassland, S. Shrubland).

VI.1.9 ANEXO VI.1.2. Principales características de los proyectos

El siguiente cuadro muestra un resumen de las principales características de los mapas globales empleados en el capítulo 1

Cuadro A.VI.1.1. Principales características de los mapas empleados. * Número de clases empleadas en Michoacán/ Numero de clases empleadas para todo el globo.

Proyecto	Sensor	Resolución	Periodo de datos	Leyenda	Numero de clases*	Proyección	Referencia
UMd	AVHRR	1 km	1981-1994	IGBP	12/14	Geographic	(Hansen and Reed, 2000)
IGBP	AVHRR	1 km	04/1992-03/1993	IGBP	15/24	Lambert azimuthal	(Loveland <i>et al.</i> , 2000)
MODIS	MODIS	1 km	01/2004-12/2004	IGBP	16/17	Sinusoidal	(Friedl <i>et al.</i> , 2002)
GLC2000	VEGETATION	1 km	11/1999-12/2000	LCCS	15/29	Geographic	(Bartholomé <i>et al.</i> , 2005)
GLOBCOVER	MERIS	300 m	12/2004-06/2006	LCCS	17/25	Geographic	(Bicheron <i>et al.</i> , 2006)
CONABIO L1	LANDSAT, fotos aéreas	1 km	1990-1996	CONABIO	12	Lambert conformal	(CONABIO, 2008)

VI.1.10 ANEXO VI.1.3. Estimadores complementarios

VI.1.10.1 Introducción

En el capítulo I se comparan cinco mapas globales (UMd, IGBP, GLC2000, MODIS, GLOBCOVER) con el mapa de la CONABIO (que se toma como referencia) para el caso particular del estado de Michoacán, México. Como criterios se analizan la consistencia de área y espacial. La comparación se realiza respetando las leyendas originales y considerando una leyenda unificada.

Como un análisis adicional se consideran aquí criterios visuales, basados en la geometría fractal, que proporciona las herramientas para medir objetos complejos y describirlos por su forma y la relación que guarda el área y el perímetro de sus agregados (Burel and Baudry, 2002). Este enfoque permite cuantificar el efecto visual de similitud entre objetos.

Un efecto importante, que aparece a menudo en la construcción de mapas, es el llamado “sal y pimienta”, que se caracteriza por la presencia de muchos píxeles aislados, debido a que se incluyeron en una clase diferente a las de sus vecinos cercanos; se traduce en una alta fragmentación de los objetos que conforman un mapa. En este sentido es importante investigar la reducción del “ruido” asociado a este efecto, antes y después de la simplificación de clases.

Otro efecto que es interesante cuantificar es el fenómeno de frontera o borde entre clases, pues se asocia a regiones de incertidumbre debidas tanto a los métodos de proyección de los mapas, como a la incertidumbre inherente a la asignación de clases o etiquetas discretas al espacio geográfico, que en la realidad es continuo (Rossiter, 2001).

VI.1.10.2 Metodología

Se utilizaron dos indicadores basados en geometría fractal, para comparar el desempeño de las cinco clasificaciones de la cobertura vegetal de la región de estudio analizadas en este capítulo: la fragmentación y la complejidad.

La fragmentación se estima por el número de objetos y su distribución de tamaños. Un objeto es definido como un parche creado por píxeles interconectados entre sí y pertenecientes a la misma clase. La complejidad fue evaluada estimando su dimensión fractal, empleando la propuesta de Kocabas y Dragicevic (2006). La dimensión fractal se basa en la relación entre el perímetro (p) y el área (a) de los objetos y para un único objeto se define por la ecuación:

$$\text{Eq. 1 } FD = 2 \cdot \log\left(\frac{1}{4} \cdot a\right) / \log(p)$$

Para los píxeles individuales, FD es igual a 1. Conforme se incrementa la complejidad del objeto (la cantidad de perímetro con el que llena el plano), alcanza un valor máximo de 2.

El efecto de la frontera en la coherencia espacial entre los mapas fue investigado horadando los objetos o parches por 1 o 2 píxeles y analizando el impacto en la exactitud global de los píxeles restantes. Esto se logró obteniendo 15 combinaciones posibles entre los 6 mapas de cobertura del suelo con la leyenda unificada.

Como se mostró en el capítulo, primero se compararon los mapas analizados con el de referencia considerando las leyendas originales y, en una segunda parte, se consideraron las leyendas simplificadas a 4 clases generales.

VI.1.10.3 Resultados

Comparación utilizando las leyendas originales

Los diferentes mapas investigados mostraron una amplia variabilidad en términos relativos del número de objetos dentro de los mapas: desde cantidades bajas, alrededor de 1500 (IGBP, GLC2000 y CONABIO), pasando por cantidades regulares, del orden de los 5000 (UMd, GLOBCOVER) y hasta arriba de 11000 objetos (MODIS). El número de objetos y su tamaño están obviamente vinculados.

La distribución del tamaño de objetos (Fig. A.VI.1.3.1) muestra que el mapa MODIS, que es al que tiene el mayor número de objetos, es también el que tiene más objetos pequeños, lo que indica mucho efecto “sal y pimienta”; Umd y GLOBCOVER tienen una proporción intermedia de objetos pequeños, mientras que CONABIO, GLC2000 e IGBP (que es el que tiene el menor número de objetos), presentan una proporción baja. MODIS y Umd son los que tienen más objetos medianos y grandes, mientras que IGBP es que los tiene en menor proporción.

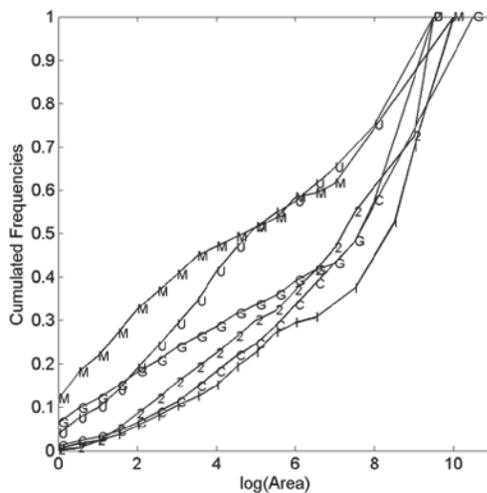


Figura A.VI.1.3.1. Distribución del tamaño de los objetos dentro de cada una de las seis clasificaciones consideradas, en función del tamaño del objeto, que se expresa como el logaritmo natural del área, $\log(\text{Area})$. Las letras representan una clasificación específica: U = Umd, I = IGBP, M = MODIS, 2 = GLC2000, G = GLOBCOVER; C = CONABIO.

La dimensión fractal en función del tamaño del objeto (Fig. A.VI.1.3.2) muestra características muy consistentes entre todos los mapas, de 1 para los objetos más pequeños, que corresponden a un pixel simple, y se incrementa de manera uniforme con el tamaño del objeto, lo cual indica que los objetos más grandes tienen patrones más complejos.

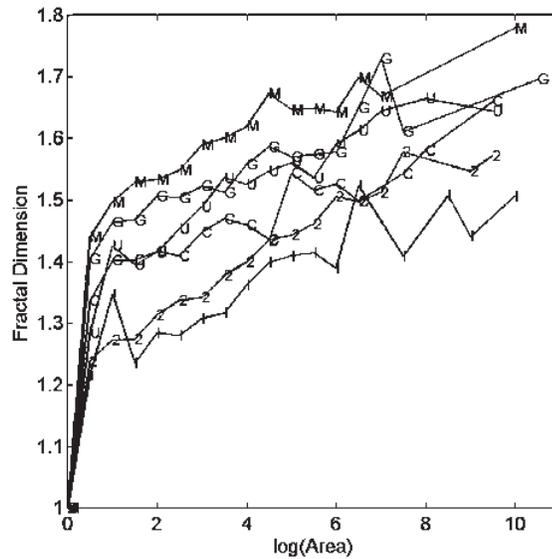


Figura A.V1.3.2. Distribución de la dimensión fractal en función del tamaño del objeto. El tamaño del objeto se expresa como el logaritmo natural del área, $\log(\text{Area})$. Las letras representan una clasificación específica: U = UMD, I = IGBP, M = MODIS, 2 = GLC2000, G = GLOBCOVER; C = CONABIO.

Para el mismo tamaño de objeto, a excepción de los objetos del tamaño de un pixel (donde $FD = 1$), el orden de complejidad entre los mapas fue casi constante, siendo MODIS el que presenta los objetos más complejos, seguido de GLOBCOVER y UMD, CONABIO, GLC2000 e IGBP, con los más sencillos.

Comparación utilizando la leyenda unificada

El número de objetos representó entre el 82% (CONABIO) y el 28% (UMD) del correspondiente a las leyendas originales (Cuadro A.VI.1.3.1).

Cuadro A.VI.1.3.1. Número de objetos en las 6 clasificaciones consideradas, empleando la leyenda unificada.

Proyecto	Número de objetos	
	6 clases	% original
UMd	1534	28.7
IGBP	924	65.4
MODIS	5155	46.5
GLC2000	1110	68.8
GLOBCOVER	4508	73.6
CONABIO	1479	82.0

La distribución del tamaño de los objetos en los mapas con leyendas unificadas muestra un evidente aumento del tamaño de los objetos (Fig. A.VI.1.3.3), debido a la agregación de las clases. Además, las diferencias entre los mapas se reducen significativamente, con la excepción de MODIS y GLOBCOVER que aún muestran muchos píxeles aislados, o efecto "sal y pimienta". Sin embargo, en general el orden de los mapas en la distribución de tamaño de objetos se mantiene.

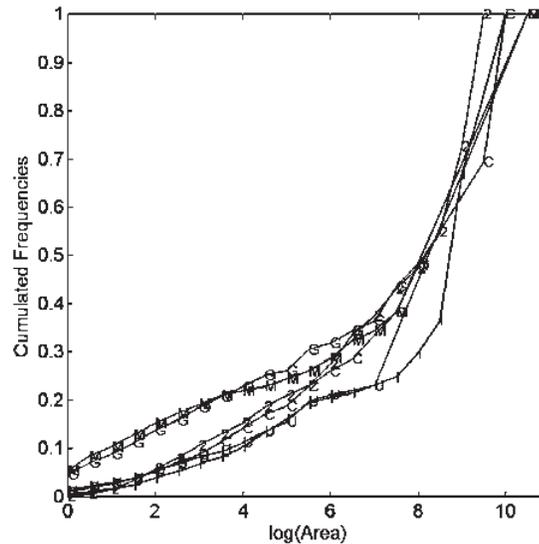


Figura A.VI.1.3.3. Distribución del tamaño de los objetos dentro de cada uno de los seis mapas considerados, con las leyendas unificadas, en función del tamaño del objeto, expresado como el logaritmo natural del área (log (Area)). Las letras representan una clasificación específica: U = UMD, I = IGBP, M = MODIS, 2 = GLC2000, G = GLOBCOVER; C = CONABIO.

La distribución de la dimensión fractal en función del tamaño del objeto (Fig. AVI.1.3.4) muestra el mismo patrón general que con la leyenda original, con un incremento de la dimensión fractal con los tamaños de los objetos. Las diferencias entre los mapas se reducen, pero siguen siendo consistentes: MODIS y GLOBCOVER presentan las dimensiones fractales más grandes (los objetos más complejos), UMD y CONABIO muestran valores intermedios, mientras que para IGBP y GLC2000 son relativamente bajos (los objetos más simples).

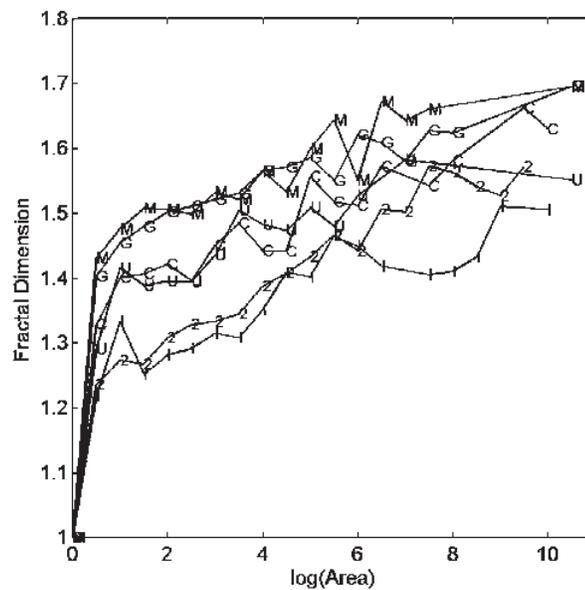


Figura A.VI.1.3.4. Distribución de la dimensión fractal correspondiente en función del tamaño del objeto, expresado como el logaritmo natural del área ($\log(\text{Area})$). Las letras representan una clasificación específica: U = UMD, I = IGBP, M = MODIS, 2 = GLC2000, G = GLOBCOVER; C = CONABIO.

Efecto borde en la estimación de exactitud

La reducción de las fronteras en un píxel mejora los valores de exactitud total en un 5% y la reducción de 2 píxeles en un 25% (Fig. A1.3.5). Sin embargo, la cantidad de píxeles se reduce, después del proceso de erosión, en promedio un 42% para 1 píxel y 82% para 2 píxeles.

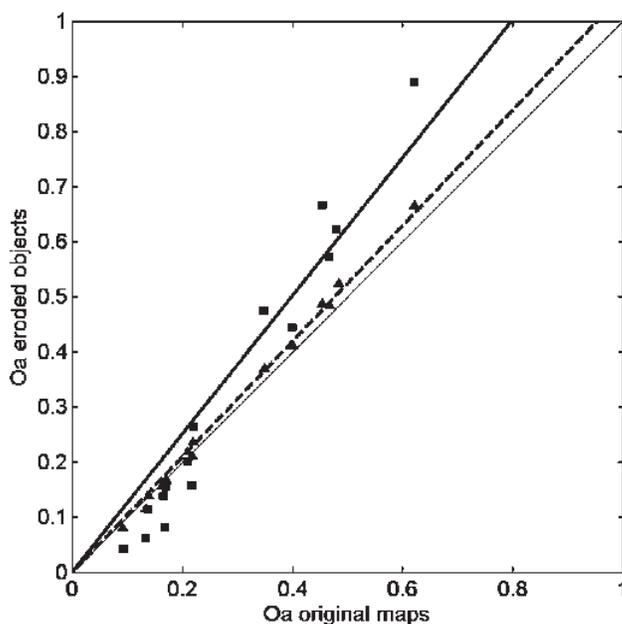


Figura A.VI. 1.3.5. Comparación entre los índices de exactitud global calculado en los mapas originales y los calculados erodando las fronteras de los objetos por 1 (▲) o 2 píxeles (■). Los índices de exactitud global fueron calculados para las 15 combinaciones de las 6 clasificaciones. La línea sólida delgada es la relación 1:1. La línea punteada y la línea sólida gruesa corresponden a la regresión lineal que pasa por el origen, respectivamente para la erosión de 1 y 2 píxeles.

VI.1.10.4 Conclusiones

La evaluación de la complejidad y la fragmentación aporta más información sobre las diferencias que fueron descritas en el Capítulo I entre los mapas evaluados. MODIS resultó ser el mapa con los patrones visuales más complejos, además de ser el más fragmentado, mientras que IGBP es el mapa con los patrones visuales más sencillos del grupo, con un bajo número de objetos y baja

complejidad. Esta situación se cumple tanto con la leyenda original como con la simplificada.

El efecto de borde también quedó demostrado. La baja resolución espacial de los mapas y la fragmentación debida a la complejidad del área de estudio, hacen que se pierda gran cantidad del área a evaluar, lo que no ocurriría con mejores resoluciones espaciales.

Los proyectos evaluados son visualmente distintos entre sí, lo que corrobora las grandes diferencias en su desempeño descritas en el capítulo 1 y aporta información valiosa para contextualizar adecuadamente cada proyecto, de acuerdo a sus posibles aplicaciones.

VI.1.11 CONCLUSIONES DEL CAPITULO I

Todos los mapas de cobertura global analizados, derivados de datos de satélites de observación terrestre con resolución de media a gruesa (300m-1km) presentaron un bajo desempeño al identificar correctamente la distribución de los tipos de vegetación en la zona de estudio. Esto se debe en parte a la gran diversidad de leyendas utilizadas, pero también a las dificultades inherentes a la homogenización de criterios para calificar una gran gama de objetos sobre la superficie terrestre a nivel global o continental.

Por otra parte y no menos importante que la subjetividad de las leyendas, también se encuentra el hecho de las limitaciones impuestas por la resolución. La cobertura terrestre es producto de procesos dinámicos que se expresan como fenómenos continuos. Un sensor desde el espacio solo puede obtener un promedio de los valores de reflectancias en el área dada por su resolución espacial. El efecto de borde o frontera entre clases, que se manifiesta como una mejora en el desempeño de la exactitud de los mapas, al eliminar del cálculo las áreas de frontera entre los objetos verifica lo anterior.

El territorio de Michoacán se caracteriza por una gran variedad de condiciones ecológicas producto de su posición geográfica y del complejo

relieve. Esto dificulta cualquier análisis que se pueda hacer con datos con las resoluciones que aquí fueron presentadas. Lo que no significa que no sean útiles bajo un contexto como el del área de estudio, pero sí que deben ser contextualizados de forma correcta y empleados como herramientas de aproximación al identificar regiones donde se verifiquen las dinámicas más interesantes.

VI.2 CAPITULO II. Construcción y validación de un mapa cobertura del estado de Michoacán, a partir del estudio fenológico de los principales tipos de vegetación con datos LAI de la serie CYCLOPES del año 2000.

VI.2.1 RESUMEN

A partir de la serie LAI CYCLOPES del año 2000 y un mapa de referencia local, se construyó un mapa de cobertura del estado de Michoacán, con cinco clases generales de vegetación: bosque de coníferas, bosque mixto, bosque de hoja ancha, cultivos y pastizal-matorral. Se utilizó el programa TIMESAT para extraer once las variables fenológicas y se analizó el comportamiento de cada variable para cada tipo de vegetación, según el mapa de referencia. Se observó que, considerando el perfil fenológico, el criterio que determina la separabilidad de las clases es el comportamiento caducifolio o perennifolio de cada una. Se definieron las nuevas clases: bosques de hoja perenne, que agrupa a los de coníferas y mixtos, y bosques de hoja caduca que corresponde a bosque de hoja ancha, quedando sin cambios las clases cultivos y pastizal-matorral. A continuación se propone una metodología para derivar un mapa de vegetación (con las clases generales identificadas) a partir de la información fenológica extraída de la serie CYCLOPES (2000). La comparación de este mapa (CYCL2000), con el mapa INF2000, de referencia, muestra resultados modestos, con una exactitud total (ET) de 62.99%. Los bosques de hoja caduca fueron los mejor identificados (exactitud del productor $E_p=80.09\%$, exactitud del usuario $E_u=62.1\%$), seguidos de los bosques de hoja perenne ($E_p=74.07\%$, $E_u=69.89\%$), cultivos ($E_p=62.93\%$, $E_u=61.07\%$) y Pastizal-matorral ($E_p=16.94\%$, $E_u=52.27\%$). En el marco general de este estudio, la identificación de los bosques de hoja perenne es particularmente interesante por su relación con los procesos de deforestación.

VI.2.2 SUMMARY

Based on the LAI CYCLOPES series and on a local reference map, a land cover map of the state of Michoacan, Mexico was constructed with five general vegetation classes: needleleaf forest, mixed forest, broadleaf forest, cropland and grassland-shrubland. The TIMESAT algorithm was used to obtain eleven phenological variables, and the behavior of each variable for each type of vegetation was analyzed according to the reference map. It was noticed that, from the phenological profile perspective, the deciduous or perennial behavior is the best class-discriminating criterion. Consequently, two new classes were defined: evergreen forests (which groups the coniferous and mixed forests) and deciduous forest (corresponding to broadleaf forest), while the classes cropland and grassland-shrubland remained unchanged. Subsequently, a methodology was proposed for deriving a vegetation map with the newly identified general classes based on phenological information extracted from the CYCLOPES 2000 series. The comparison of the resulting map (CYCL2000) with the reference map (INF2000) provided modest results, with an overall accuracy (Oa) of 62.99%. Deciduous forests were the better identified class with a producer's accuracy (Pa) of 80.09% and a user's accuracy (Ua) of 62.1%, followed by evergreen forest (Pa=74.07%, Ua=69.89%), cropland (Pa=62.93%, Ua=61.07%) and grassland-shrubland (Pa=16.94%, Ua=52.27%). The identification of evergreen forests is of particular interest within the context of the present work due to their relation with deforestation.

VI.2.3 INTRODUCCIÓN

Ante la creciente preocupación por los procesos de degradación sufridos por las superficies naturales del planeta (Bontemps *et al.*, 2011), han surgido diferentes iniciativas para proporcionar datos globales y ponerlos a disposición de un gran número de usuarios. En este contexto, el proyecto CYCLOPES proporciona variables biofísicas a pasos de tiempo cortos, que permiten estudiar las superficies vegetales desde diferentes puntos de vista (Baret *et al.*, 2007). Entre las diferentes variables biofísicas estimadas, el LAI es de especial interés para la descripción del comportamiento de la vegetación en ciclos anuales. Existe una relación directa entre el LAI y el comportamiento fenológico de una masa vegetal (Reed *et al.*, 2009b), que debe poder ser observada incluso con datos de baja resolución, siempre y cuando se consideren los tipos de vegetación más generales (García-Mora and Mas, 2011).

Dentro del marco general del trabajo, el objetivo de este capítulo fue explorar la capacidad de los datos fenológicos contenidos en la serie LAI de la serie CYCLOPES, para distinguir los principales tipos de vegetación en el estado de Michoacán.

En México, la heterogeneidad del territorio y la extensión (Mas *et al.*, 2009), dificulta la labor de contar con insumos de certeza conocida sobre la cobertura terrestre en el territorio, en un momento conocido en el tiempo. Si bien existen a disposición del público varias fuentes cartográficas de vegetación, como las generadas por el INEGI, CONABIO, INE, etc., no existen trabajos de validación asociados. Una excepción es el mapa empleado por el inventario nacional forestal 2000 (Palacio-Prieto *et al.*, 2000), para el cual se han desarrollado algunos ejercicios que lo validan (Couturier *et al.*, 2008) y permiten establecerlo como confiable para el área de estudio y la resolución de trabajo.

A partir de la información fenológica contenida en los datos CYCLOPES se establecen las bases para construir un mapa de vegetación, lo más cercano posible a un mapa de referencia que se considera “perfecto” (mapa del inventario nacional forestal 2000). La exactitud obtenida dará una idea de la que

se puede asociar a los mapas de cada uno de los años de la serie que se construirán en el Capítulo III y cuya comparación permitirá detectar los sitios de deforestación en el estado.

Para la construcción del mapa se utilizó la serie LAI CYCLOPES del año 2000, ya que es la fecha dentro de la serie disponible para la que existe un mapa de referencia generado localmente con imágenes de alta resolución y datos de campo. Para la extracción de las variables fenológicas se utiliza una versión adaptada del programa TIMESAT.

El trabajo se divide en dos partes: primero se extraen las características fenológicas de cada tipo de vegetación, según el mapa de referencia; después se utilizan esas mismas características para construir el mapa de cobertura del año 2000, que se compara a su vez con el mapa de referencia para conocer su nivel de exactitud.

En el primer capítulo se evidenció la necesidad de considerar clases de vegetación muy generales cuando se trabaja con datos de baja resolución, por lo que las leyendas originales de los mapas se unificaron en una leyenda muy simple. Este mismo procedimiento se repetirá ahora con el mapa de referencia. Así mismo se constató la dificultad de los proyectos globales para etiquetar correctamente las zonas de selva caducifolia en el estado de Michoacán, así como para identificar las zonas agrícolas. Es por esta razón que la metodología propuesta para construir el mapa base se apoya en la información *a priori* contenida en un mapa generado localmente con conocimiento del terreno. En cuanto a los bosques de coníferas (*needle leaf forest*), fueron relativamente bien identificados en general, por lo que en este capítulo se intentó profundizar en su análisis.

Se sabe que los bosques mixtos ocurren como una transición entre el bosque de pino y el de encino (Couturier, *et al* 2008). Esta transición puede explicarse espacialmente por una disminución de la altitud, que hace que se llegue a niveles por debajo de la distribución natural de pino. Un cambio en esta distribución natural podría explicarse como consecuencia del cambio climático. Pero existen también otras circunstancias, no naturales, que hacen que los

bosques de pino evolucionen hacia bosques de pino-encino y finalmente se conviertan en encinares. Se sabe que en los bosques perturbados por talas ilegales o planes de manejo mal diseñados o implementados, los pinos tienden a desaparecer y los encinos ganan espacio, por ser especies más competitivas y capaces de adaptarse y crecer en situaciones adversas.

Con el fin de evaluar la posibilidad de detectar los procesos de transición del bosque de pino hacia el bosque de pino-encino, cuando en el tercer capítulo se busquen los puntos de deforestación en el estado, en la primera parte de este capítulo se consideran estos dos tipos de cobertura separadamente. Sin embargo, se llega a la conclusión de que no son separables con los datos utilizados, ya que fenológicamente son muy similares, por lo que en la segunda parte del capítulo vuelven a considerarse como una sola clase, como en el Capítulo I y después en el III, a la que se denomina en general “bosques de hoja perenne”.

Un problema común en la generación de series de tiempo son los huecos, principalmente cuando se llevan a cabo estudios en regiones con alta nubosidad a lo largo del año. En el anexo a este capítulo, se analiza este tema en relación al área de estudio.

VI.2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

VI.2.4.1 Descripción de Michoacán

Michoacán de Ocampo es uno de los estados del centro occidente de México, en la costa del océano Pacífico. Ocupa el dieciseisavo lugar en extensión con 59,824 km² y se localiza entre los 17°54'34" y 20°23'37" de latitud norte y los 100°03'23" y 103°44'09" de longitud oeste (INEGI, 2009).

Su posición geográfica coincide con los límites de las regiones Neártica y Neotropical, lo que aunado a su compleja topografía le otorga una gran diversidad de condiciones ecológicas (SEMARNAP, 1997). Su máxima altitud sobre el nivel del mar la alcanza en el pico del Tancítaro, de 3,850 metros (Bocco *et al.*, 2001). La configuración topográfica y los gradientes altitudinales determinan en gran medida los climas y los tipos de vegetación asociados.

Sobre los 1600 msnm (casi el 40% del territorio) corresponde a climas de tipo templado Cwa, con lluvias en verano y temperaturas del mes más cálido superiores a los 22°C y Cwb con lluvias en verano y temperatura del mes más frío inferiores a los 22°C, de acuerdo a la fórmula de Köppen modificada por García para México (Correa, 1978). En estas regiones se encuentran las áreas más densas de bosques de coníferas y bosques mixtos, estos últimos están formados por coníferas y otras especies latifoliadas, principalmente encino, algunas veces, los patrones de deforestación en los bosques de coníferas llevan a la aparición de bosques mixtos, intercalados con áreas agrícolas y zonas de matorral.

Entre los 600 y los 1600m de altitud predomina el clima tropical, con veranos cálidos y lluviosos y temperatura máxima registrada antes del solsticio de verano (Agw). Esta condición se presenta en las partes bajas y medias de los sistemas montañosos. Los principales tipos de vegetación asociados son selva baja caducifolia, sub caducifolia y en menor medida perennifolia, en la vertiente del Pacífico. Salvo excepciones locales, ninguna de las especies de coníferas reportadas para el estado está adaptada a climas tropicales, como ocurre en general para México (Perry, 1991). La única especie que se reporta a menos de 1200 msnm para la región de estudio es *P. oocarpa* (Sáenz-Romero *et al.*, 2006).

Para el resto del territorio el clima es seco estepario, cálido, con lluvias escasas predominantes en verano (BSh) y temperatura media superior a los 18°C. Este tipo de clima corresponde a las partes medias y bajas de la Depresión del río Balsas, donde predomina la selva baja caducifolia y los matorrales espinosos.

VI.2.4.2 Mapa de referencia: Mapa del Inventario Nacional Forestal 2000 (INF2000)

Este mapa de uso de suelo y vegetación fue desarrollado mediante la interpretación visual de imágenes Landsat TM de finales de 1999 y comienzos de 2000, con el apoyo de datos auxiliares de campo a una escala 1 : 250,000, en un formato digital de ESRI con una proyección cónica conforme de Lambert

adaptada a México (Palacio-Prieto *et al.*, 2000); (Mas *et al.*, 2002). Posteriormente fue puesto a disposición pública por CONAFOR en su página *web*.

Para Michoacán, este mapa contabiliza 36 tipos de vegetación, de los 46 totales en México. Las clases se basan en los trabajos sobre vegetación de Miranda (1963) y Rzendowsky (1978). Para el presente estudio se propone una versión simplificada de la leyenda original. Otros trabajos en la región ya han mostrado que los mapas más confiables que se pueden obtener a partir de imágenes de resolución media, deben considerar categorías de vegetación generales (Garcia-Mora and Mas, 2011). También en el capítulo I de este trabajo se aborda este tema, al comparar diferentes mapas de vegetación de Michoacán construidos a nivel global con imágenes de resolución media o baja, con diferentes metodologías. La conclusión de este análisis fue que, a bajas resoluciones, la complejidad del área de estudio dificulta la correcta identificación incluso de las clases más generales, si no se considera información local de apoyo. Con la intención de estudiar el potencial del enfoque fenológico para separar los bosques de coníferas, de los bosques de coníferas asociados con otras especies de hoja ancha, generalmente encinos, se introdujo la clase “bosques mixtos” en la primera parte del trabajo, que no aparecía en el capítulo I.

El cuadro VI.1 muestra la simplificación de las clases y en la Fig. VI.1, el mapa obtenido y empleado en la primera parte de este trabajo.

Cuadro VI.1. Leyenda original del mapa del INF2000 y el esquema de simplificación empleado.

Leyenda original (INF2000)	Leyenda simplificada	
Bosque de Encino con vegetación arbustiva secundaria	Bosques de hoja ancha (BHA)	
Bosque de encino		
Selva baja caducifolia y subcaducifolia con vegetación herbácea		
Selva baja caducifolia y subcaducifolia		
Bosque espinoso		
Bosque mesófilo de montaña		
Bosque mesófilo de montaña con vegetación arbustiva		
Selva mediana caducifolia y subcaducifolia		
Selva mediana caducifolia y subcaducifolia con vegetación arbustiva		
Manglar		
Plantaciones forestales	Bosques de coníferas (BC)	
Bosque de pino		
Bosque de pino con vegetación arbustiva		
Bosque de abies (incluyendo cedral)		
Bosque de abies con vegetación secundaria arbustiva (incluyendo cedral)		
Bosque de pino-encino	Bosques mixtos (BM)	
Bosque de pino-encino con vegetación secundaria arbustiva		
Agricultura de riego	Cultivos (CU)	
Agricultura de temporal		
Agricultura de humedad		
Cultivos anuales perennes y semiperennes		
Pastizal inducido	Pastizales y matorrales (P&M)	
Pastizal subtropical con vegetación arbustiva		
Matorral subtropical		
Matorral crasicaule		
Pastizal natural (incluye Acacia spp)		
Mezquital		
Matorral crasicaule con vegetación secundaria		
Vegetación halófila y gypsumita		
Humedales		
Pastizal cultivado		
Palmeras		
Suelo desnudo		
Sabanas		
Urbano		Urbano
Agua		Agua

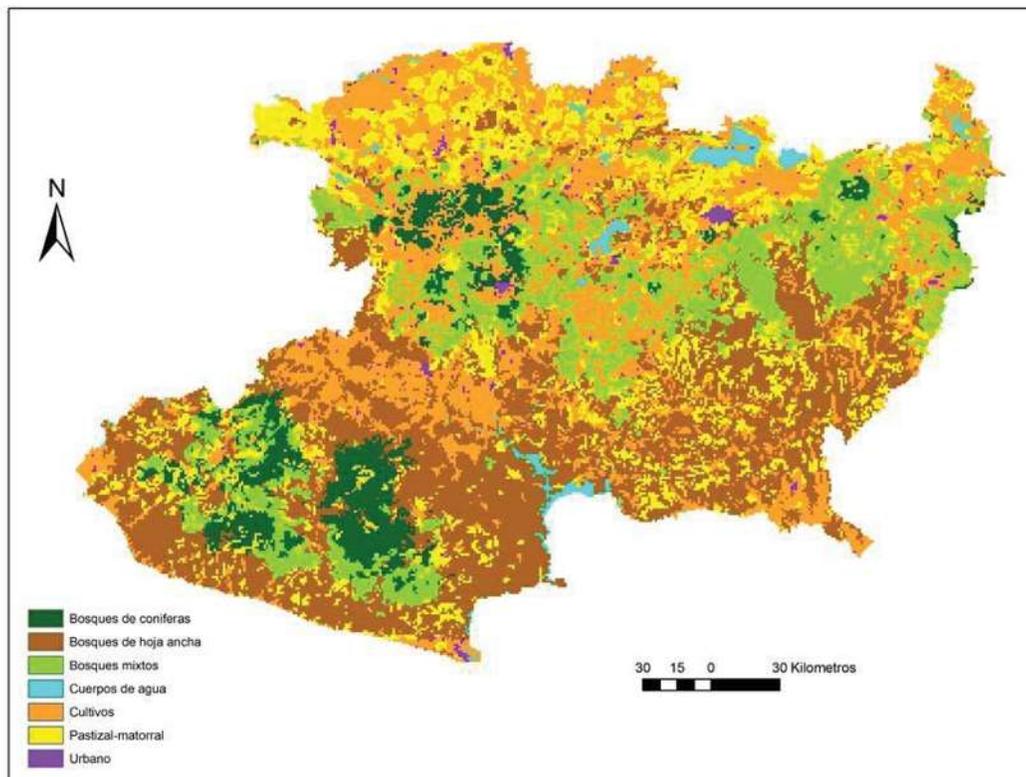


Figura VI.1. Mapa INF2000, versión simplificada empleada en este trabajo

VI.2.4.3 Datos CYCLOPES

Este estudio se centró en el análisis del año 2000 de la serie CYCLOPES de LAI.

Con el fin de obtener el recorte del área de estudio, se empleó la proyección original de la serie de datos globales (latitud, longitud con una resolución de 1/112 de grado). Para obtener el polígono del estado de Michoacán, se utilizó el mapa de estados de la república disponibles en la página web del INEGI en formato digital shape de ESRI, con una proyección cónica conforme de Lambert adaptada a México (INEGI, 2009). El cambio de proyección se realizó mediante el programa ERDAS, así como el cambio a formato *raster*, con las características de extensión y proyección de los datos CYCLOPES (ERDAS, 2001).

Los datos faltantes dentro de la serie fueron recuperados mediante interpolaciones lineales en el tiempo para todos los casos.

VI.2.4.4 Análisis de los datos

Los datos de la serie CYCLOPES del año 2000 correspondientes al área de estudio, se analizaron con el algoritmo TIMESAT y se obtuvo una descripción fenológica de cada pixel, en 11 variables fenológicas. Utilizando como referencia el mapa de vegetación INF2000, simplificado a 5 clases generales de vegetación, se calcularon las estadísticas (mediana y primer y tercer cuartil) de cada variable fenológica y se discutió la separabilidad de los tipos de vegetación en función de las distribuciones observadas.

Por otra parte, se realizó un análisis de componentes principales de las 11 variables fenológicas y se utilizaron los cinco primeros componentes para construir un mapa de vegetación a partir de una clasificación no supervisada *k-means* de 250 clases. El análisis *k-means* permite explorar la estructura subyacente, organizando los datos en clases que comparten características homogéneas (Duda and Canty, 2002).

Este mapa se comparó con el mapa de referencia, construyendo la matriz de confusión y estimando la exactitud total, la del usuario y productor, para las clases de vegetación que son identificables de acuerdo al primer análisis.

VI.2.4.5 TIMESAT

TIMESAT es una herramienta desarrollada para el análisis de series de tiempo. A partir de los datos originales (LAI en el caso de CYCLOPES, NDVI en el caso de MODIS) permite la obtención de una serie de variables, para un análisis exhaustivo de los patrones estacionales (Jönsson and Eklundh, 2004). El potencial de esta herramienta ha sido probado en numerosos estudios (Heumann *et al.*, 2007), (Le Page *et al.*, 2010), (Verbesselt *et al.*, 2006), e incluso existen adaptaciones para mejorar su desempeño bajo ciertas condiciones (Gobron *et al.*, 2006).

Su código es abierto y desarrollado en los lenguajes Fortran y Matlab, y permite extraer información fenológica de una serie de tiempo mediante la

obtención de 11 variables, ajustando los datos originales sobre modelos matemáticos (Jönsson and Eklundh, 2004). En la realización de este trabajo se utilizó la versión 2.3. En esta versión es posible elegir tres métodos de ajuste sobre los datos: Savitzky-Golay que funciona como un filtro adaptativo, funciones del tipo Gaussianas asimétricas y del modelo doble logístico (Eklundh and Jönsson, 2006).

El conjunto de algoritmos TIMESAT ha probado ser útil en la tarea de estudiar los ciclos de crecimiento de la vegetación a partir de la información satelital, lo que permite estudiar la respuesta de los ecosistemas a las condiciones climáticas cambiantes (Tan *et al.*, 2011).

En este trabajo, se utilizó el método Savitzky-Golay, que se basa en el ajuste local de funciones polinómicas. Esto le permite capturar cambios mínimos en una serie, aunque lo hace sensible al ruido en los datos (Gao *et al.*, 2008). Los otros dos modelos son menos sensibles al ruido y proporcionan una mejor descripción del inicio y del fin de la estación de crecimiento. Dado que la serie LAI CYCLOPES presenta poco nivel de ruido, comparada con otras fuentes como MODIS (Garrigues *et al.*, 2008), (Weiss *et al.*, 2007), puede analizarse con el modelo Savitzki-Golay.

Se trabajó con los algoritmos en código Matlab, para hacer un ajuste tomando como entrada cada una de las series de tiempo correspondientes a cada pixel. Se definieron como parámetros fijos para el ajuste los siguientes parámetros de TIMESAT:

- *Inicio y fin de estación (20%)*, (fecha en la que el valor de LAI supera el 20% de la amplitud o diferencia entre el mínimo y al máximo local).
- *Tamaño de ventanas para el ajuste Savistki-Golay: 5, 6, 7*
- *Número de pasos de adaptación: 3*
- *Fuerza de adaptación: 2*
- *Picos:2*
- *Amplitud baja: 0*
- *Número de estaciones: 0.5*

Los parámetros *Tamaño de ventana*, *Número de pasos de adaptación* y *Fuerza de adaptación* se refieren a la forma en que el algoritmo ajusta los datos. Los *Picos*, *Amplitud baja* y *Número de estaciones* se refieren a las condiciones de crecimiento; los dos primeros permiten filtrar datos anormales y el último define cómo buscar el número de estaciones de crecimiento en un año. Valores cercanos a 0 fuerzan al algoritmo a buscar 2 estaciones de crecimiento por año; el valor máximo de 1 fuerza a ajustar los datos a una sola estación de crecimiento (Eklundh and Jönsson, 2006).

La salida es un conjunto de 11 variables fenológicas que describen las principales características del perfil temporal LAI, para cada ciclo (año) y para cada píxel (Fig. VI.2 y Cuadro VI.2).

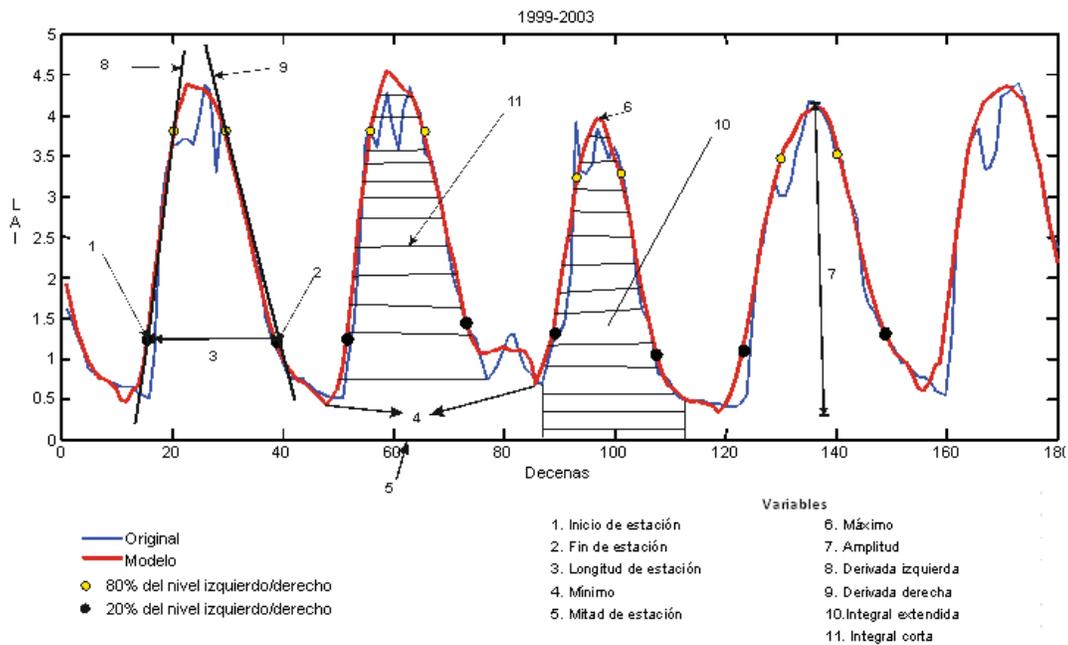


Figura VI.2. Variables obtenidas por TIMESAT, ejemplo con un píxel

Cuadro VI.2. Variables obtenidas por TIMESAT sobre una serie de tiempo

Variable	Descripción
1. Inicio de estación	Tiempo para el cual el límite izquierdo se ha incrementado una cantidad definida por el usuario (20% para el caso de este trabajo, de la amplitud de estación), medido desde el nivel mínimo izquierdo
2. Fin de estación	Tiempo para el cual el límite derecho ha disminuido una cantidad definida por el usuario (20% para el caso de este trabajo, de la amplitud de estación), medido desde el valor mínimo derecho
3. Longitud de estación	Tiempo entre el comienzo y el fin de la estación
4. Mínimo	Promedio de los valores mínimos izquierdo y derecho
5. Mitad de estación	Media de los tiempos para los cuales, el límite izquierdo ha incrementado a un 80% de su nivel y el límite derecho ha decrecido a un 80% de su nivel.
6. Máximo	Valor del LAI máximo
7. Amplitud	Diferencia entre máximo y mínimo locales
8. Derivada izquierda	Razón entre los valores evaluados al comienzo de la estación y el 80% de nivel izquierdo dividido por la correspondiente diferencia de tiempo.
9. Derivada derecha	Razón entre los valores evaluados al fin de la estación y el 80% de nivel derecho dividido por la correspondiente diferencia de tiempo.
10. Integral extendida	Integral de la función que describe la estación desde el comienzo de la estación hasta el final de esta.
11. Integral corta	Integral de la diferencia entre la función que describe la estación y el nivel base desde el inicio de la estación hasta el final de la estación.

Las 11 variables fenológicas fueron obtenidas para todos los pixeles, posteriormente se identificaron pixeles de valores bizarros en las variables y fueron removidos de los mapas finales. También fueron removidos de los mapas finales, los pixeles que se encontraron con doble estación de crecimiento, al no ser relevantes para los fines de este estudio. Lo anterior origina huecos en los mapas de las variables fenológicas y en los mapas de vegetación derivados de ellas.

VI.2.4.6 Análisis de componentes principales (ACP)

Con el objetivo de eliminar la redundancia y profundizar en el análisis de las relaciones entre las variables obtenidas mediante TIMESAT, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) a los datos fenológicos obtenidos. Debido a las diferentes unidades de las variables iniciales, para llevar a cabo el ACP, se estandarizaron los valores, dividiéndolos entre su desviación estándar.

El análisis de componentes principales es una técnica de decorrelación de variables, que consiste en utilizar transformaciones lineales entre los datos originales para construir un nuevo conjunto de datos. Este nuevo conjunto recibe el nombre de componentes principales, de tal forma que la mayor parte de la variación de los datos originales estará contenida en los primeros componentes. Las nuevas variables están completamente decorreladas (Jolliffe, 2002). Desde el punto de vista del cálculo, el ACP consiste en buscar una solución a un problema de valores propios-vectores propios, o *eigenvalues-eigenvector*, para una matriz simétrica positiva semi-definida.

VI.2.4.7 Determinación de grupos fenológicos a partir de los componentes principales

Con los primeros cinco componentes se realizó una clasificación no supervisada con el algoritmo *K-means* de Matlab (Kanungo *et al.*, 2002) para agrupar los patrones similares en 250 *clusters*. A partir de estos 250 *clusters* se construyó un mapa de cobertura (CYCL2000), con las 4 clases empleadas en la primera parte de este trabajo. Los *clusters* se agruparon en clases empleando el criterio de mayor proporción de área, con respecto a cada clase en el mapa INF2000.

VI.2.4.8 Comparación del mapa CYCL2000 con el mapa INF2000

Se construyó una matriz de confusión entre el mapa de vegetación CYCL2000, y el mapa de referencia INF2000. A partir de ésta se calcularon los estimadores de exactitud total, exactitud del usuario y exactitud del productor, descritos en el primer capítulo.

VI.2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

VI.2.5.1 Variables fenológicas

Analizando los datos CYCLOPES del año 2000 con TIMESAT (algoritmo Savitzky-Golay) se obtuvo el conjunto de 11 variables fenológicas. Las figuras 5.4 a la 5.14 muestran la distribución espacial de cada una, junto con su distribución estadística para cada tipo de vegetación (según el mapa de referencia INF2000 simplificado a 5 clases: BHA -Bosque de hoja ancha-, BC –

Bosque de coníferas-, CU –Cultivos-, y P&M –Pastizal-Matorral-. Se construyeron gráficas de caja y bigotes para facilitar la observación de la distribución. La línea el centro de la caja representa la mediana, el límite inferior y superior de cada caja representan el 25 % y el 75% de los datos (o el primer y tercer cuartil); los datos considerados fuera de la distribución se muestran como marcas al exterior de las cajas.

Inicio de Estación. Indica el inicio de la estación de crecimiento y viene dada en decenas de días a partir del inicio de año. Los valores más bajos obtenidos se ubican por la decena 10 del año (la primera quincena de abril), y los más altos por la decena 20 (la segunda quincena de julio) (Fig. VI.3).

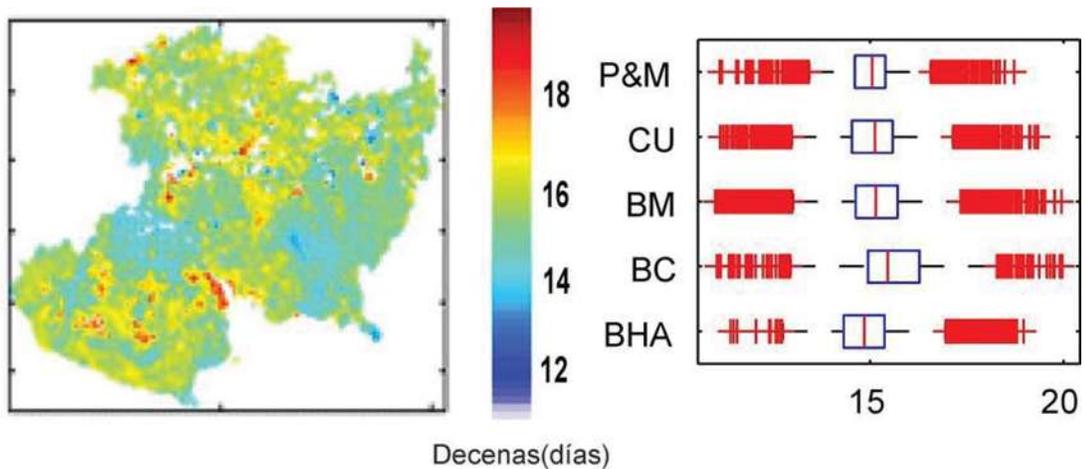


Figura VI.3. Distribución espacial de la variables fenológica *Inicio de estación* para el año 2000. P&M: pastizal y matorral, CU: cultivos, BM: bosque mixto, BC: bosque de coníferas y BHA: boque de hoja ancha.

No se observan diferencias importantes en el comportamiento estadístico de esta variable para los diferentes tipos de vegetación, que presentan distribuciones muy parecidas alrededor de la decena 15 o finales del mes de mayo. Los bosques de hoja ancha inician su estación de crecimiento un poco antes y el bosque de coníferas ligeramente más tarde. En los bosques de coníferas, sin embargo el aumento significativo de LAI está más asociado al crecimiento de la vegetación baja que a la aparición de los nuevos brotes, que

puede incluso producirse antes. Por tratarse en general de zonas de montaña, es posible que el aumento de la temperatura que marca el inicio de la primavera se dé un poco más tarde. En los bosques de hoja ancha se incluyen las selvas bajas caducifolias, formadas por una gran variedad de especies, de las cuales algunas inician su brotación incluso antes de que empiece a llover.

Fin de estación: Corresponde al final de la estación de crecimiento y se expresa en decenas de días a partir del inicio del año (Fig. VI.4).

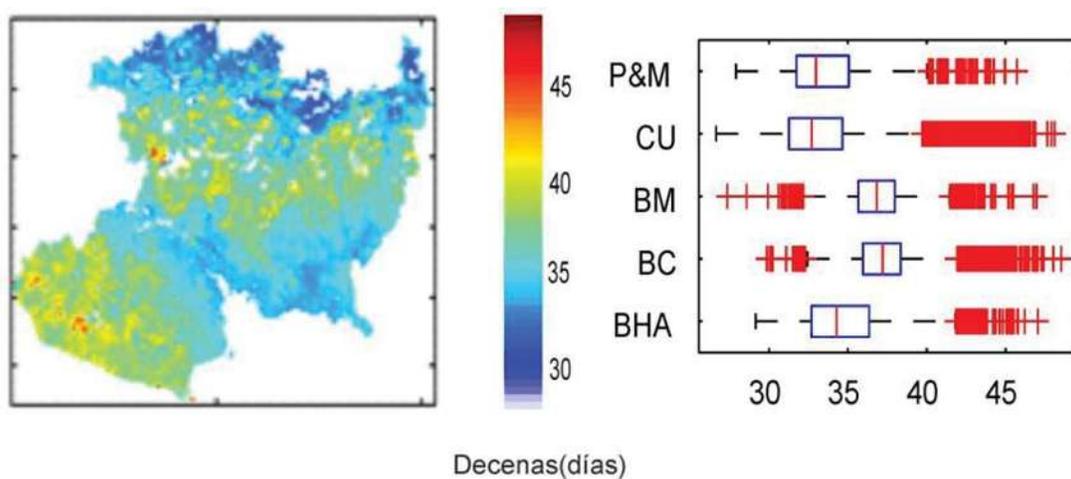


Figura VI.4. Distribución espacial de la variables fenológica *Fin de estación* para el año 2000. P&M: pastizal y matorral, CU: cultivos, BM: bosque mixto, BC: bosque de coníferas y BHA: bosque de hoja ancha.

Los valores más bajos están alrededor de la decena 25 (principios del mes de septiembre) y los más altos arriba de la decena 45 (finales del mes de marzo del año civil siguiente). Con respecto a los tipos de vegetación, los cultivos y los matorrales y pastizales son en promedio los primeros en terminar la estación verde (alrededor de la decena 34, a principios del mes de diciembre), mientras que los bosques de coníferas y mixtos son los últimos (alrededor de la decena 37, a principios de enero del año siguiente), y el bosque de hoja ancha se sitúa en una posición intermedia.

Considerando la distribución espacial, la estación de crecimiento termina primero en la Depresión del Balsas y en la región norte del estado, la Altiplanicie Mexicana, y más tarde en la región frente a la costa y en las áreas montañosas

Longitud de estación. Se mide en decenas de días y se refiere al tiempo entre el inicio y final de la estación de crecimiento (Fig. VI.5).

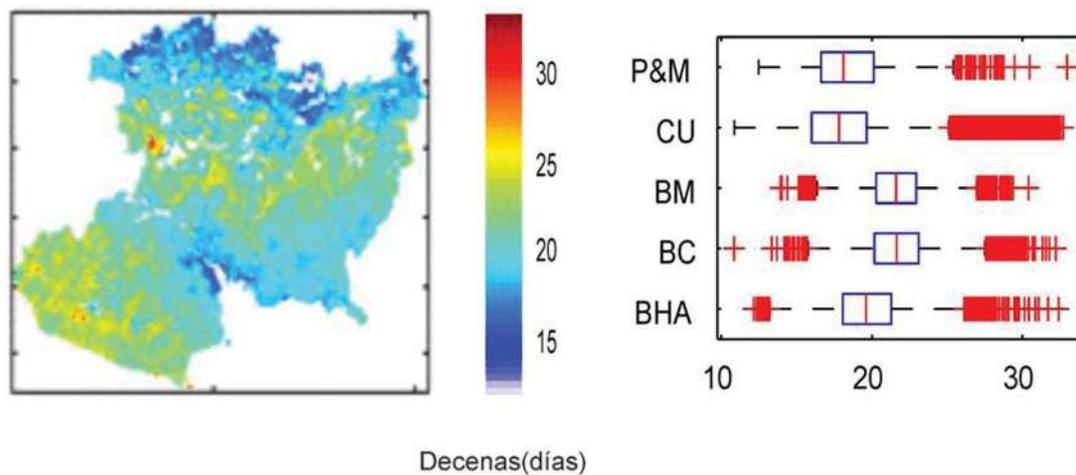


Figura VI.5. Distribución espacial de la variables fenológica *Longitud de estación* para el año 2000. P&M: pastizal y matorral, CU: cultivos, BM: bosque mixto, BC: bosque de coníferas y BHA: boque de hoja ancha.

En promedio, los valores más bajos corresponden a los cultivos y al matorral-pastizal, con cerca de 180 días de duración de la estación de crecimiento. Los bosques de coníferas y mixtos presentan longitudes de estación de alrededor de 220 días, mientras que los bosques de hoja ancha presentan valores intermedios.

Espacialmente, las estaciones más cortas se presentan en las inmediaciones de la presa del Infiernillo (la parte más baja de la Depresión del Balsas) y la zona norte del estado, y las más largas en la Costa y en las zonas montañosas.

Mitad de Estación. Se expresa en decenas de días y corresponde a la media de los tiempos para los cuales, el límite izquierdo ha incrementado a un 80% de su nivel y el límite derecho ha decrecido a un 80% de su nivel (Fig. VI.6).

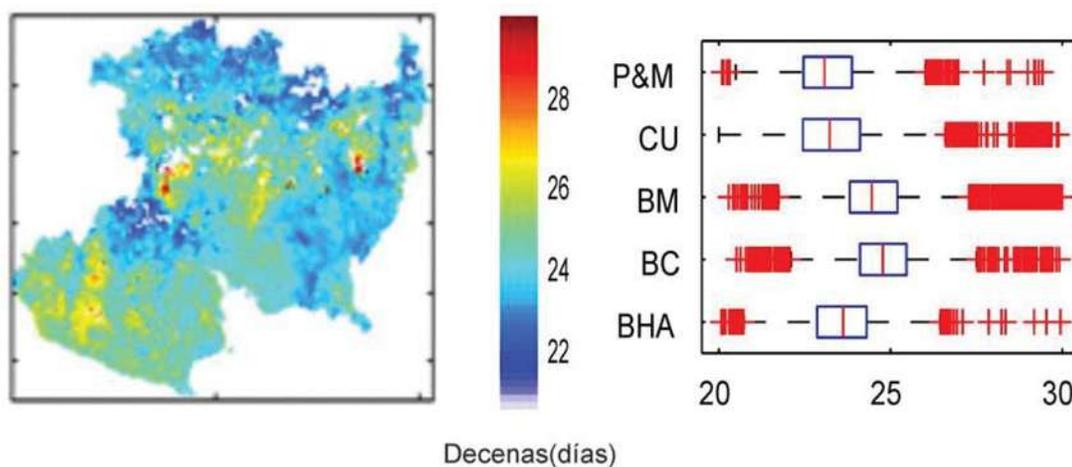


Figura VI.6. Distribución espacial de la variables fenológica *Mitad de estación* para el año 2000. P&M: pastizal y matorral, CU: cultivos, BM: bosque mixto, BC: bosque de coníferas y BHA: boque de hoja ancha.

En relación a la distribución espacial de los tipos de vegetación en el estado, se observa que los cultivos, las zonas de pastizal-matorral y los bosques de hoja ancha, que tienen las estaciones más cortas, llegan primero a la mitad de la estación, alrededor de la decena 24 (finales del mes de agosto), mientras que los bosques de coníferas y mixtos, con estaciones más largas, llegan después, alrededor de la decena 25 (principios de septiembre).

Espacialmente, los valores tardíos se corresponden con las cadenas montañosas, y los valores más tempranos aparecen en la región centro-occidente del estado, en parte de la Depresión del Balsas y las zonas correspondientes al Altiplano Mexicano.

Mínimo. Expresa el valor promedio de los valores mínimos izquierdo y derecho, en el periodo estudiado (Fig. VI.7). Los valores más altos son de poco más de 3 y los valores mínimos son 0, es decir, no hay hojas.

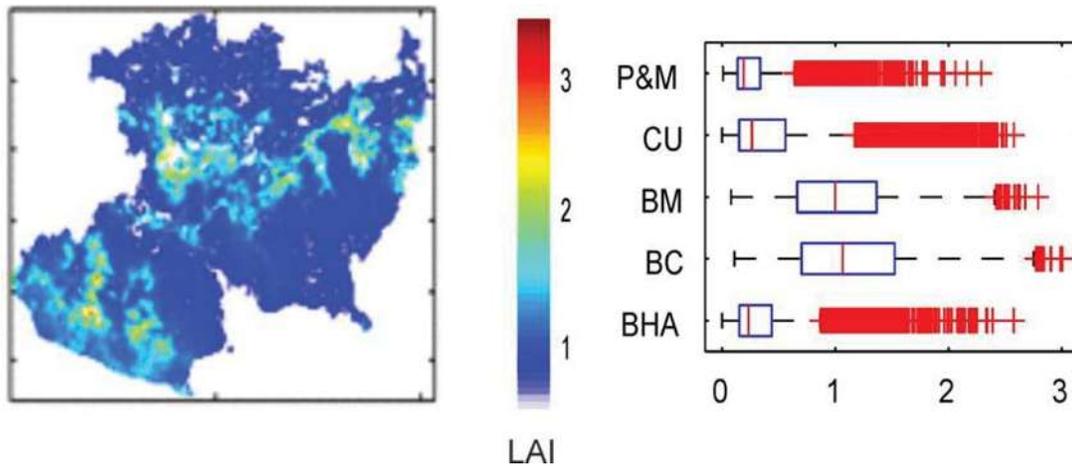


Figura VI.7. Distribución espacial de la variables fenológica *Mínimo* para el año 2000. P&M: pastizal y matorral, CU: cultivos, BM: bosque mixto, BC: bosque de coníferas y BHA: boque de hoja ancha.

Esta variable muestra el mayor contraste en su distribución para las clases del mapa INF2000. Los bosques de coníferas y bosques mixtos alcanzan los valores más altos y con el rango de valores más amplio, lo cual resulta lógico por tratarse de vegetación con componentes perennes; las variaciones estacionales se deben principalmente a la vegetación de sotobosque. Los valores más bajos, incluso nulos, corresponden a las selvas bajas de la región de la Depresión del Balsas y el Altiplano Mexicano, vegetación que pierde completamente las hojas durante la temporada seca. Los cultivos presentan también valores bajos, pero con un rango más amplio, que se explica por la diversidad de esta clase, en la que se encuentran tanto zonas de agricultura de riego como de temporal.

Máximo. Se refiere al valor máximo de LAI alcanzado durante la estación de crecimiento (Fig. VI.8). Está dada en unidades de LAI y para la región de estudio presenta valores que van desde 1 hasta poco más de 5.

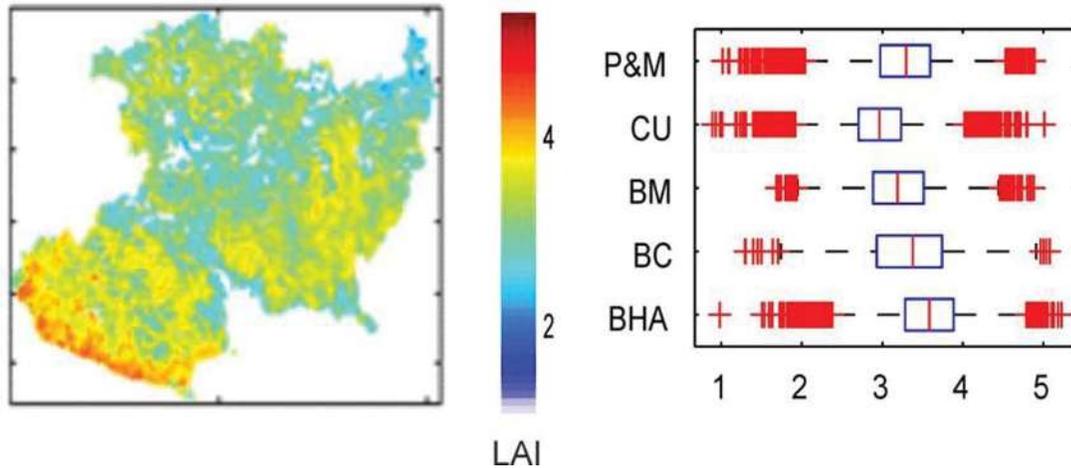


Figura VI.8. Distribución espacial de la variables fenológica *Máximo* para el año 2000. P&M: pastizal y matorral, CU: cultivos, BM: bosque mixto, BC: bosque de coníferas y BHA: boque de hoja ancha.

En relación a los tipos de vegetación del mapa INF2000, los bosques de hoja ancha presentan los máximos más altos, con valores cercanos a 3.6, seguidos por las áreas de pastizal-matorral, los bosques de coníferas y los bosques mixtos, apenas unas décimas abajo, entre 3.3 y 3.5. La clase cultivos es la que presenta los valores más bajos, pero próximos al resto con 3.2.

Espacialmente, los valores más bajos de LAI máximo corresponden a puntos muy pequeños y específicos, en el norte y en el centro del estado. Los valores más altos, en cambio, se concentran principalmente en la costa, y en las áreas de bosques de hojosas.

Amplitud de estación. Corresponde a la diferencia entre los valores de LAI mínimo y máximo de la estación de crecimiento y expresa el contraste entre la estación seca y la estación húmeda. (Fig. VI.9). Su rango de valores en la región de estudio va de casi 0 a casi 5, estando mayoritariamente entre 1.5 y 3.8.

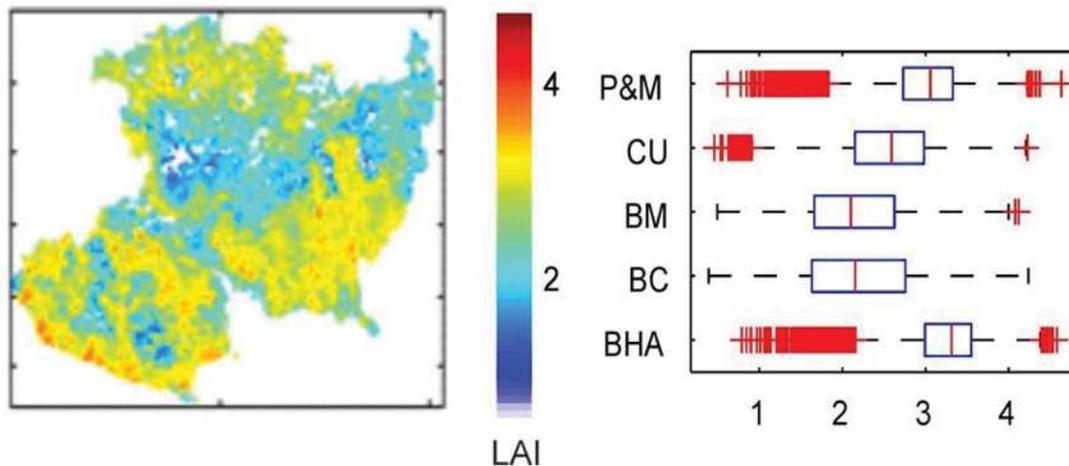


Figura VI.9. Distribución espacial de la variables fenológica *Amplitud* para el año 2000. P&M: pastizal y matorral, CU: cultivos, BM: bosque mixto, BC: bosque de coníferas y BHA: boque de hoja ancha.

Su relación con los tipos de vegetación depende claramente del carácter perenne o caducifolio de las especies dominantes en cada caso. El bosque de hoja ancha se separa del resto de clases, con los valores más altos, entre 3 y 3.6. Con valores ligeramente más bajos se encuentran las áreas de pastizal-matorral. Después están los cultivos, con valores entre 2.8 y 3. Finalmente los valores más bajos corresponden a los bosques de coníferas y mixtos, si bien presentan una distribución de valores más amplia.

Espacialmente, los valores más bajos parecen corresponder a áreas puntuales en las partes altas de las cadenas montañosas, que pueden ser las zonas con mayor humedad a lo largo del año, lo que implica la presencia de vegetación perenne, lo que les lleva a presentar pocos cambios en sus valores de LAI.

Derivada Izquierda. Es una estimación del ritmo de cambio en el LAI durante el periodo de crecimiento (Fig. VI.10), y sus unidades son (incremento de LAI)/tiempo.

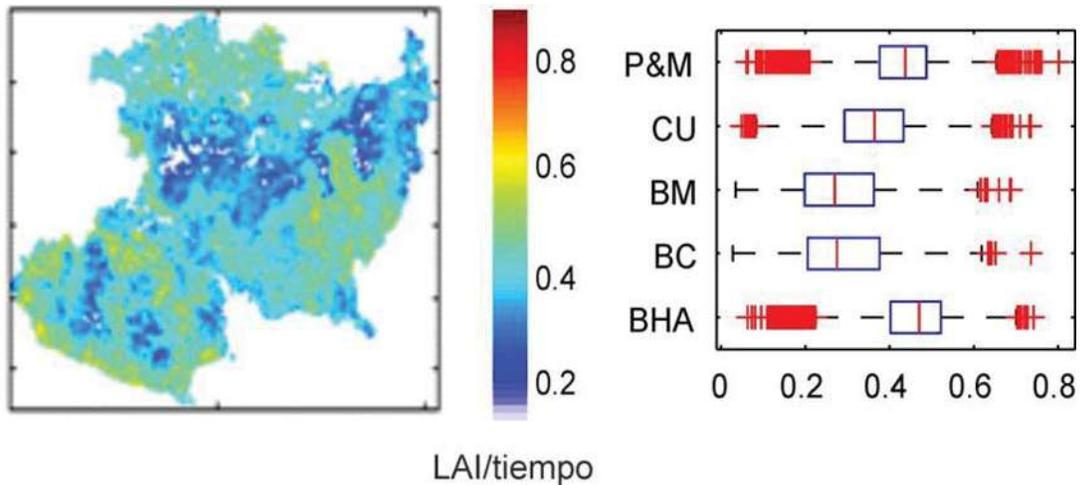


Figura VI.10. Distribución espacial de la variables fenológica *Derivada izquierda* para el año 2000. P&M: pastizal y matorral, CU: cultivos, BM: bosque mixto, BC: bosque de coníferas y BHA: bosque de hoja ancha.

Para la región de estudio el rango de valores va desde 0 hasta 0.8 y presenta una variación asociada al tipo de vegetación. Los bosques de hoja ancha presentan el crecimiento más rápido, con valores distribuidos alrededor de 0.5, seguidos por el pastizal-matorral con valores ligeramente menores, y los cultivos. Los valores más bajos corresponden a los bosques de coníferas y mixtos, ambos con valores alrededor de 0.3, con una distribución ligeramente más extendida. Se esperaba que los cultivos hubiesen presentado valores más altos, sin embargo, quizás por la naturaleza de estos (al ser áreas de temporal, con cultivos de maíz, principalmente, en sistemas no intensivos) en el contexto del área de estudio, resultaron en el tercer lugar.

Espacialmente, los valores más bajos de esta variable corresponden con las cadenas montañosas y los más altos se encuentran en la costa, es decir, los lugares más fríos y más cálidos, respectivamente.

Derivada Derecha. Estima el ritmo en el decremento del LAI al final de la estación de crecimiento (Fig. VI.11). Sus unidades están dadas en (decremento de LAI)/Tiempo. Para la región de estudio se obtuvo un rango de valores entre 0 y 0.6.

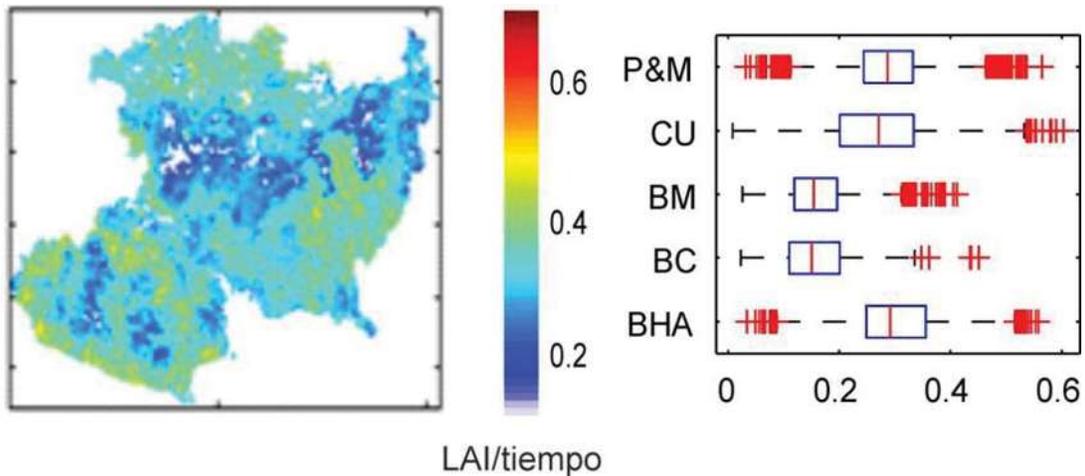


Figura VI.11. Distribución espacial de la variable fenológica *Derivada Derecha* para el año 2000. P&M: pastizal y matorral, CU: cultivos, BM: bosque mixto, BC: bosque de coníferas y BHA: bosque de hoja ancha.

Su relación con la distribución de los tipos de vegetación separa los datos en los 2 grupos. Por un lado se encuentran los bosques de hoja ancha, los cultivos y el pastizal-matorral, con disminución promedio de LAI superior a 0.3, siendo los cultivos los que presentan la distribución más amplia; por otro lado están los bosques de coníferas y mixtos, con una disminución de LAI en promedio inferior a 0.2.

Espacialmente, las zonas con valores más altos se concentran en la Depresión del Balsas y algunos puntos localizados en el Altiplano Mexicano. Los valores más bajos coinciden con las cadenas montañosas del estado.

Integral Extendida. Estima el área bajo la curva que forma la estación de crecimiento (Fig. VI.12). Corresponde a las unidades de LAI acumuladas durante la estación de crecimiento, incluyendo el LAI “basal” o ya existente, y da una idea de la biomasa foliar. Sus unidades están dadas en LAI acumulado, Para la región de estudio el rango de valores va de cercanos a 10 hasta poco más de 100, estando la mayoría entre 30 y 70.

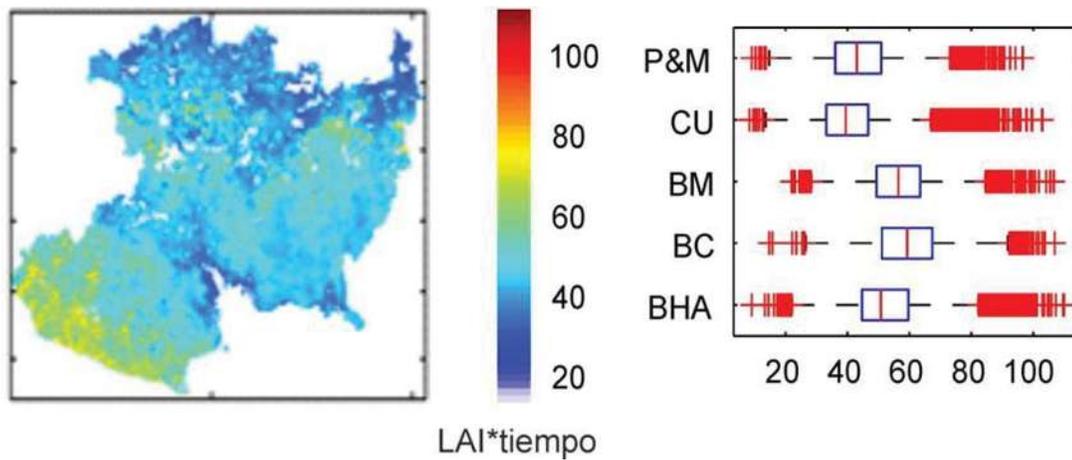


Figura VI.12. Distribución espacial de la variable fenológica *Integral extendida* para el año 2000. P&M: pastizal y matorral, CU: cultivos, BM: bosque mixto, BC: bosque de coníferas y BHA: bosque de hoja ancha.

Los valores más grandes de esta variable se encuentran en los bosques, empezando por los de coníferas, seguidos de cerca por los mixtos y finalmente los de hoja ancha. Las zonas de matorral-pastizal y agrícolas presentan valores más bajos.

Especialmente los valores más altos corresponden a la zona frente a la costa y algunas estribaciones montañosas y los más bajos se encuentran en las partes más bajas de la Depresión del Balsas y en Altiplanicie Mexicana.

Integral corta. Esta variable, al igual que la anterior, estima unidades de LAI acumuladas, pero en este caso no se incluye el nivel de base (Fig. VI.13). Para la región de estudio el rango de valores va de cerca de 10 hasta cerca de 80, aunque la mayoría están entre 20 y 60.

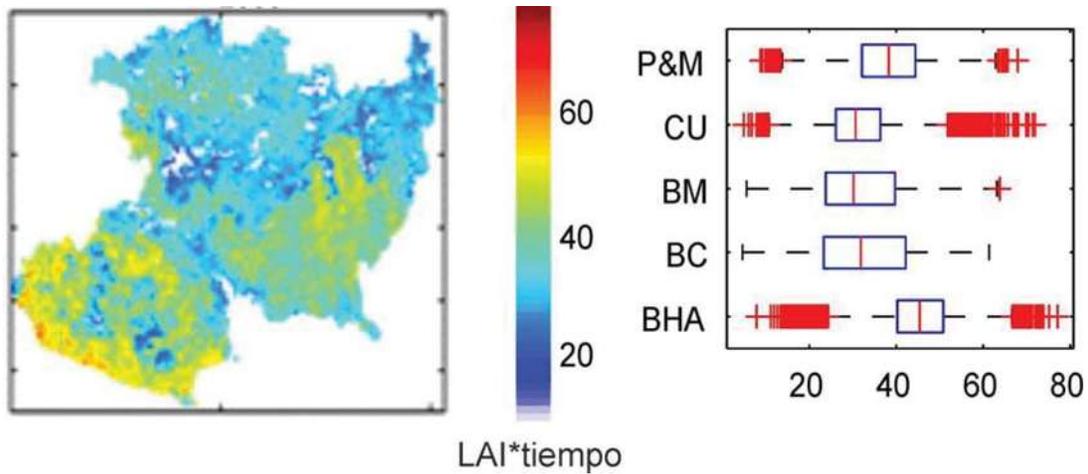


Figura VI.13. Distribución espacial de la variable fenológica *Integral corta* para el año 2000. P&M: pastizal y matorral, CU: cultivos, BM: bosque mixto, BC: bosque de coníferas y BHA: bosque de hoja ancha.

Los bosques de hoja ancha son los que presentan la mayor producción anual de biomasa, seguidos por el matorral-pastizal. Los cultivos y los bosques de coníferas y mixtos tienen valores más bajos, pero los bosques presentan una distribución más amplia. Especialmente, los valores más altos se concentran en la región de la costa y los valores más bajos se encuentran en la parte baja de la Depresión del Balsas y en las partes altas de las cadenas montañosas.

En las Fig. VI.14 y VI.15 se puede apreciar más claramente el comportamiento fenológico de cada grupo de vegetación.

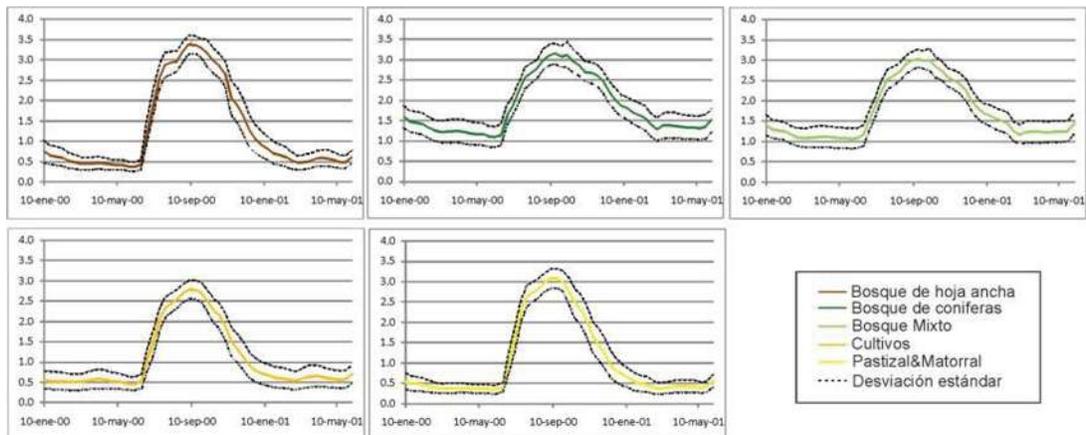


Figura VI.14. Perfiles temporales de LAI promedio, de la serie CYCLOPES para los 5 principales tipos de vegetación en la región de estudio en el año 2004.

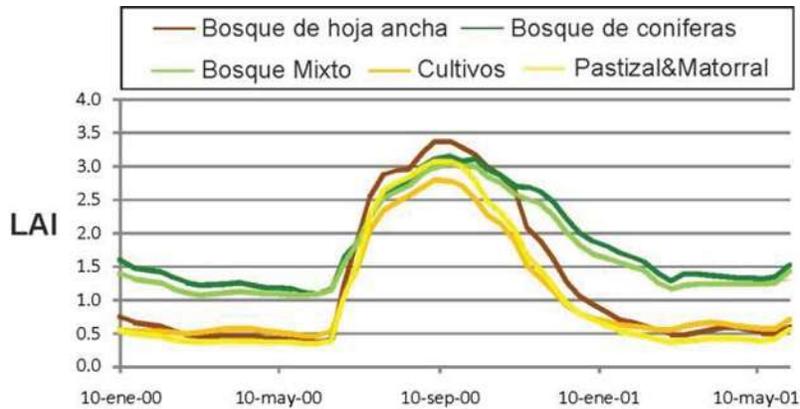


Figura VI.15. Perfiles temporales agregados de los principales tipos de vegetación.

Los cultivos representan la clase más heterogénea, ya que incluyen desde agricultura de temporal hasta huertas de frutales. Comienzan la estación de crecimiento casi al mismo tiempo que los demás grupos de vegetación natural con hojas no perenes, pero la terminan antes. Los valores de LAI mínimo y máximo son bajos y la amplitud es intermedia. Los ritmos de incremento y decremento presentan valores intermedios. Es el tipo de vegetación que acumula menos LAI, si bien la producción anual es en promedio similar a la de los bosques de coníferas y mixtos.

Los pastizales y matorrales presentan un comportamiento fenológico muy parecido al de la agricultura, en cuanto al inicio, final, mitad y longitud de la estación de crecimiento. El mínimo de LAI también es bajo, pero el máximo es mayor y también la amplitud. Los ritmos de incremento y decremento de LAI son los más altos después de los bosques de hoja ancha. Esta clase comparte con los cultivos los valores más bajos en de LAI acumulado total, pero los segundos a nivel anual, después de los bosques de hoja ancha.

Los bosques de coníferas y los bosques mixtos inician la estación de crecimiento más tarde y la terminan más tarde, con lo que presentan la estación más larga. Ambos registran los mínimos más altos de LAI y máximos intermedios, y por lo tanto las amplitudes más bajas, con los ritmos de inicio y fin de temporada más lentos. En definitiva, y por tratarse de vegetación perenne, presentan un comportamiento estable a lo largo del año, con una estación de

crecimiento poco marcada. Son reservorios de superficie foliar, aunque no los principales a nivel anual. En general, estos dos grupos comparten muchas características, lo que les hace casi indistinguibles desde el punto de vista fenológico (ver Fig. VI.15), por lo que en lo subsecuente se les considerará como una sola clase, denominada “bosque de hoja perenne” (BHP).

Los bosques de hoja ancha inician un poco antes la estación de crecimiento, pero la terminan antes que los cultivos, y los pastizales y matorrales. Por conformarse mayoritariamente de especies de hoja caduca, el mínimo de LAI es muy bajo; sin embargo el máximo es el mayor de todos los tipos de vegetación (principalmente en la zona de la costa, donde el clima es muy cálido y húmedo y predominan las selvas medianas) y también la amplitud. Es la vegetación que presenta el ritmo de crecimiento más rápido al inicio de la temporada, y un alto ritmo de decremento al final, junto con los cultivos y los pastizales y matorrales. Todo esto explica que sea el tipo de vegetación que acumula más LAI a lo largo del año. Por oposición a los bosques de hoja perenne, en adelante se denominarán “bosques de hoja caduca” (BHC).

VI.2.5.2 Análisis de componentes principales

Se calcularon los componentes principales (programa Matlab) y se obtuvieron los factores que se muestran en el Cuadro VI.3, estos son los multiplicadores para los valores originales de cada variable que dan como resultado el valor del componente principal.

Cuadro VI.3. Factores obtenidos para la construcción de los 5 primeros componentes principales de las variables originales, en negrita, el mayor coeficiente y sus correspondientes variables

Variables originales	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
1. Inicio de estación	0.045	-0.026	-0.773	-0.2806	-0.264
2. Fin de estación	0.361	-0.2904	-0.136	0.1993	-0.282
3. Longitud de estación	0.339	-0.279	0.262	0.3462	-0.148
4. Mínimo	0.421	-0.020	0.072	-0.5169	0.318
5. Mitad de estación	0.284	-0.128	-0.512	0.4148	0.360
6. Máximo	-0.064	-0.467	-0.003	-0.3815	0.297
7. Amplitud	-0.341	-0.349	-0.052	0.0608	0.010
8. Derivada izquierda	-0.338	-0.305	-0.041	-0.2414	-0.379
9. Derivada derecha	-0.413	-0.055	-0.131	0.2086	0.570
10. Integral extendida	0.251	-0.410	0.149	-0.1655	0.167
11. Integral corta	-0.159	-0.463	0.064	0.2097	-0.105

La Fig. VI.16 muestra un diagrama de Pareto para la varianza explicada por cada uno de los primeros cinco componentes principales y la varianza acumulada. Los tres primeros parámetros retienen casi el 90% de la varianza, y los cinco primeros, casi el 100%. Los primeros 5 componentes conservan casi toda la información original y pueden utilizarse en lugar de las 11 variables originales.

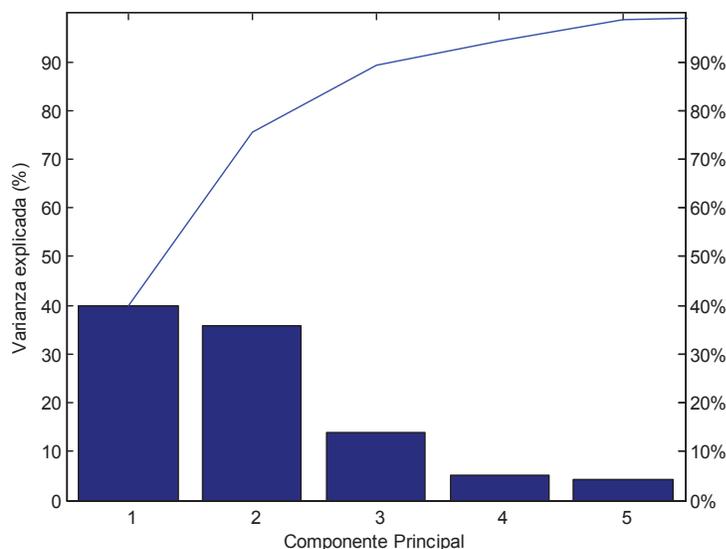


Figura VI.16. Gráfico de Pareto con la varianza que explica cada componente y acumulada

Las variables fenológicas que contienen la información más relevante, asociadas a los factores con mayor valor absoluto del primer componente principal, PC1, que concentra cerca del 40% de la varianza de los datos, son: el *Mínimo*, la *Derivada derecha* y el *Final de estación*.

Los factores del segundo componente principal (PC2), que representa alrededor del 35% de la varianza, muestran que las variables más discriminantes son *Máximo*, *Integral corta* e *Integral extendida*. Los factores del componente principal (PC3), que representa alrededor del 10% de la varianza, tienen a su vez como las variables de más peso *Inicio de estación*, *Mitad de estación* y *Longitud de estación*, todas ellas con una fuerte influencia del clima.

VI.2.5.3 Construcción del mapa CYCL2000

La Fig. VI.17 muestra el mapa de vegetación CYCL2000, obtenido según la metodología propuesta, a partir de los datos LAI de la serie CYCLOPES del año 2000, considerando cuatro tipos de vegetación: cultivos (CU), pastizales y matorrales (P&M), bosques de hoja perenne (BHP), que agrupan a los bosques de coníferas y los mixtos, y bosques de hoja caduca (BHC), denominación que sustituye a la de bosques de hoja ancha (BHA); las zonas urbanas y los cuerpos de agua no son considerados.

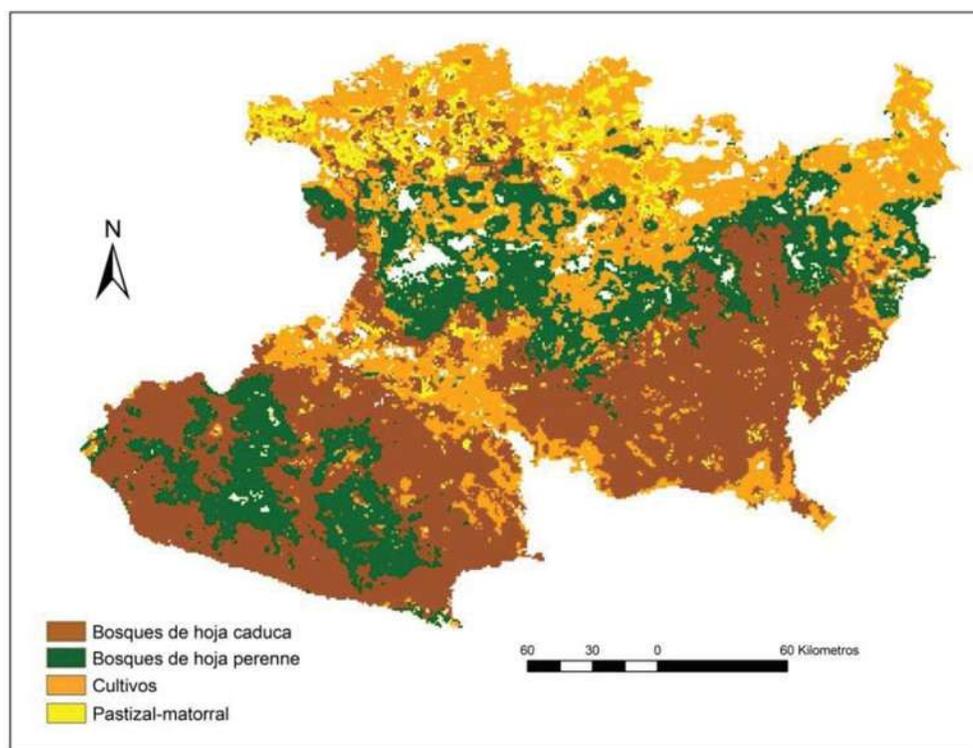


Figura VI.17. Mapa de vegetación CYCL2000. Las áreas sin color dentro del mapa corresponden a las zonas sin información fenológica debido a problemas de huecos o bien a objetos sin fenología (cuerpos de agua y zonas urbanas)

VI.2.5.4 Comparación con el mapa INF2000

En el Cuadro 3.4 se muestra la matriz de confusión entre el mapa INF2000 y el mapa de vegetación obtenido a partir de la información fenológica de los datos CYCLOPES, CYCL2000. Los valores en el cuadro corresponden al número de píxeles. A partir de esta matriz es posible analizar cuantitativamente

las relaciones que fueron observadas anteriormente en el análisis de las variables fenológicas y la similitud con el mapa de referencia (INF2000). Para hacer la comparación, en el mapa INF2000 se consideran las mismas clases que en el CYCL2000, es decir: CU, P&M, BHP (que reúne BC y BM) y BHC (que sustituye a BHA).

Cuadro VI.4. Matriz de confusión entre el mapa INF2000 y el mapa CYCL2000.

INF2000	Mapa CYCL2000 (# pixeles)				
	BHC	BHP	CU	P&M	Total
Bosques de hoja caduca (BHC)	15,423	1,230	2,096	507	19,256
Bosques de hoja perenne (BHP)	1,744	9,256	1,455	42	12,497
Cultivos (CU)	3,300	2,059	10,827	1,019	17,205
Pastizal-matorral (P&M)	4,368	699	3,351	1,717	10,135
Total	24,835	13,244	17,729	3,285	59,093
Exactitud Productor (%)	80.09	74.07	62.93	16.94	
Exactitud Usuario (%)	62.10	69.89	61.07	52.27	
Exactitud Total (%)					62.99

La exactitud total del mapa obtenido alcanza casi el 63%, lo que implica un desempeño apenas modesto. El análisis más detallado del Cuadro VI.4 muestra que la clase de vegetación mejor identificada desde el punto de vista del productor, es el bosque de hoja caduca (BHC) con una $E_p=80.09\%$; sin embargo, su exactitud del usuario ($E_u=62.1\%$) resultó modesta. La causa es la inclusión en esta clase de áreas que corresponden en realidad a pastizal-matorral (P&M) (17.6% de la superficie identificada por CYCL2000 como BHA) y cultivos (CU), principalmente. Por otra parte, no incluyó áreas que fueron identificadas como cultivos (CU) y bosques de hoja perenne (BHP), en menor medida (11% y 6% de la superficie de BHC en INF2000 respectivamente). Como se vio anteriormente, estas tres clases comparten algunas características fenológicas, en particular el ritmo de decremento de LAI al final de la estación de crecimiento, que es una de las variables más discriminantes detectadas por el ACP.

Los bosques de hoja perenne (BHP), por su parte, son la segunda clase mejor identificada desde el punto de vista del productor ($E_p=74.07\%$), y la mejor

exactitud de usuario obtenida para todas las clases ($E_u=69.89\%$). Los errores estuvieron asociados a la inclusión de áreas de CU (15% de la superficie identificada por CYCL2000 como BHP) y de BHC (9% de la superficie identificada por CYCL2000 como BHP). Los errores de omisión, por otra parte, se dieron al excluir áreas que se clasificaron como BHC (14% de la superficie en INF2000 para la clase BHP) y CU (12% de la superficie en INF2000 para la clase BHP).

Los cultivos (CU) tuvieron desempeños similares desde el punto de vista del productor y del usuario ($E_p=64.82\%$ y $E_u=61.07$). Los errores de comisión se dieron al incorporar erróneamente áreas de pastizal-matorral (P&M) (19% de lo reportado para esta clase por CYCL2000) y de BHC, principalmente, aunque también incorpora erróneamente píxeles de BHP (8% de lo reportado para esta clase por CYCL2000). Sus errores de omisión están asociados también con BHC (19% de la superficie de INF2000 para esta clase) y BHP, principalmente.

Finalmente, el desempeño más pobre fue obtenido por la clase P&M, que alcanzó una E_p de sólo 16.94%. Los errores de omisión más graves se dieron al no incluir importantes superficies que fueron erróneamente clasificadas como BHC y CU (en conjunto 76% del total de P&M en el mapa de referencia). La exactitud del usuario para esta clase también resultó modesta, con sólo 52.27%, confundándose con CU (31% de los píxeles identificados como esta clase en realidad corresponden a CU) y BHC (15% del total clasificado como P&M en realidad es BHA), principalmente. Esta clase comparte con CU muchas de sus características fenológicas, en algunos casos como en la derivada derecha, su distribución de valores queda completamente contenida dentro de la de CU. A su vez ambas presentan traslapes en la distribución de las variables fenológicas con BHC.

VI.2.6 CONCLUSIONES

En este capítulo se analizaron los patrones fenológicos contenidos en los datos CYCLOPES para el año 2000 y se compararon con la distribución de clases de cobertura vegetal del mapa INF2000, en una versión simplificada de 5 clases de vegetación (descontando cuerpos de agua y zonas urbanas por

estar fuera del contexto fenológico). Con respecto a las clases consideradas en el capítulo I, se analizaron separadamente los bosques de coníferas y los mixtos, con la esperanza de distinguir las zonas perturbadas. Sin embargo, se observó que presentan un comportamiento fenológico muy similar, por lo que se decidió reagruparlas nuevamente en una sola clase, que por su perfil fenológico se denominó “bosques de hoja perenne” (BHP). Por analogía, la clase “bosques de hoja ancha” fue renombrada como “bosques de hoja caduca” (BHC).

Se propuso una metodología para derivar un mapa de vegetación (con las clases generales identificadas) a partir de la información fenológica extraída de la serie CYCLOPES, para el año 2000. La comparación de este mapa (CYCL2000), con el mapa INF2000, de referencia, permitió establecer el nivel de exactitud que se puede esperar de los mapas de cobertura generados con la serie de tiempo. Se consideraron los estimadores de exactitud total (ET), exactitud del productor (Ep) y exactitud del usuario (Eu).

Los resultados fueron modestos, con una ET de 62.99%. Los bosques de hoja caduca fueron mejor identificados (Ep=80.09%, Eu=62.1%), seguidos de los bosques de hoja perenne (Ep=74.07%, Eu=69.89%) y los cultivos (EP=62.93%, Eu=61.07%). En el marco general de este estudio, la identificación de los bosques de hoja perenne es particularmente interesante por su relación con los procesos de deforestación.

Si bien los resultados no pueden considerarse muy buenos, son aceptables dado el bajo nivel de resolución de los datos y la complejidad del área de estudio. En general, superan a los mejores obtenidos con otros mapas construidos también con datos de baja resolución, como se vio en el capítulo I, si bien estos productos por su naturaleza, no contaban con información de apoyo que les permitiese mejorar su exactitud. También en este caso se encuentran dificultades similares para separar los cultivos de otras clases, como los matorrales y pastizales.

VI.2.7 Anexo 2.1. Descripción del LAI

LAI (Índice de área foliar por sus siglas en inglés) es una variable clave que depende del clima y las características fisiológicas de la cubierta vegetal (Matteuci, 1998) (Fig. A.VI.2.7). Se define como la relación entre la mitad del área del follaje con respecto a la superficie de terreno bajo el (Myneni et al., 2002). Al ser las hojas el medio por el cual se realiza el intercambio energético, de agua y de gases entre la vegetación y la atmósfera, abre la posibilidad de utilizarlo para describir patrones fenológicos propios de cada tipo de vegetación (Scurlock *et al.*, 2001). Por fenología entendemos las relaciones entre el crecimiento biótico y el ambiente, la fenología vegetal es específicamente el estudio de los patrones en el crecimiento vegetativo y su declinación. Estos patrones de crecimiento estacional son relevantes para el monitoreo a largo plazo de los efectos del cambio climático en la biósfera (O'Connor *et al.*, 2008).

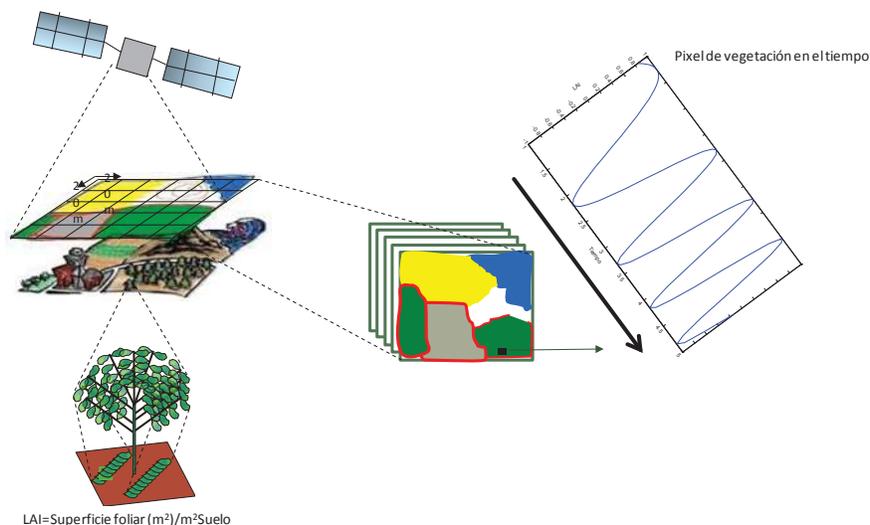


Figura A.VI.2.1.. Esquema del índice de área foliar y su comportamiento hipotético sobre el tiempo.

Las formas más exactas de medirlo implican procesos destructivos, solo viables en pequeña escala, por ello se han desarrollado métodos indirectos que utilizan relaciones alométricas, con variables relacionadas a inventarios forestales, en el caso de especies arbóreas, que dependen fuertemente de la especie vegetal y de las condiciones locales (Le Dantec *et al.*, 2000) y métodos ópticos que emplean la transmisión de la luz como variable indirecta (Jonckheere

et al., 2005), junto con una gran variedad de dispositivos (Breda, 2003), que presentan diferentes ventajas o desventajas dependiendo del contexto y alcance de los estudios.

A nivel regional, el único método disponible para evaluarlo es mediante el uso de técnicas de teledetección, aprovechando la significativa correlación que existe entre el LAI y las diferentes combinaciones de la razón NIR/RED, siendo NIR la reflectancia en el infrarrojo cercano (725 a 1100 nm) y RED la reflectancia en el rojo (550 a 680 nm) (Matteucci, 1998). La correlación anterior existe porque la clorofila absorbe radiación en las bandas rojas del espectro electromagnético y porque la radiación en el infrarrojo cercano es dispersada, reflejada o transmitida por la estructura interna de las hojas. La función más común de entre NIR y RED se denomina NDVI por sus siglas en inglés (Normalized Difference Vegetation Index), $NDVI = (NIR-RED)/(NIR+RED)$ (Chuvienco, 1996), pero existen muchas propuestas que pueden ser aplicadas en distintos contextos (Baret and Guyot, 1991). Al final, se establecen ecuaciones de regresión múltiple entre LAI estimado por algún método directo en sitios de control, en distintos tipos de vegetación, y los índices de vegetación estimados para esas áreas, lo que lleva a la estimación posterior del LAI para regiones completas.

VI.2.8 Anexo 2.2. Análisis de los huecos en la serie de tiempo CYCLOPES en el estado de Michoacán

VI.2.8.1 Introducción

La región de Michoacán se caracteriza por una gran diversidad ecológica, producto de la configuración física de su territorio, que le hace uno de los estados más accidentados de México (Bocco *et al.*, 1996), con notables eminencias y depresiones. Al limitar al suroeste con el océano Pacífico, se añade otro factor que lleva al desarrollo de patrones climáticos complejos. El efecto del relieve sobre el comportamiento climático, particularmente las nubes y la lluvia, ha sido bien documentado para el caso de México (Miranda and Hernández, 1963). Las grandes cadenas montañosas y su distribución geográfica sobre el territorio mexicano, constituyen el factor de mayor peso en la distribución de regiones ecológicas y climáticas (García, 1989).

Es de esperarse una alta incidencia de huecos en los compuestos de 10 días del proyecto CYCLOPES durante el periodo de lluvias, que para toda la región se concentran en los meses de verano y una relación de estos con la altitud. El potencial de la información obtenida por los sensores remotos se ve frecuentemente obstaculizado por estas circunstancias (Verger *et al.*, 2011), por lo cual, se han desarrollado varias propuestas para recuperar la información (Colditz *et al.*, 2008), (Fraser *et al.*, 2009). Particularmente Colditz (2008), señala que en series de tiempo, las interpolaciones en el tiempo resultan ser la estrategia más sencilla y eficiente, pues cada pixel no necesariamente está relacionado con los pixeles vecinos, al poder darse los casos de que representen objetos discontinuos en el espacio geográfico, por lo que debe de ser la información contenida en el mismo pixel a lo largo del tiempo, lo que de la pauta para la recuperación de la información.

Con el objetivo de caracterizar el comportamiento de los huecos en la serie de datos CYCLOPES para el caso de esta región, se analizó la relación entre estos y la altitud, confirmando el peso del relieve en la formación de patrones bioclimáticos.

VI.2.8.2 Materiales y Métodos

Descripción fisiográfica del área de estudio

Michoacán es un estado de la República Mexicana que se localiza en el centro occidente del país. En el área de estudio convergen 5 grandes unidades naturales: la Planicie Costera, la Sierra Madre del Sur, la Depresión del Balsas, el Sistema Volcánico Transversal y la Altiplanicie Mexicana.

Describiendo la conformación del espacio a partir del océano Pacífico aparece primero la Planicie Costera, que es una franja angosta formada por materiales fluviales, limitada al norte por la Sierra Madre del Sur, sumamente accidentada y formada predominantemente por rocas sedimentarias calizas y metamórficas, que alcanza altitudes sobre el nivel del mar de poco más 2700 m (INEGI, 1985).

La Depresión del Balsas, es un vasto espacio intermontano entre la Sierra Madre del Sur y el Sistema Volcánico Transversal, con cambios de altitud notables, que en las partes más bajas alcanzan altitudes menores a 200 m. Conforme se avanza al norte, comienzan las estribaciones del Sistema Volcánico Transversal, constituido por rocas ígneas extrusivas acumuladas a lo largo de sucesivos episodios volcánicos. La parte más elevada se alcanza en el Tancítaro, a casi 4000 msnm. Finalmente, en la parte septentrional del Sistema Volcánico Transversal se localiza la altiplanicie Mexicana, una región formada de planicies separadas por algunas eminencias, en algunas clasificaciones fisiográficas se le llama también Bajío Michoacano (Bocco *et al.*, 1996). En su conjunto, uno de los rasgos más relevantes es la discontinuidad que desde el punto de vista altitudinal produce de la posición de la Depresión del Balsas, al separar a la Sierra Madre del Sur del Sistema Volcánico Transversal.

Proyecto CYCLOPES

Los datos empleados corresponden a los utilizados en el capítulo 2 de este trabajo

Modelo digital de elevación

Como modelo digital de elevación se utilizó el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) desarrollado INEGI en 2003 a partir de la cartografía escala 1:50,000 generada para el país desde hace 35 años. Consiste en la integración de los modelos digitales de elevación en formato *raster*, proporcionando las elevaciones del país, bajo unidades cartográficas consistentes y un marco de referencia vertical y horizontal uniforme (INEGI, 2009).

Para obtener los datos del estado de Michoacán, se obtuvieron las imágenes correspondientes en el servidor de INEGI y el polígono del estado en formato *shape* de ESRI con un sistema de proyección cónico conforme de Lambert adaptado para México. Se empleó el programa ERDAS para realizar el recorte de la información a la región de estudio (ERDAS, 2001). Se cambió el sistema de proyección a coordenadas geográficas con Datum WGS84 y se degradó la resolución espacial a 1km para adaptarlo al formato de la serie LAI de CYCLOPES.

Ubicación de huecos y su relación con la altitud

Con los datos LAI de la serie CYCLOPES se estableció el número de datos disponibles para cada pixel, esto se ilustró con un mapa. Cada fecha, corresponde a un compuesto de 10 días dentro de la serie en la versión de 5 años (1999-2003).

Para cada pixel se obtuvo su correspondiente dato de altitud del CEM adaptado al formato CYCLOPES. Se hicieron promedios de fechas sin datos por cada cota altitudinal y se expresaron como porcentajes del total de los datos. La relación se ilustró con un gráfico de caja y bigotes, en agrupaciones altitudinales de 100 m. La línea el centro de la caja representa la mediana, los límites inferior y superior de cada caja representan el 25 % y el 75% de los datos o el primer y tercer cuartil. Los datos considerados fuera de la distribución se muestran como marcas al exterior de las cajas.

Posteriormente, se obtuvo el histograma de altitudes del CEM para toda el área de estudio y en base a su distribución, se propuso una segmentación del

territorio que considerara la continuidad espacial de la altitud sobre el espacio, separando dos áreas, una de ellas con clara influencia del océano Pacífico. Se emplearon nuevamente gráficos de cajas y bigotes para ilustrar los resultados.

VI.2.8.3 Resultados y discusión

La Fig. A.VI.2.2.1 muestra la distribución espacial de la disponibilidad de datos sobre la región de Michoacán en los datos CYCLOPES como el número de imágenes en las que existen datos útiles. Las áreas verde oscuro, con valores de 180, representan pixeles con datos para el total de fechas en la serie de tiempo. Las áreas de color amarillo al rojo señalan las zonas con mayor incidencia de huecos. Se puede observar que éstos corresponden principalmente a las zonas con mayor altitud en el estado.

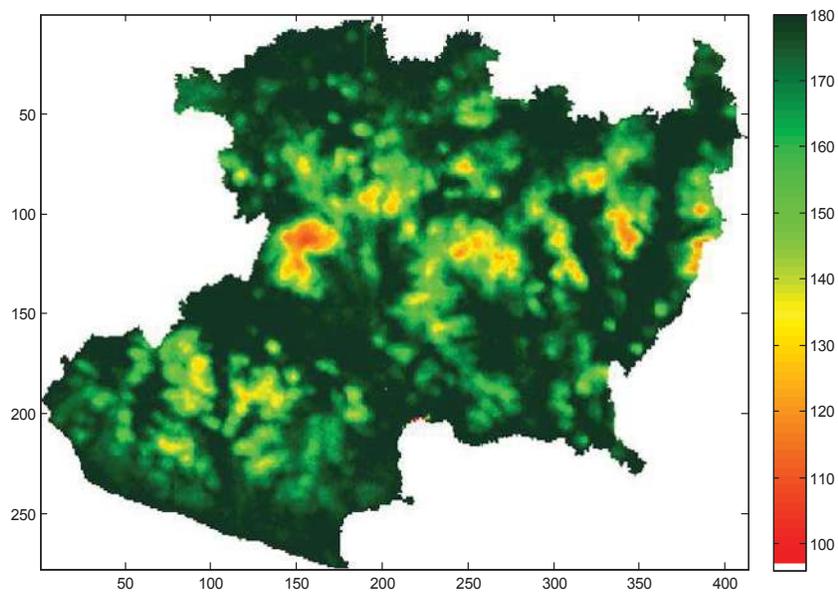


Figura A.VI.2.2.1. Distribución espacial de la disponibilidad de datos en el área de estudio.

Más del 50% de la región de estudio tienen al menos una fecha sin datos o hueco (un periodo de 10 días en los que no se pudo obtener un dato) a lo largo de la serie de tiempo. Las fechas sin datos se concentran en los meses de lluvias, entre junio y septiembre.

En la Fig. A.VI.2.2.2 podemos observar el comportamiento de la frecuencia promedio de los huecos, calculada como porcentaje del total de los datos con respecto de la altitud.

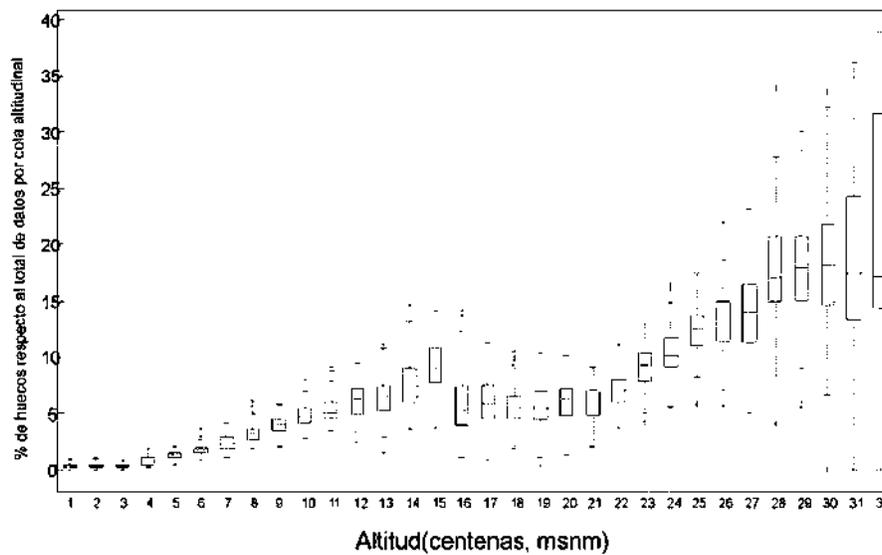


Figura A.VI.2.2.2. Distribución promedio de la frecuencia de huecos respecto a rangos de altitud como porcentaje del total de datos.

Es interesante notar que, para las cotas menores (de 1 hasta los 1500 msnm), la tendencia del promedio de huecos es clara con respecto a la altitud: hay muy pocas fechas sin datos y los huecos se incrementan y amplían su distribución conforme aumenta el rango altitudinal. A partir de la cota de los 1600 msnm, el tamaño de huecos disminuye bruscamente, rompiendo la tendencia, para continuar aumentando conforme se incrementa la altitud hasta la cota de los 3000 msnm, donde parece estabilizarse e incluso descender ligeramente.

En la Fig. A.VI.2.2.3 aparece el histograma de distribución de altitudes para la región de Michoacán, que muestra una distribución bimodal, los datos que corresponden de los 0 a los 1500 msnm integran justamente al primer grupo modal (G1), que abarca la zona costera y la depresión del Balsas. El segundo grupo modal (G2) abarca toda la meseta alta del norte del estado y las regiones de mayor elevación en las sierras de Coalcomán y Arteaga frente a la costa del Pacífico. Este efecto bimodal aparece por la ubicación en el área de estudio de

la Depresión del Balsas, que genera una discontinuidad en la distribución de la altitud en el espacio geográfico.

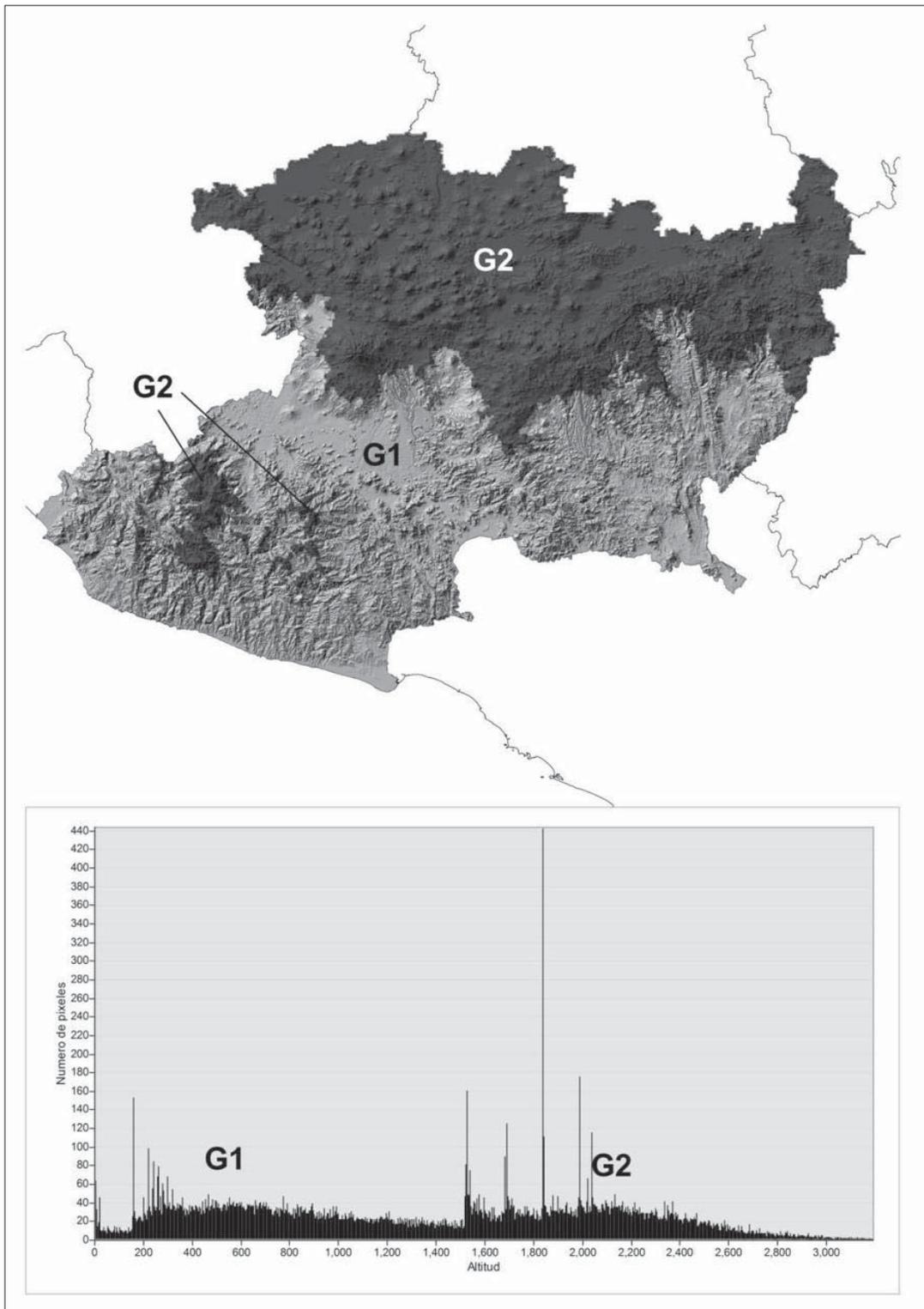


Figura A.VI.2.2.3. Distribución de altitud en el estado de Michoacán.

Al segmentar el área de estudio a partir de la distribución mostrada en el histograma de altitudes de la Fig. A2.2.3, fusionando los parches aislados de G2 en la Sierra Madre del Sur con G1, que en el conjunto forman un área bajo influencia directa del océano Pacífico con el que limitan al sureste, se obtienen los segmentos S1 y S2 (Fig. A2.2.4).

S1 abarca la Sierra Madre del Sur, la Depresión del Balsas y parte de las estribaciones al sur del Sistema Volcánico Transversal. S2 queda conformado por el Sistema Volcánico Transversal y la Altiplanicie Mexicana. Las dos graficas de distribución de los pares huecos-altitud muestran más claramente la relación con la altura, como se observa en la Fig. A2.2.4. El efecto de discontinuidad observado en la Fig. A2.2.2 desaparece.

S1 parece acusar una fuerte influencia de los efectos que pueda tener sobre el clima la vecindad con el océano Pacífico. La conformación del territorio en Michoacán, con la Depresión del Balsas aislando al Sistema Volcánico Transversal de la influencia de las corrientes de aire provenientes del océano Pacífico, parece tener un claro efecto en los cambios adiabáticos de temperatura del aire, que a su vez repercuten en la posibilidad de formación de nubes y la disposición de datos CYCLOPES.

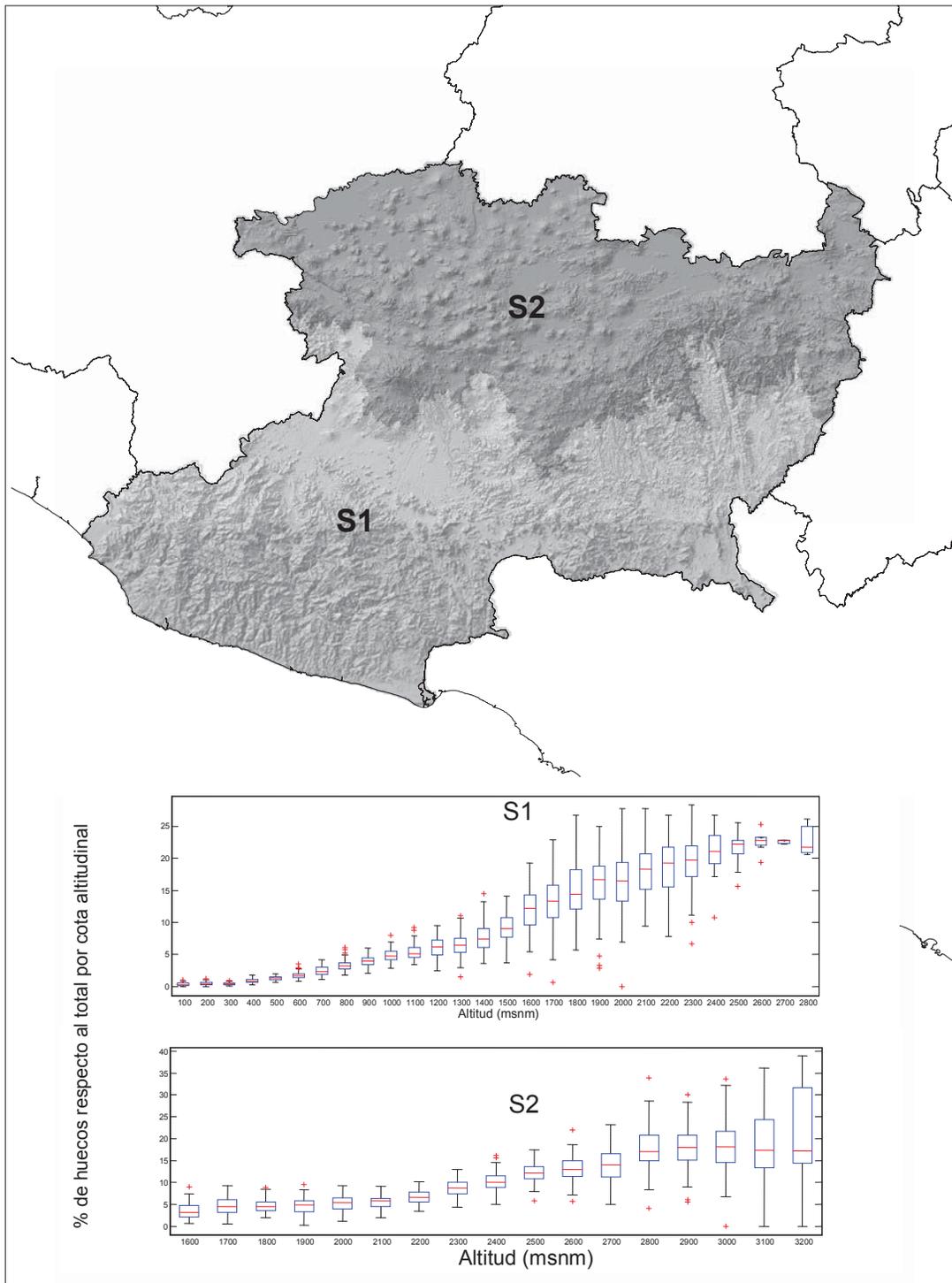


Figura A.VI.2.2.4. Segmentos altitudinales y frecuencia de huecos por segmento.

VI.2.8.4 Conclusiones

La distribución de la frecuencia de huecos respecto de la altitud en los datos LAI de CYCLOPES refleja el incremento en la incidencia de nubes como función de la altura, lo que determina la posibilidad de contar con información de mayor o de menor calidad para este tipo de condiciones.

Es de esperarse que, en condiciones similares a las del área de estudio, el patrón de nubosidad y por tanto la dificultad para obtener información sobre puntos particulares de la superficie, de manera sistemática desde sensores remotos, se incremente. En el caso de México esto puede ocurrir sobre la vertiente oeste de la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre del Sur, frente al Pacífico y en las vertientes al este de la Sierra Madre Oriental en el Golfo de México, donde de hecho, se esperaría que fuera aún más marcado este efecto, dado la mayor circulación de humedad, producto de la circulación general de la atmósfera.

La configuración orográfica de Michoacán y las particularidades climáticas derivadas de esta, generan limitaciones en el uso pleno del potencial que brinda el enfoque de series de tiempo derivadas de observaciones satelitales, en la investigación y monitoreo de la dinámica terrestre.

VI.2.9 REFERENCIAS

Baret, F., Guyot, G., 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assesment. *Remote Sensing of Environment*, 161-173.

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*.

Bocco, G., Mendoza, M., Maser, O., R, 2001. La dinámica del cambio de uso de suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 18-38.

Bocco, G., Velázquez, A., Mendoza, M., Torres, M.Á., Torres, A., 1996. Regionalización ecológica del estado de Michoacán. Centro de Ecología UNAM, Morelia.

Bontemps, S., Herold, M., Kooistra, L., van Groenestijn, A., Hartley, A., Arino, O., Moreau, I., Defourny, P., 2011. Revisiting land cover observations to address the needs of the climate modelling community. Biogeosciences Discuss, 7713-7740.

Breda, N.J.J., 2003. Ground based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. Journal of Experimental Botany 54, 2403.

Colditz, R.R., Conrad, C., Wehrmann, T., Schidt, M., Dech, S., 2008. TiSeG: A Flexible Software Tool for Time-Series Generation of MODIS Data Utilizing the Quality Assessment Science Data Set. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on 46, 3296-3308.

Correa, P., 1978. Atlas Geográfico del estado de Michoacán. EDDISA, Morelia.

Couturier, S., Vega, A., Mas, J., Tapia, V., López-Granados, E., 2008. Evaluación de confiabilidad del mapa del Inventario Forestal Nacional 2000: diseños de muestreo y caracterización difusa de paisajes. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, 20-38.

Chuvieco, E., 1996. Fundamentos de teledetección espacial. FAVE, Madrid.

Duda, T., Canty, M., 2002. Unsupervised classification of satellite imagery: choosing a good algorithm. International Journal of Remote Sensing 23, 2193-2212.

Eklundh, L., Jönsson, P., 2006. TIMESAT GUI.

ERDAS, 2001. ERDAS Imagine 8.4 Tour Guide.

Fraser, A.D., Massom, R.A., Michael, K.J., 2009. A method for compositing MODIS satellite images to remove cloud cover. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE 3, III-639

Gao, F., Morisette, J., Wolfe, R.E., Ederer, G., Jeff, P., Edward, M., Myneni, R., Tan, B., Joanne, N., 2008. An algorithm to produce temporally and spatially continuous MODIS-LAI time series. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 5, 60-64.

García-Mora, J.T., Mas, J., 2011. Evaluación de imágenes del sensor MODIS para la cartografía de la cobertura del suelo en una región altamente diversa de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 63, 83-94.

García, E.M., 1989. Apuntes de climatología. México D.F.

Garrigues, S., Lacaze, R., Baret, F., Morisette, J., Weiss, M., Nickeson, J.E., Fernandes, R.A., Plummer, S., Shabanov, N.B., Myneni, R.B., Knyazikhin, Y., Yang, W., 2008. Validation and intercomparison of global Leaf Area Index products derived from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research* 113.

Gobron, N., Pinty, B., Taberner, M., Mélin, F., Verstraete, M.M., Widlowski, J.L., 2006. Monitoring the photosynthetic activity of vegetation from remote sensing data. *Advances in Space Research* 38, 2196-2202.

Heumann, B.W., Seaquist, J.W., Eklundh, L., Jönsson, P., 2007. AVHRR derived phenological change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982-2005. *Remote Sensing of Environment* 108, 385-392.

INEGI, 1985. Síntesis Geográfica del estado de Michoacán.

INEGI, 2009. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Mex.

Jonckheere, I., Muys, B., Coppin, P., 2005. Allometry and evaluation of in situ optical LAI determination in Scots pine: a case study in Belgium. *Tree physiology* 25, 723.

Jönsson, P., Eklundh, L., 2004. TIMESAT a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences*, 833-845.

Kanungo, T., Mount, D.M., Netanyahu, N.S., Piatko, C.D., Silverman, R., Wu, A.Y., 2002. An Efficient k-Means Clustering Algorithm: Analysis and Implementation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 24, 881-892.

Le Dantec, V., Dufrêne, E., Saugier, B., 2000. Interannual and spatial variation in maximum leaf area index of temperate deciduous stands. *Forest Ecology and Management* 134, 71-81.

Le Page, Y., Oom, D., Silva, J.M.N., Jönsson, P., Pereira, J.M.C., 2010. Seasonality of vegetation fires as modified by human action: observing the deviation from eco-climatic fire regimes. *Global Ecology and Biogeography* 19, 575-588.

Mas, J.F., Velázquez, A., Couturier, S., 2009. La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación ambiental* 1, 23-39.

Mas, J.F., Velázquez, A., Palacio-Prieto, J.L., Bocco, G., Peralta, A., Prado, J., 2002. Assessing forest resources in Mexico: Wall to wall land use/cover mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 10, 966-968.

Matteuci, S., 1998. El análisis regional en la ecología. *Ecología Regional*, Congreso de la Sociedad Argentina de estudios Geográficos, Agenda Geográfica para el siglo XXI.

Miranda, F., Hernández, X., 1963. Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Boletín de la Sociedad Botánica Mexicana*.

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.

O'Connor, B., Dwyer, N., Cawkwell, F., 2008. Satellite remote sensing as a tool for monitoring vegetation seasonality. In: Society, R.S.a.P. (Ed.), *Proceedings of the remote sensing and photogrammetry society conference*, University of Exeter.

Palacio-Prieto, J.L., Bocco, G., Velázquez, A., Mas, J.F., Takakai Takakai, F., Victoria, A., Luna-González, L., Gómez-Rodríguez, A., Mayorga-Saucedo, R., González-Medrano, F., 2000. La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del Inventario Forestal Nacional 2000. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM (nota técnica)*, 183-203.

Perry, J.P., 1991. *The pines of Mexico and Central America*. Timber Press, Portland, Oregon.

Reed, B.C., Schwartz, M.D., Xiao, X., 2009. *Remote Sensing Phenology*

Phenology of Ecosystem Processes. In: Noormets, A. (Ed.). Springer New York, pp. 231-246.

Sáenz-Romero, C., Guzmán-Reyna, R.R., Rehfeldt, G.E., 2006. Altitudinal genetic variation among *Pinus oocarpa* populations in Michoacán, Mexico: Implications for seed zoning, conservation, tree breeding and global warming. *Forest Ecology and Management* 229, 340-350.

Scurlock, J.M.O., Asner, G.P., Gower, S.T., 2001. Worldwide Historical Estimates of Leaf Area Index, 1932-2000. *NASA*, p. 34.

SEMARNAP, 1997. *Estadísticas del Medio Ambiente*. INEGI, México D.F.

Tan, B., Morisette, J., Wolfe, R.E., Gao, F., Ederer, G., Nightingale, J., Pedelty, J.A., ERT, I.L., MD, USA, 2011. An Enhanced TIMESAT Algorithm for Estimating Vegetation Phenology Metrics From MODIS Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 4, 361-371.

Verbesselt, J., Jonsson, P., Lhermitte, S., Aardt, J., Coppin, P., 2006. Evaluating satellite and climate data-derived indices as fire risk indicators in savanna ecosystems. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 44, 1622-1632.

Verger, A., Baret, F., Weiss, M., 2011. A multisensor fusion approach to improve LAI time series. *Remote Sensing of Environment* 115, 2460-2470.

Weiss, M., Baret, F., Garrigues, S., Lacaze, R., 2007. LAI and fAPAR CYCLOPES global products derived from VEGETATION. Part 2: validation and comparison with MODIS collection 4 products. *Remote Sensing of Environment* 110, 317-331.

VI.3 CAPITULO III Análisis de la deforestación en el estado de Michoacán a partir de la serie LAI-CYCLOPES (1999-2006)

VI.3.1 RESUMEN

A partir de la serie LAI del proyecto CYCLOPES (1999-2007), se calcularon 11 variables fenológicas por año (TIMESAT). Se analizó la variación interanual de cada variable con respecto a las condiciones ambientales (promedios mensuales de precipitación y temperatura), para distinguir las más dependientes de factores externos. Un análisis de componentes principales determinó que el *Mínimo de LAI*, la *Derivada derecha* y la *Derivada izquierda*, contienen la mayor cantidad de información. Se trata de variables que muestran una clara dependencia con la condición caducifolia o perennifolia de la vegetación. Se propuso una metodología para construir mapas de cobertura, comparables entre sí, a partir de un mapa de referencia (INF2000), considerando los principales tipos de vegetación (bosque de hoja perenne, bosque de hoja caduca, cultivos y pastizal-matorral). Se obtuvo un mapa por año, se compararon año con año para identificar las tendencias generales de cada tipo de cobertura. Se pudo constatar la disminución de la superficie de bosque de hoja perenne. Para estimar la deforestación en el estado de Michoacán durante el periodo 2000-2006, se identificaron los píxeles de bosque de hoja perenne que habían cambiado a otro tipo de cobertura. Se calculan 42,378 ha deforestadas, de las cuales 13,249 ha pasan a bosque de hoja caduca y 29,129 ha a cultivos o a pastizal-matorral. Los resultados fueron validados con imágenes de mayor resolución sobre una muestra de 10% de los píxeles de cambio. Se encontró una proporción de aciertos 71% considerando y 42% sin considerar los casos más ambiguos. El 84% de estos píxeles de cambio, se encuentran dentro de un área de 2 km alrededor de la clase cultivos. Esto se puede explicar por la baja resolución espacial, así como por la cercanía a zona de actividades humanas.

VI.3.2 SUMMARY

From the LAI series of the CYCLOPES project (1999-2007), eleven phenological variables were calculated per year (TIMESAT). Interannual variation of each variable was analyzed relative to environmental conditions (monthly averages of precipitation and temperature) in order to distinguish those more dependent on external factors. A principal component analysis revealed that Minimum LAI, Right derivative and Left derivative contained the greatest amount of information, showing clear dependency on the deciduous-perennial conditions of vegetation. A methodology was proposed to construct cross-comparable land cover maps based on a reference map using the general vegetation classes evergreen forest, deciduous forest, cropland and grassland-shrubland. Maps were obtained for each year and cross compared to identify general trends for each type of coverage. A decrease of the surface of evergreen forest was corroborated. In order to evaluate the extension of the deforestation processes in the state of Michoacan during the 2000-2006 time period, pixels of evergreen forest that were converted to other vegetation classes were identified. Deforestation was found to have occurred on 42,378 ha, of which 13,249 ha were converted to deciduous forest and 29,129 to cropland or to grassland-shrubland. These results were validated on a sample with 10% of the converted pixels using higher resolution images. An agreement of 71% was observed when including the most ambiguous cases, and of 42% when these were excluded. 84% of the converted pixels concentrated within 2 km from cropland areas, which may be explained by the low spatial resolution and by the proximity to human activity areas.

VI.3.3 INTRODUCCIÓN

En el contexto internacional de cambio climático y de cobertura vegetal en el planeta, cada vez es más urgente contar con herramientas de monitoreo de las superficies naturales (Kennedy *et al.*, 2009). Para ello es necesario disponer de datos confiables, uniformes, comparables, objetivos, de fácil acceso y análisis (Turner *et al.*, 2007). La alta frecuencia temporal de algunos satélites, ha abierto la posibilidad de estudiar la dinámica de la cobertura terrestre desde nuevos enfoques a partir de la construcción de series de tiempo (Lunetta *et al.*, 2006). Algunas series consisten en índices de vegetación, como el NDVI derivado de imágenes NOAA-AVHRR y más recientemente MODIS; otras series utilizan estimaciones de variables biofísicas (LAI, fAPAR, fCover) porque permiten obtener más información sobre procesos biológicos y son más estables. Es el caso de las series generadas en el proyecto CYCLOPES (Weiss *et al.*, 2007).

El objetivo de este capítulo es explorar el potencial de los datos de la serie LAI del proyecto CYCLOPES para el estudio de los procesos de deforestación en las regiones de bosques de hoja perenne. En la región de estudio, estas áreas están conformadas por especies de coníferas (*pinus*, *cupresus*, *abies*, *etc.*) y/o de encinos (*quercus*) con mayor o menor presencia de vegetación baja.

En el capítulo II se pudo observar que, si bien existen limitaciones con el enfoque fenológico para distinguir adecuadamente incluso los tipos más generales de vegetación, la exactitud que se alcanza es mejor que la asociada a otras metodologías que también utilizan datos de baja resolución (Capítulo I). En el caso concreto de BHP, alrededor del 70% de la superficie es clasificada correctamente, tomando como caso de estudio el año 2000 dentro de la serie. En este capítulo se amplía el periodo de estudio y se trabaja con la serie completa disponible, de 8 años (1999-2007).

El trabajo consta de dos etapas: en la primera se calculan con el programa TIMESAT las 11 variables fenológicas de cada uno de los 8 años de la serie. Los mapas obtenidos se analizan en relación con datos generales del clima local. En la segunda parte, se adapta la metodología propuesta en el capítulo II para construir mapas de vegetación a partir de las variables fenológicas y del mapa

de referencia INF2000, de tal forma que se puedan obtener mapas de cada año de la serie, que sean comparables entre sí. Para lograr esto se necesitaba que el mapa de referencia tuviera datos fenológicos asociados (y, más concretamente, componentes principales que se pudieran comparar con las componentes principales de cada año de la serie a clasificar). La metodología propuesta se basa en suponer que, si bien el mapa INF2000 fue elaborado con imágenes Landsat y una metodología distinta, se le pueden asociar las variables fenológicas calculadas a partir de los datos LAI-CYCLOPES 2000.

A partir del análisis comparativo de los mapas obtenidos, se discute de la dinámica de cambios en los bosques de hoja perenne en la región y periodo de estudio. Así mismo se evalúa el alcance del enfoque utilizado durante este trabajo con los datos LAI CYCLOPES en esta materia.

VI.3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

VI.3.4.1 Región de estudio

Corresponde a la descripción ya dada al principio de este trabajo.

VI.3.4.2 Mapa INF2000

Se toma como referencia el mapa INF2000, que ya fue descrito en el capítulo 2 de este trabajo. Se considera la leyenda descrita en la segunda parte de ese capítulo, con 4 clases generales de vegetación: BHC, BHP, CU y P&M (Fig. VI.18).

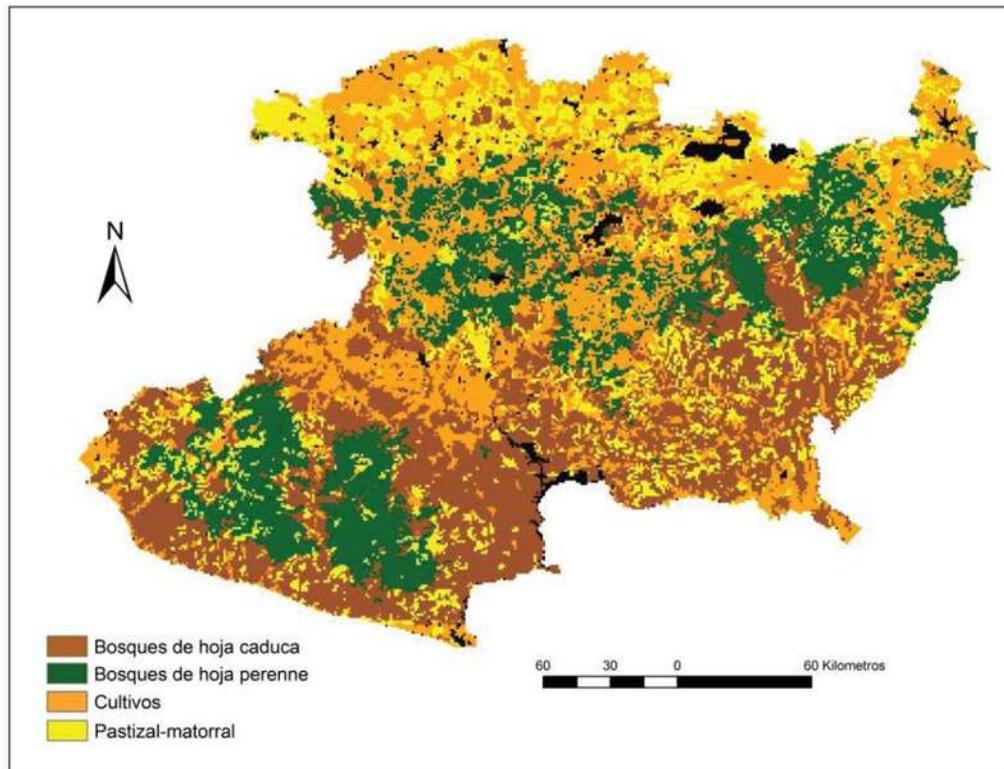


Figura VI.18. Mapa INF2000 simplificado a los 4 grupos de vegetación.

VI.3.4.3 Serie CYCLOPES 1999-2007

Se utilizó la serie completa de datos de LAI del proyecto CYCLOPES disponible a finales del 2010, que cubre el periodo 1999-2007.

VI.3.4.4 Datos climatológicos de la zona de estudio.

Con el fin de estudiar la variación interanual de cada variable fenológica en relación con las condiciones climáticas, se utilizaron valores promedios de precipitación y temperatura en la zona de estudio. Estos valores se calcularon a partir de los datos diarios registrados por la red de estaciones meteorológicas a cargo de CONAGUA en el estado, para el periodo de 1999 a 2006 (CONAGUA, 2010). Dicha información es pública y se puede solicitar a título personal en las oficinas de la dependencia. Para el estado de Michoacán se tienen registros de 100 estaciones distribuidas a lo largo del territorio.

A partir de los datos diarios se calcularon los promedios mensuales para todo el estado. Los resultados para la precipitación se muestran en el Cuadro VI.5 y la Fig. VI.19 y para la temperatura diaria observada en el Cuadro VI.6 y la Fig. VI.20).

Cuadro VI.5. Precipitaciones mensuales promedio de todas las estaciones en el estado de Michoacán (mm)

Mes/Año	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Ene	0.2	0.0	3.6	25.8	16.9	28.7	8.8	16.3
Feb	0.9	1.9	1.8	15.8	4.2	0.7	8.5	1.5
Mar	1.1	0.3	19.0	1.9	1.6	10.9	21.6	2.4
Abr	1.0	0.5	20.4	6.7	8.7	4.4	3.0	5.2
May	19.8	75.9	66.3	34.5	33.5	53.1	5.4	72.3
Jun	182.1	201.2	175.9	168.3	186.1	191.6	64.5	93.7
Jul	197.0	156.0	217.6	214.4	240.5	177.5	184.6	164.4
Ago	210.9	127.2	194.6	149.5	194.6	213.1	187.4	170.8
Sep	116.3	109.4	145.8	198.3	214.5	183.6	145.0	182.4
Oct	41.3	62.1	42.5	81.9	81.4	70.7	82.7	132.7
Nov	6.1	10.1	4.1	63.2	19.6	5.8	3.7	9.8
Dic	3.6	13.7	1.3	2.5	0.9	4.2	0.7	1.4
Total anual	780.32	758.23	892.82	962.84	1002.58	944.27	716.05	852.80

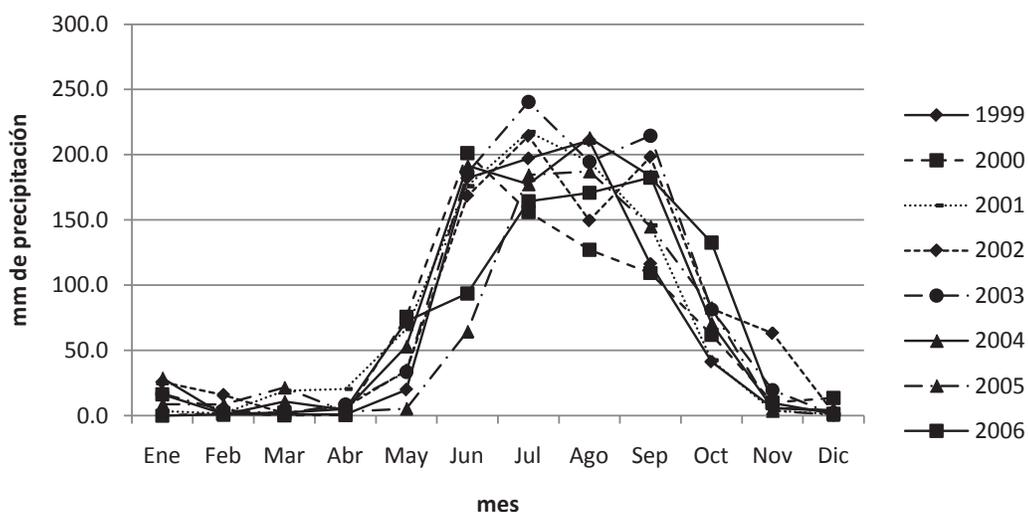


Figura VI.19. Precipitación mensual promedio de todas las estaciones en Michoacán por año

Los meses más lluviosos son de junio a octubre y corresponden a la estación de crecimiento de la vegetación. Los años más secos fueron 2005, 2000 y 1999, con un valor anual acumulado inferior a 800mm. En 2005 hay un retraso en la lluvia acumulada entre marzo y junio con respecto a los otros años, y se llega a julio con un valor inferior a los 200mm. En 1999 y 2006 se llega a este umbral justo a finales de junio, y en los otros dos años se supera durante este mes. Estos mismos años (1999, 2005, 2006) están por debajo del umbral de 400mm al llegar agosto y de los 600mm al final de este mes, junto con el año 2000. El año más lluvioso fue 2003 (que llegó a 1000mm), seguido de 2002, que presentó abundantes lluvias tardías al final de la estación, y 2004.

Cuadro VI.6. Promedios mensuales y promedio anual de las temperaturas diarias para el estado de Michoacán (grados centígrados)

Mes/Año	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Ene	8.6	8.9	9.4	8.0	9.0	7.7	8.0	8.0
Feb	11.1	10.1	10.8	10.3	8.9	6.8	9.9	9.4
Mar	13.0	12.1	11.2	12.1	10.2	11.1	9.9	11.6
Abr	14.8	13.6	14.4	14.5	12.9	12.3	13.1	13.2
May	16.2	15.6	15.0	16.3	15.2	14.3	14.2	14.9
Jun	17.0	16.2	15.6	15.9	15.4	14.8	16.3	16.1
Jul	16.3	15.4	15.2	15.3	14.3	14.2	15.6	16.1
Ago	15.8	15.1	15.1	14.8	13.9	14.3	15.3	15.6
Sep	15.7	15.2	14.9	15.0	14.7	14.1	14.5	15.5
Oct	13.6	14.1	13.5	13.8	13.1	13.5	13.3	14.8
Nov	10.6	12.2	10.2	10.8	11.0	9.9	10.5	12.3
Dic	8.7	9.4	9.7	9.2	6.7	7.9	8.5	9.3
Promedio anual	13.46	13.16	12.92	13.00	12.11	11.72	12.43	13.07

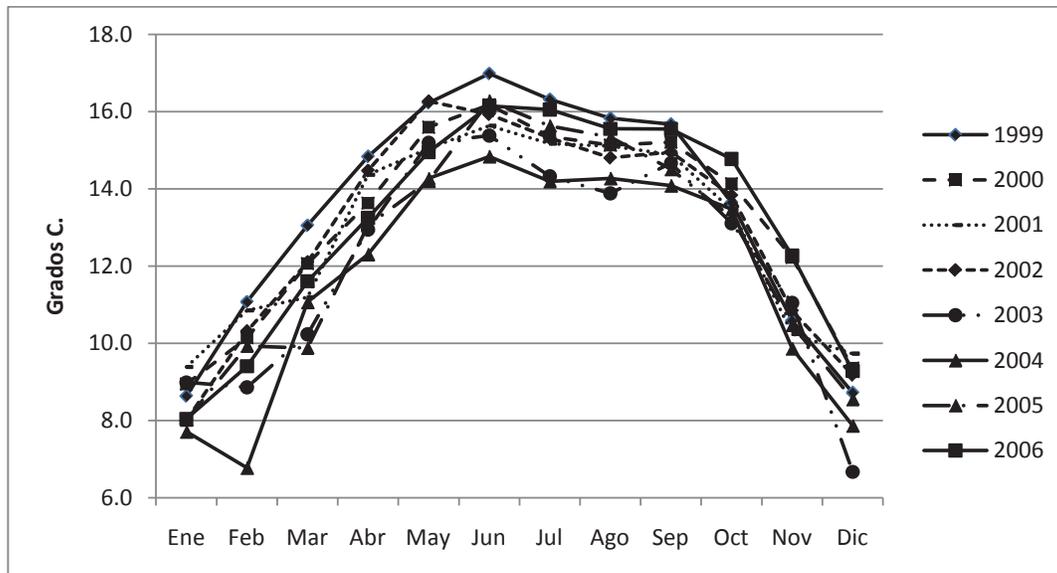


Figura VI.20. Promedios mensuales de las temperaturas diarias observadas por año en el estado de Michoacán

En la zona de estudio, la temporada más fría es de noviembre a febrero (por debajo de 10°C para todos los años de la serie) y la más cálida (por encima de los 14°C) entre mayo y septiembre. Los años más fríos fueron 2003 y 2004 y los más cálidos 1999 y 2000.

VI.3.4.5 Obtención de las variables fenológicas Algoritmo TIMESAT

El algoritmo TIMESAT se empleó para calcular, a partir de los valores de LAI, las variables fenológicas correspondientes a cada año de la serie, de la misma forma descrita en el capítulo 2, considerando los mismos valores de los parámetros de ajuste.

VI.3.4.6 Análisis de componentes principales

La obtención de los componentes principales se hizo en la forma descrita en el capítulo 2 de este trabajo.

VI.3.4.7 Construcción de los mapas CYLC1999-2006

Para cada píxel y cada año, se calculó la distancia euclidiana entre sus cinco primeros componentes principales y las del año de referencia, comparando

el valor de cada uno de las componentes principales del pixel objetivo con el valor del mismo componente principal de cada uno los pixeles del año 2000.

Estas distancias se ordenan de menor a mayor y se toman las 20 más pequeñas. Estas distancias son con respecto a pixeles del mapa de referencia, que pertenecen a cierta clase de vegetación. De estas clases, se le asigna al pixel objetivo la que más se repite (dada por la moda). Las veces que esa clase se repite (la frecuencia de la moda) se toma como un indicador de la certidumbre asociada a la clasificación del píxel.

VI.3.4.8 Análisis de los procesos de cambios en los bosques de hoja perenne.

Como un primer análisis, se comparó la cantidad de pixeles clasificados en cada tipo de vegetación en cada año. Posteriormente, se compararon los mapas por pares, para conocer los cambios de las áreas clasificadas como BHP, año a año: 1999-2000, 2000-2001, 2001-2002, 2002-2003, 2003-2004, 2004-2005 y 2005-2006.

Por otra parte, se construyeron mapas de frecuencia de clasificación por clase, esto es el número de veces que, a partir del primer año, cada pixel es clasificado en una clase particular. Las mayores frecuencias corresponden a pixeles muy estables, ya que a lo largo de la serie siempre fueron identificados en la misma clase, por lo que la probabilidad de que pertenezcan efectivamente a ésta, es alta.

Se consideró que los pixeles de bosque de hoja perenne con probabilidad de haber presentado cambios eran aquellos que, una vez que habían cambiado de clase, permanecieron en la nueva clase. Se analizó la distribución de la frecuencia de la moda promedio durante la serie, para cada pixel señalado como sospechoso de cambio con este criterio y para los pixeles que presentaron cambios de esta clase a otra en algún periodo, pero en forma intermitente o no permanente. Para lo anterior se empleo el gráfico de caja descrito en el capítulo II.

VI.3.4.9 Validación

Para validar la metodología propuesta para detectar las áreas de bosques de hoja perenne deforestadas en el periodo 2000-2006, se tomó una muestra al azar del 10% de los píxeles identificados como cambios, comparando visualmente los recortes correspondientes en imágenes satelitales de las mismas fechas, de mayor resolución. Para el año 2000 se utilizó como referencia el mosaico GeoCover CIRCA 2000 de la NASA (NASA, 2010) de 30m, producidos a partir de imágenes Landsat ETM+, y para el año 2006, imágenes SPOT de 10m, proporcionadas por la SEMAR, bajo el convenio ERMEXS-UMSNH 2010.

Se utilizó un criterio de lógica borrosa similar al propuesto por Woodcock (2000), para calificar los aciertos, considerando tres niveles de ambigüedad: 0 (sin duda bajo cualquier criterio), 1 (ambiguo, pero no lo suficiente para otra interpretación) y 2 (ambiguo y podría admitir otra interpretación). El resultado se presenta bajo dos criterios: Max, que considera solo los casos identificados como aciertos con ambigüedad 0 y 1 y Correcto, en el que se consideran todos los aciertos sin importar su ambigüedad. Se realizó un ejercicio similar de validación para los píxeles estables (aquellos que desde el año de inicio (1999) fueron identificados siempre como BHP), considerando también una muestra del 10% y la misma metodología.

Se analizó la correspondencia entre los valores del promedio de frecuencia en la moda y el éxito de las detecciones.

Con el fin de discutir las implicaciones de la cercanía a las áreas de aprovechamiento agrícola, se analizó la posición de los píxeles identificados como cambios, con respecto a un área de 2 km alrededor del borde de la clase cultivos en el mapa INF2000.

VI.3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

VI.3.5.1 Variables fenológicas en la región de Michoacán

Se obtuvieron las 11 variables fenológicas que ofrece TIMESAT para cada uno de los píxeles en el área de estudio. Los resultados por año y por variable se muestran en las figuras VI.21 a VI.31 y los comentarios con respecto al clima se refieren a las figuras IV.19 y IV.20.

Inicio de Estación. En la serie, la fecha más temprana es la decena 10 o principios de abril y la más tardía a mediados de julio, cuando se presentan las temperaturas más altas en la estación de crecimiento (Fig. VI.21). Es la variable que presenta mayores diferencias entre los años estudiados, lo que puede estar relacionado con una fuerte dependencia del clima.

Los años que de manera general en el estado iniciaron más tarde el crecimiento de la vegetación fueron 2005 y 1999, el más seco con un evidente retraso en el inicio de la temporada de lluvias y el más cálido, respectivamente. El año 2004, que es en promedio el más frío y uno de los más lluviosos, presenta un inicio muy temprano de la estación de crecimiento.

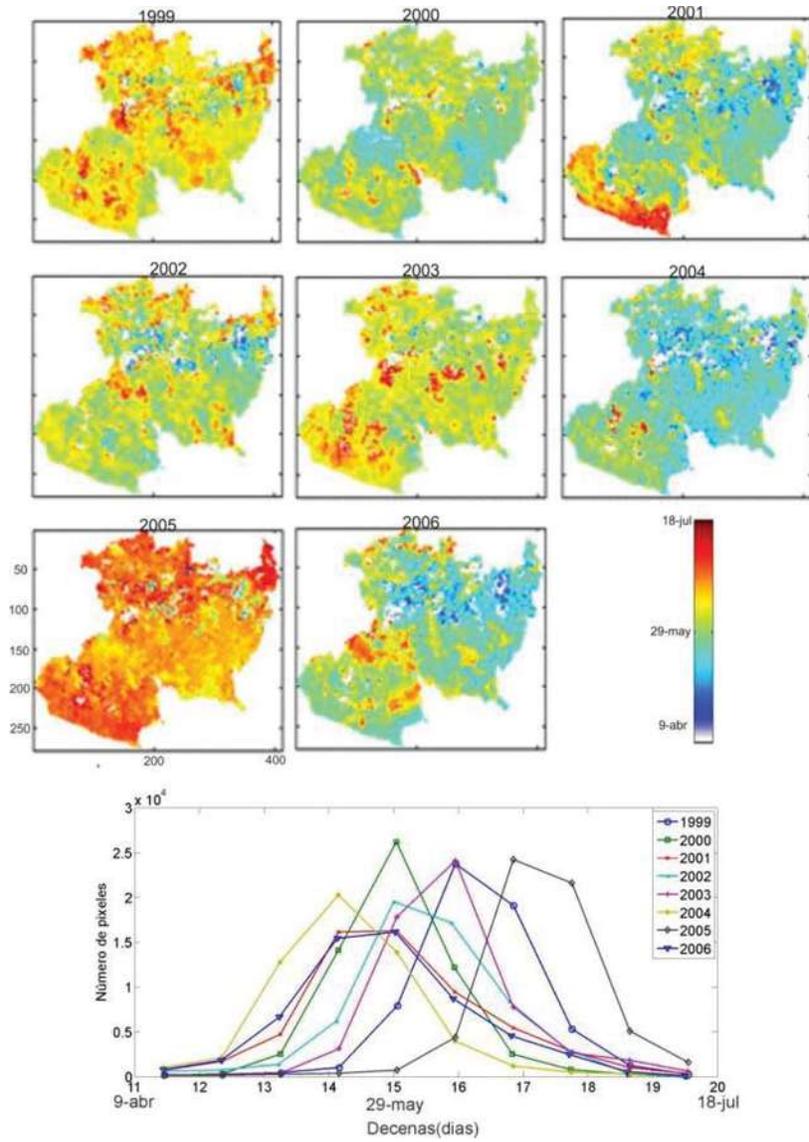


Figura VI.21. *Inicio de estación.* Distribución anual de la variable

Fin de Estación. Los valores se distribuyen desde mediados de octubre hasta mediados de mayo del año que sigue (el periodo de baja precipitación), de manera casi simétrica alrededor de mediados de diciembre. El comportamiento es bastante similar en todos los años (Fig. VI.22).

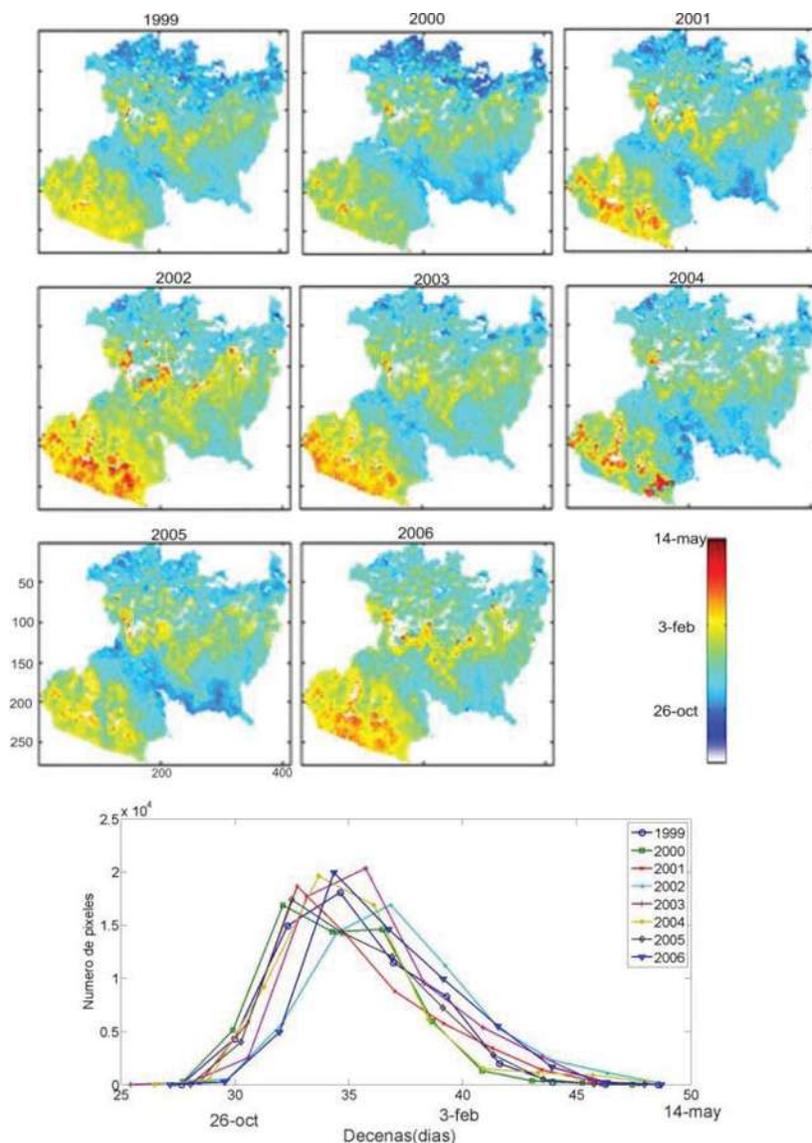


Figura VI.22. Fin de estación. Distribución anual de la variable (eje de ordenadas de los histogramas en número de píxeles)

Los años 2002 y 2006 son en general los que más tarde terminan la estación de verde y presentan otoños cálidos y húmedos. Por el contrario el año 2000, 2001 y 2004, con otoños secos y relativamente cálidos, presentan un temprano final de estación. En general se observa un desfase, especialmente marcado en algunos años como 2002, 2003, 2006, entre las zonas más húmedas, de la Sierra Costa y las cadenas montañosas, que retrasan al máximo el final de la estación verde, y las zonas más secas, en particular la Altiplanicie Mexicana al norte y la Depresión del Balsas.

Longitud de estación. La duración de la estación de crecimiento en el área de estudio varía entre 100 días, en las zonas más secas de la Depresión del Balsas y la Altiplanicie Mexicana, y más de 300 (es decir, prácticamente todo el año) en las zonas cálidas y húmedas de la costa. El año 2005, que fue especialmente seco, presenta la estación verde más corta, con la mayoría de valores alrededor de 150 días, seguido de 1999, en contraste con los años 2002 y 2006, presentan las estaciones más largas con poco más de 200 días (Fig. VI.23).

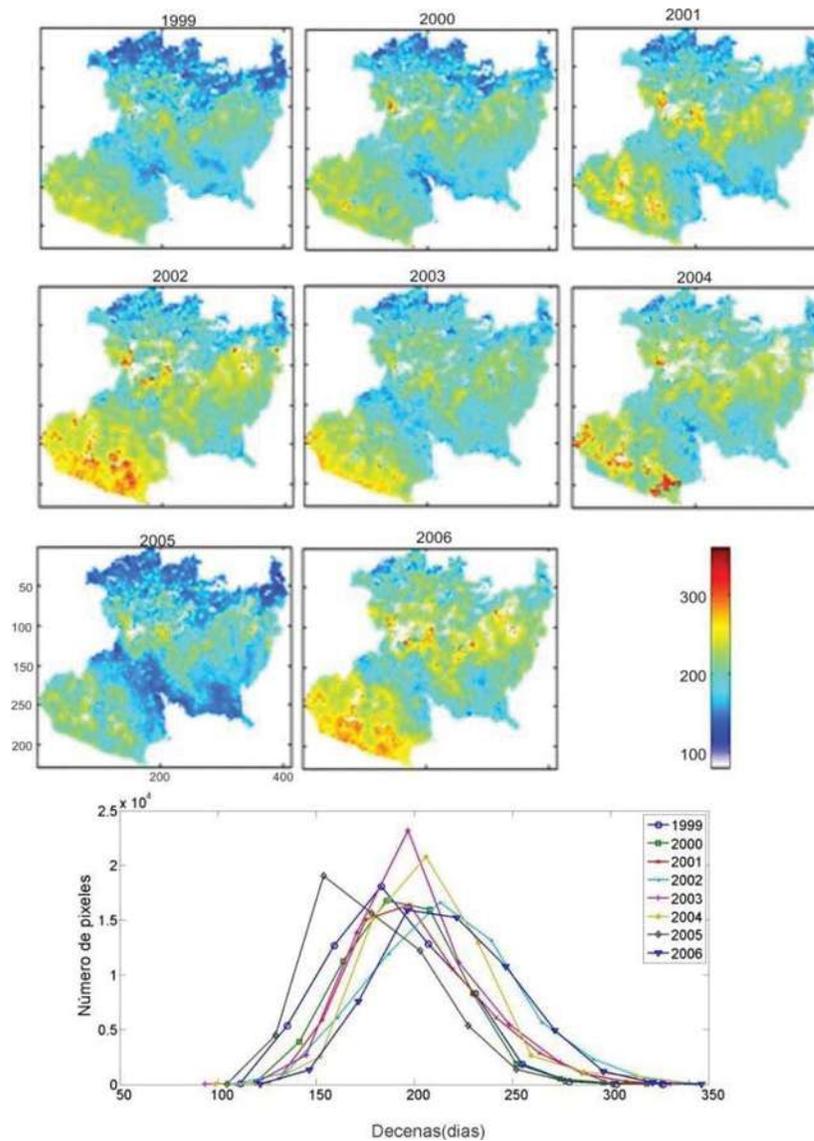


Figura VI.23. **Longitud de estación.** Distribución anual de la variable (eje de ordenadas de los histogramas en número de pixeles).

Mitad de estación. Varía entre mediados de julio y finales de octubre, ocurriendo mayoritariamente a principios de septiembre (Fig. VI.24). El año 2004, que presentó el inicio más temprano de la estación de crecimiento, es el primero en llegar a la mitad de la estación en la mayor parte del territorio, salvo en algunas zonas de montaña, mientras que el año 2005 es el último en ambos casos.

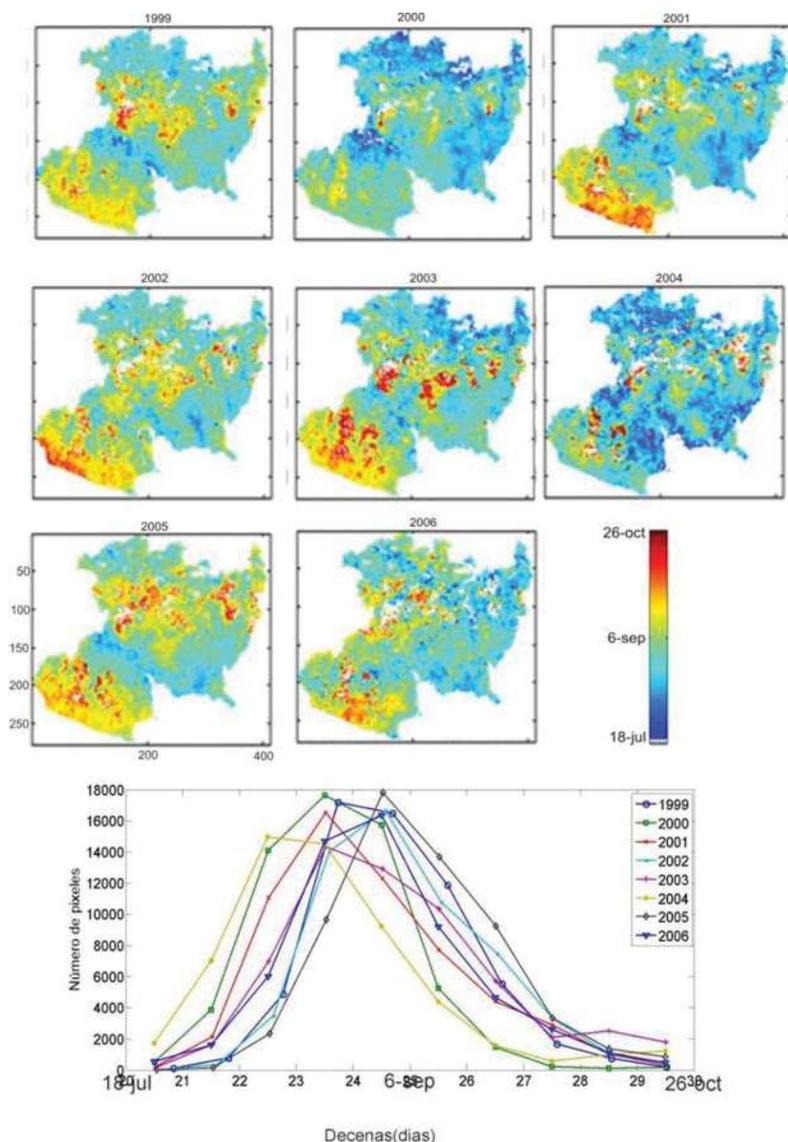


Figura VI.24. **Mitad de estación.** Distribución anual de la variable (eje de ordenadas de los histogramas en número de píxeles)

Mínimo. Los valores mínimos de LAI (Fig. VI.25) se distribuyen entre 0, para la mayor parte del territorio, que corresponde a vegetación caducifolia, y 3

en algunos puntos de las zonas montañosas con vegetación perenne y condiciones de humedad y temperatura que permiten que se mantenga una alta densidad de hojas todo el año. La variación interanual es poca.

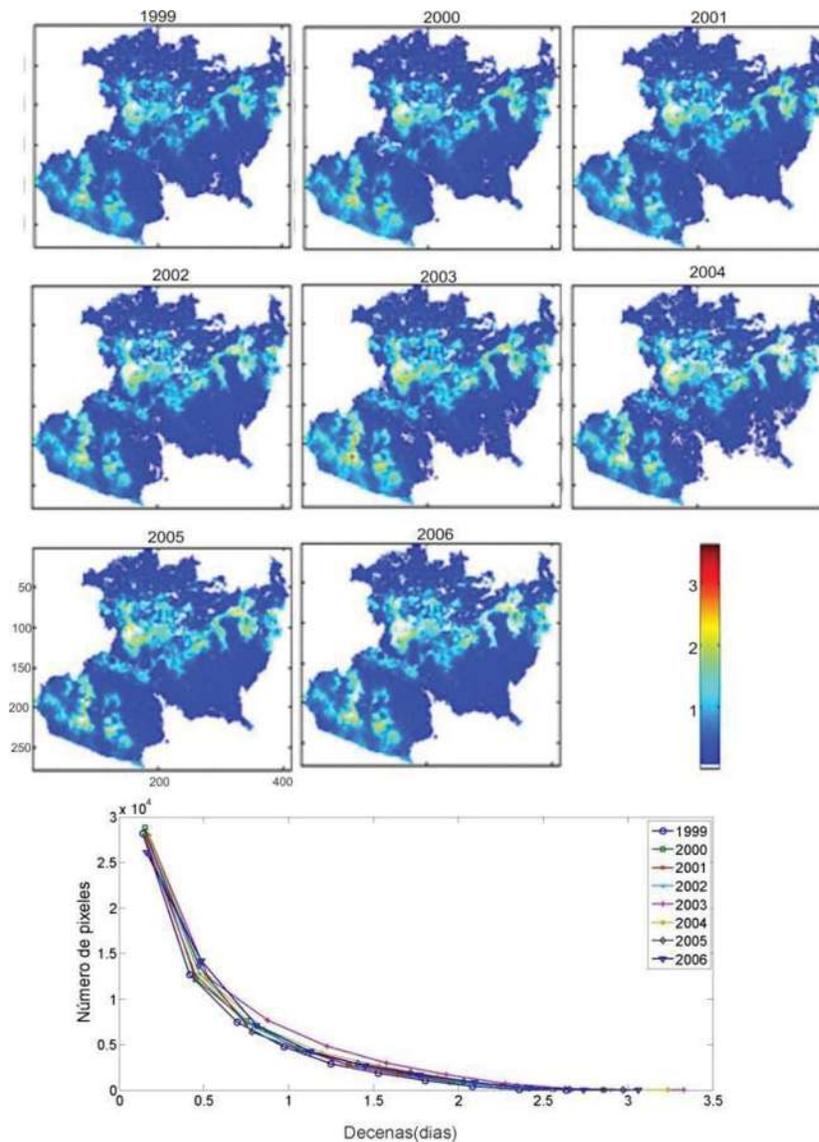


Figura VI.25. *Mínimo.* Distribución anual de la variable (eje de ordenadas de los histogramas en número de píxeles)

El año 1999 (que fue cálido y seco, con poca precipitación en invierno) presenta en general los valores más bajos, mientras que el 2003 (que fue el año más lluvioso, además de ser fresco y con inicio y final fríos) presenta los más altos.

Máximo. El máximo LAI en el área de estudio varía entre 0.5 y 5.5, distribuyéndose de manera casi simétrica alrededor de 3.2 (Fig. VI.26). Las zonas de vegetación caducifolia son las que presentan los valores más altos y también las mayores variaciones interanuales. Considerando el promedio en todo el territorio, el año 2001 presenta los valores más bajos y el 2005 los más altos. En términos absolutos, los valores más altos se dan en 2004 en la zona de la costa, y los más bajos en la parte más seca de la Depresión del Balsas, en 1999 y de 2001 a 2004.

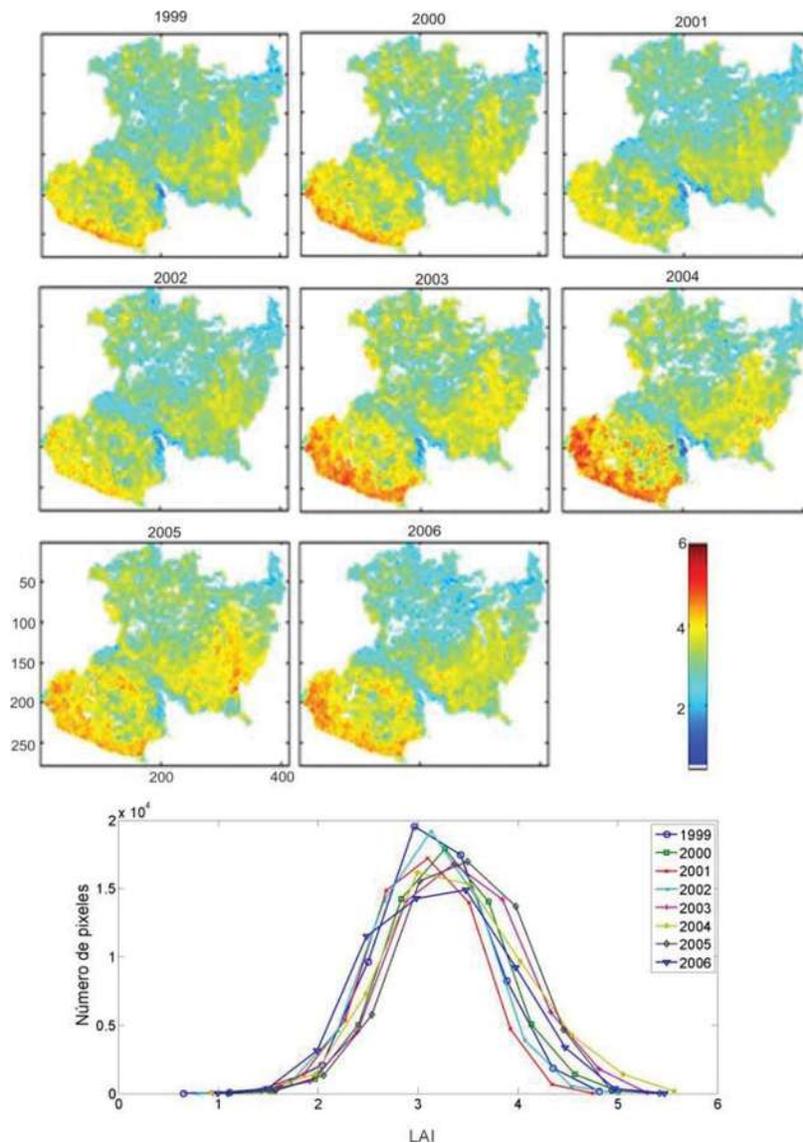


Figura VI.26. *Máximo.* Distribución anual de la variable (eje de ordenadas de los histogramas en número de píxeles)

Amplitud El incremento total en el LAI durante una estación de crecimiento varía entre 0.5 y 5, dependiendo de la zona, el tipo de vegetación y las condiciones ambientales (Fig. VI.27). Los valores más altos se presentan en las zonas de vegetación caducifolia del sur y sur este del estado, que son las zonas más cálidas; los años 2003, 2004 y 2005 son los que presentan las mayores amplitudes y los años 2001 y 2002 las menores. En las zonas de bosque perennifolio, se presentan en general los valores más bajos; las menores amplitudes se dieron en 2001 y 2006, y las mayores en 2000 y 2005.

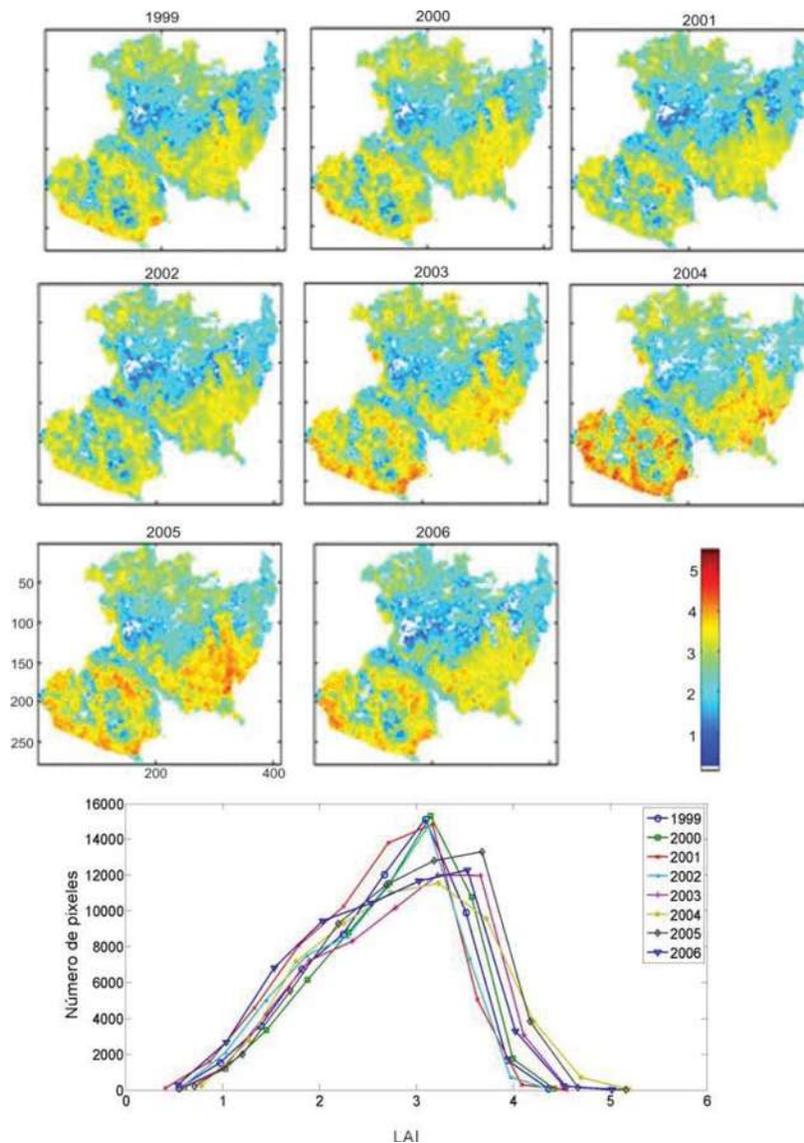


Figura VI.27. **Amplitud.** Distribución anual de la variable (eje de ordenadas de los histogramas en número de pixeles)

Derivada izquierda. El ritmo de crecimiento de la vegetación al inicio de la estación verde es más rápido en las zonas de menor altitud, con vegetación caducifolia, y más lento en las zonas de montaña (Fig. VI.28), con bosque de hoja perenne, las zonas agrícolas y la Depresión del Balsas. Los años 2001 y 2006, que fueron años cálidos y húmedos, presentan los ritmos más lentos, mientras que 2005, que fue un año seco y cálido, los más rápidos.

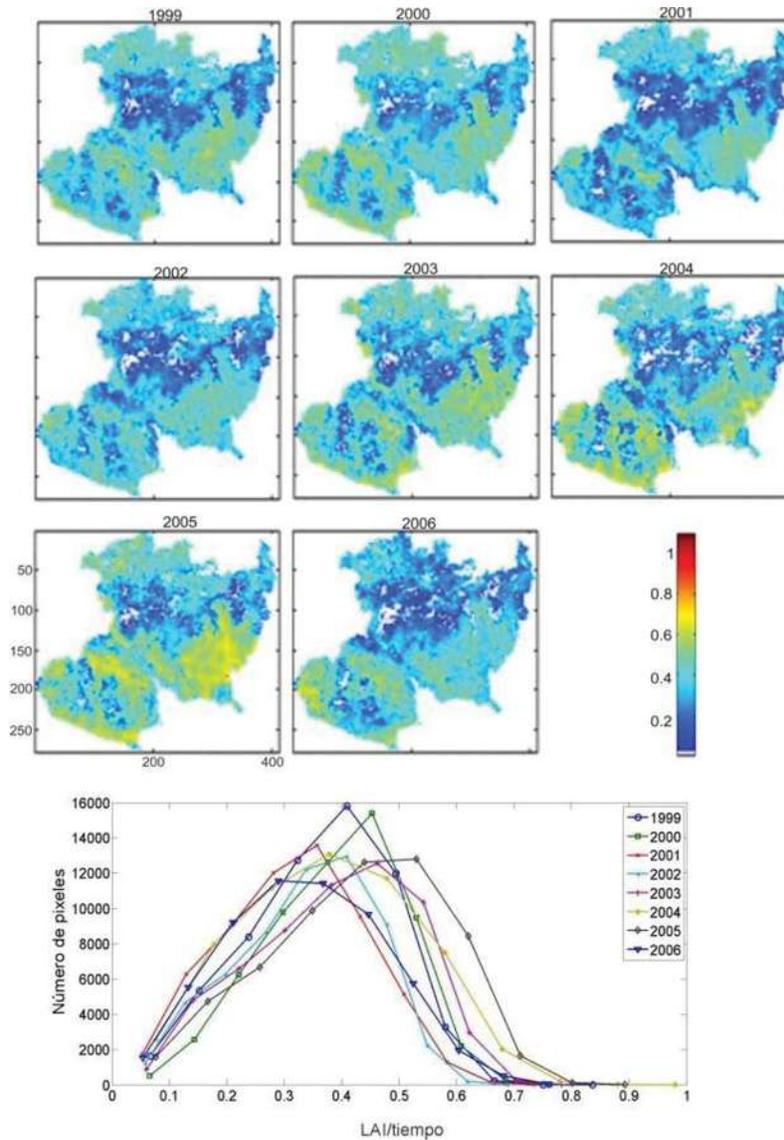


Figura VI.28. *Derivada Izquierda.* Distribución anual de la variable (eje de ordenadas de los histogramas en número de píxeles)

Derivada derecha. La velocidad a la que la vegetación sale de la estación verde fue más lenta en todo el territorio en los años 2002 (salvo en el norte) y

2006 (salvo en el sureste), ambos cálidos y húmedos. El ritmo más rápido de decrecimiento se dio en 2005, salvo en las zonas de montaña (Fig. VI.29).

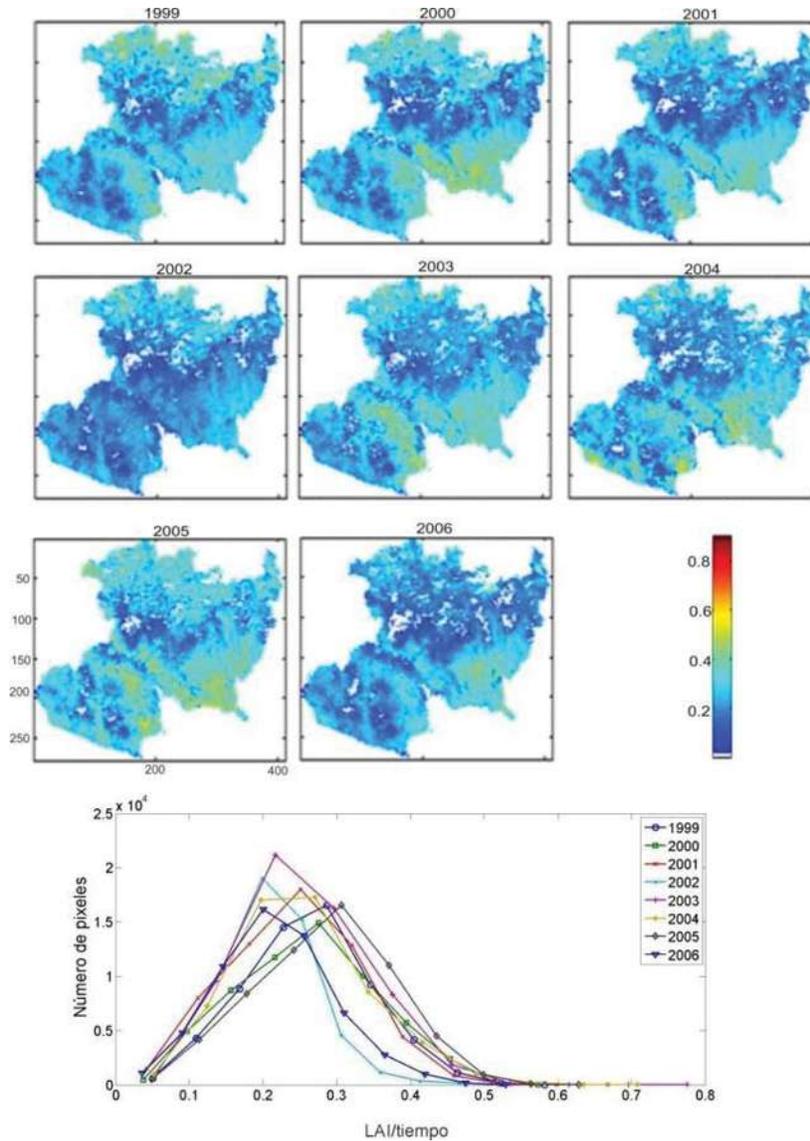


Figura VI.29. Derivada derecha. Distribución anual de la variable (eje de ordenadas de los histogramas en número de píxeles)

Integral larga. Los valores más bajos corresponden a la Depresión del Balsas y a la meseta norte, donde predominan los cultivos y el matorral-pastizal (Fig. VI.30). Los valores más altos se dan en la costa, tanto en el bosque caducifolio como perennifolio. En estas zonas hay una marcada variación interanual, con los valores más altos en 2002, 2003, 2004 y 2006 (años

húmedos), y los más bajos en 1999, 2000 y 2005 (años secos). Sin embargo el año 2001 (también húmedo y cálido) presenta valores bajos.

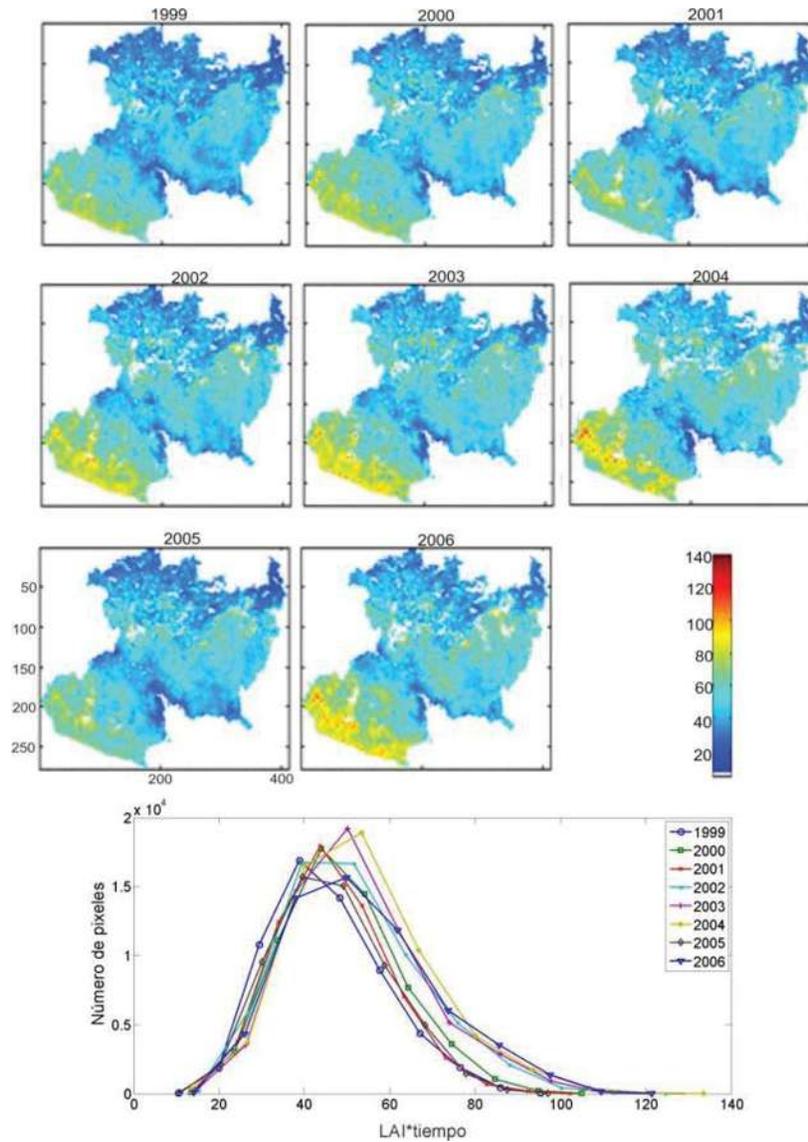


Figura VI.30. Integral larga. Distribución anual de la variable (eje de ordenadas de los histogramas en número de píxeles)

Integral corta. Los valores más altos están siempre asociados a zonas de bosque caducifolio (Figura VI.31). Los máximos se dan en la costa, particularmente en los años 2002, 2003, 2004 y 2006, en los que la estación verde fue relativamente larga. En esta zona, los valores más bajos de dieron en 1999, 2001 y 2005, que fueron años con una estación corta.

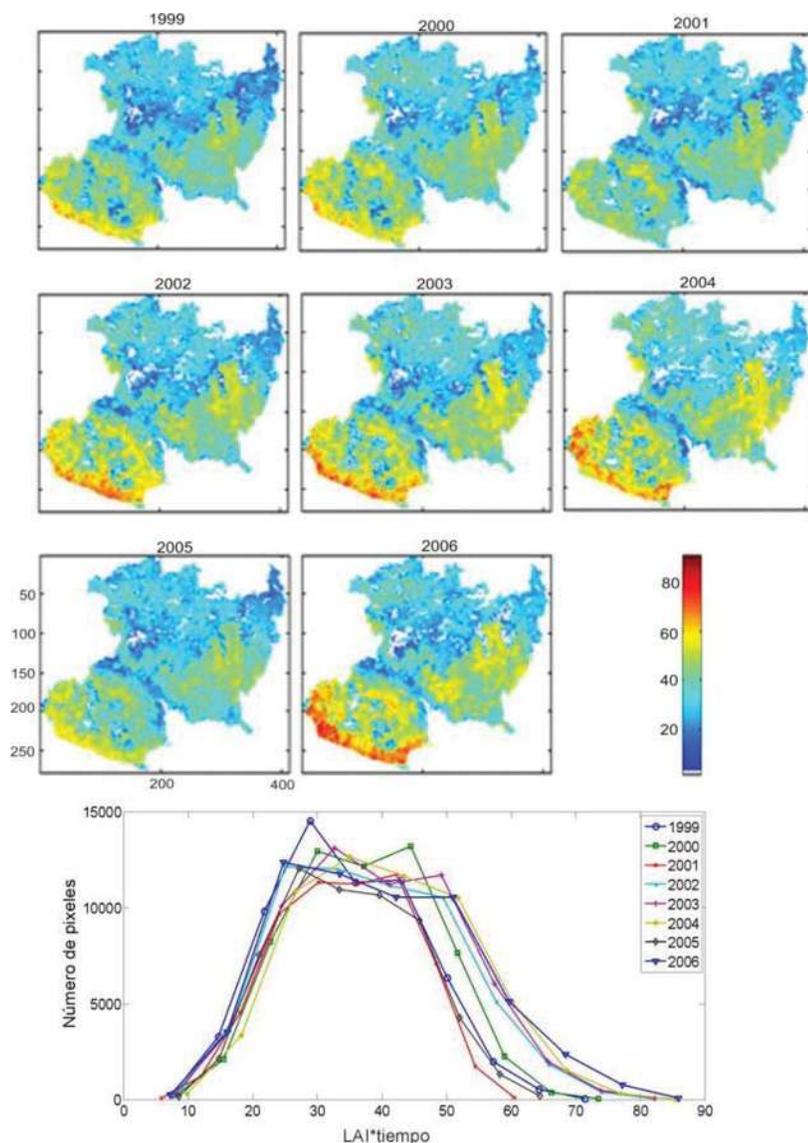
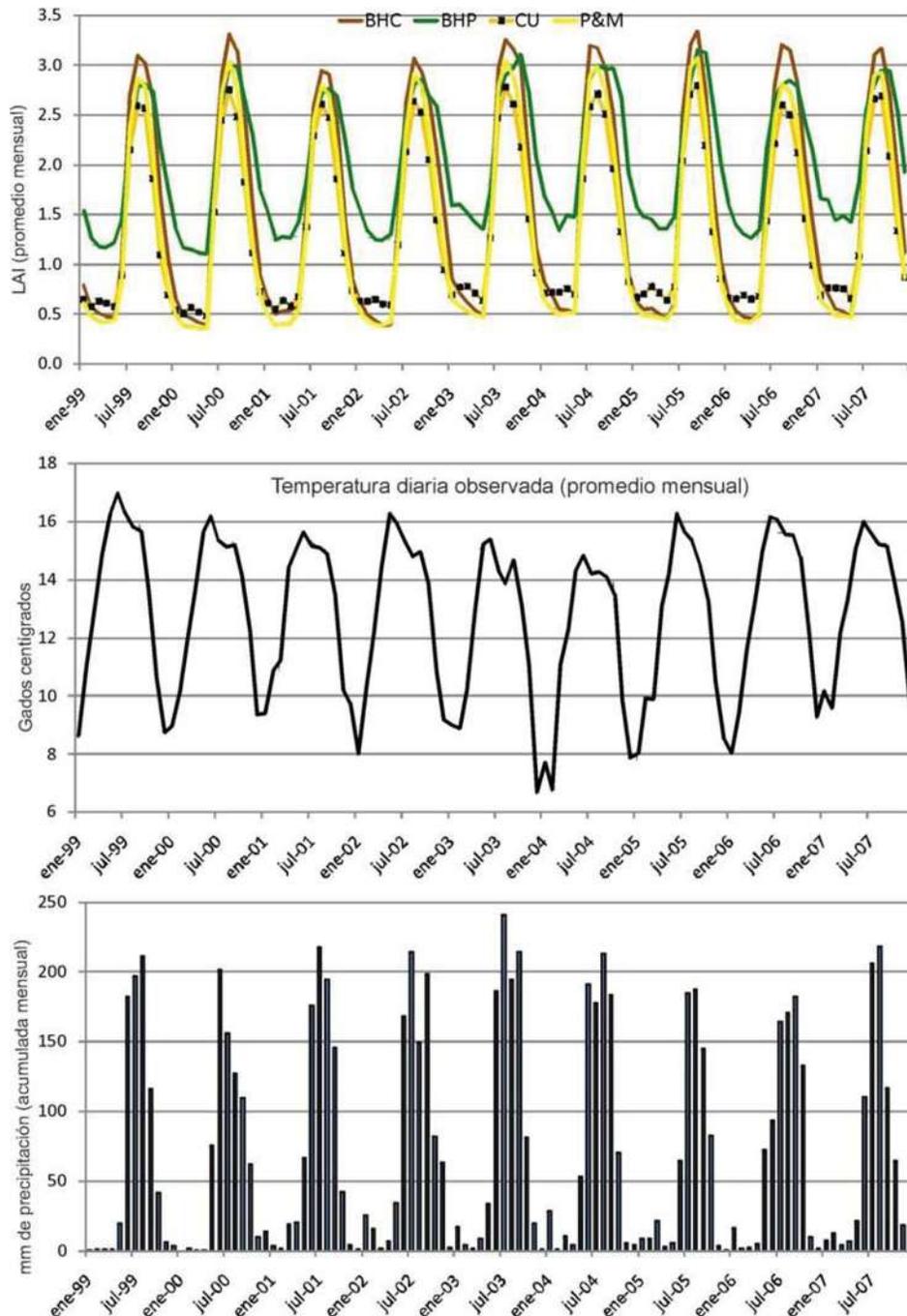


Figura VI.31. Integral corta. Distribución anual de la variable (eje de ordenadas de los histogramas en número de píxeles)

En resumen, los patrones fenológicos se repiten año con año, pero presentan variaciones que deben estar relacionadas con las condiciones ambientales. Para interpretar el comportamiento de la vegetación en función del clima se necesitarían más datos y más detallados. Hay variables fenológicas más sensibles a los cambios interanuales (*Inicio de estación*, *Fin de estación*, *Longitud de estación* y *Mitad de estación*). En general, se trata de variables que representan fechas en el año.

Para cada grupo de vegetación, de acuerdo a la distribución del mapa INF2000, se compararon los datos climatológicos con sus correspondientes promedios mensuales de LAI a lo largo de la serie (Fig. VI.32).



VI.32. Variables climatológicas (temperatura diaria observada, promedio mensual y precipitación acumulada mensual) y valores de LAI promedio mensuales de cada grupo de vegetación estudiado.

Entre los diferentes tipos de vegetación considerados se constatan las mismas diferencias que se habían comentado en el capítulo anterior para el año 2000. Con respecto al clima, se observa cierta correspondencia entre los valores mínimos de LAI, los máximos de los promedios mensuales de la temperatura diaria observada y el inicio de la temporada de lluvia. Sin embargo, como se observó al analizar separadamente cada variable, los datos resultan insuficientes para sacar conclusiones claras.

VI.3.5.2 Análisis de componentes principales

El Cuadro VI.7 muestra los coeficientes para obtener las componentes a partir de las variables originales. El *Mínimo*, la *Derivada izquierda* y la *Derivada derecha*, son las variables de mayor peso en la acumulación de varianza, y por lo tanto en la discriminación de los objetos fenológicos sobre el terreno combinando todos los años. El *Mínimo* se muestra muy estable en los diferentes años de la serie, mientras que las *Derivadas derecha e izquierda*, si bien varían con las condiciones ambientales, muestran una fuerte dependencia con la fenología caducifolia o perennifolia de los tipos de vegetación generales considerados.

Cuadro VI.7. Coeficientes obtenidos para calcular los componentes principales, en negritas los factores con mayor participación en la varianza

Variables originales	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
1. Inicio de estación	0.02	-0.01	-0.77	0.05	-0.43
2. Fin de estación	-0.32	0.34	-0.07	0.31	-0.18
3. Longitud de estación	-0.31	0.33	0.26	0.27	0.01
4. Mínimo	-0.41	0.06	-0.08	-0.65	0.03
5. Tiempo para el máximo	-0.29	0.13	-0.51	0.28	0.49
6. Máximo	0.14	0.45	-0.12	-0.42	0.05
7. Amplitud de estación	0.37	0.31	-0.04	0.08	0.02
8. Derivada izquierda	0.38	0.25	-0.04	-0.08	-0.41
9. Derivada derecha	0.41	0.01	-0.18	-0.09	0.61
10. Integral extendida	-0.19	0.45	0.06	-0.26	0.07
11. Integral corta	0.19	0.44	0.11	0.24	0.05

Con los 5 primeros componentes se conserva casi el 100% de información contenida en los datos originales, según muestra en gráfico de Pareto (Fig. VI.33).

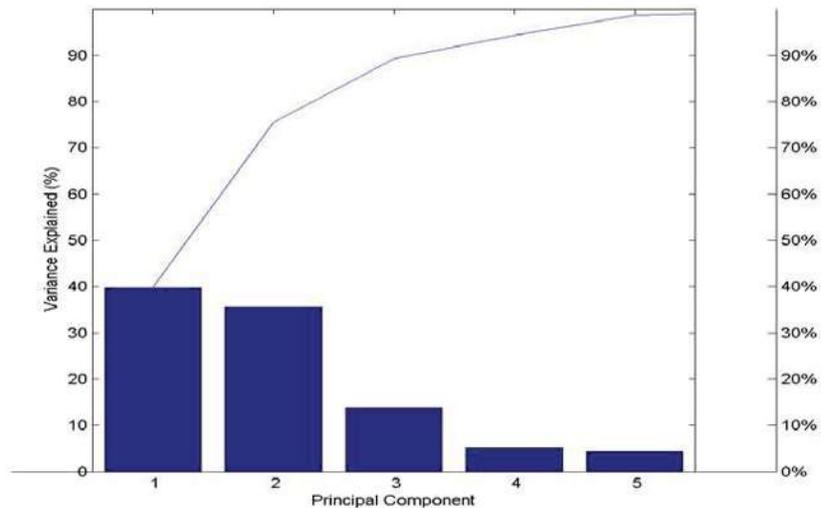


Figura VI.33. Gráfico de Pareto con la varianza contenida por cada componente y la variable acumulada.

VI.3.5.3 Mapas de cobertura (1999-2006)

Mediante el algoritmo de clasificación descrito en la metodología, que utiliza el mapa INF2000 como control para asignar una clase a los píxeles, se obtuvieron los mapas que muestra la Fig. VI.34.

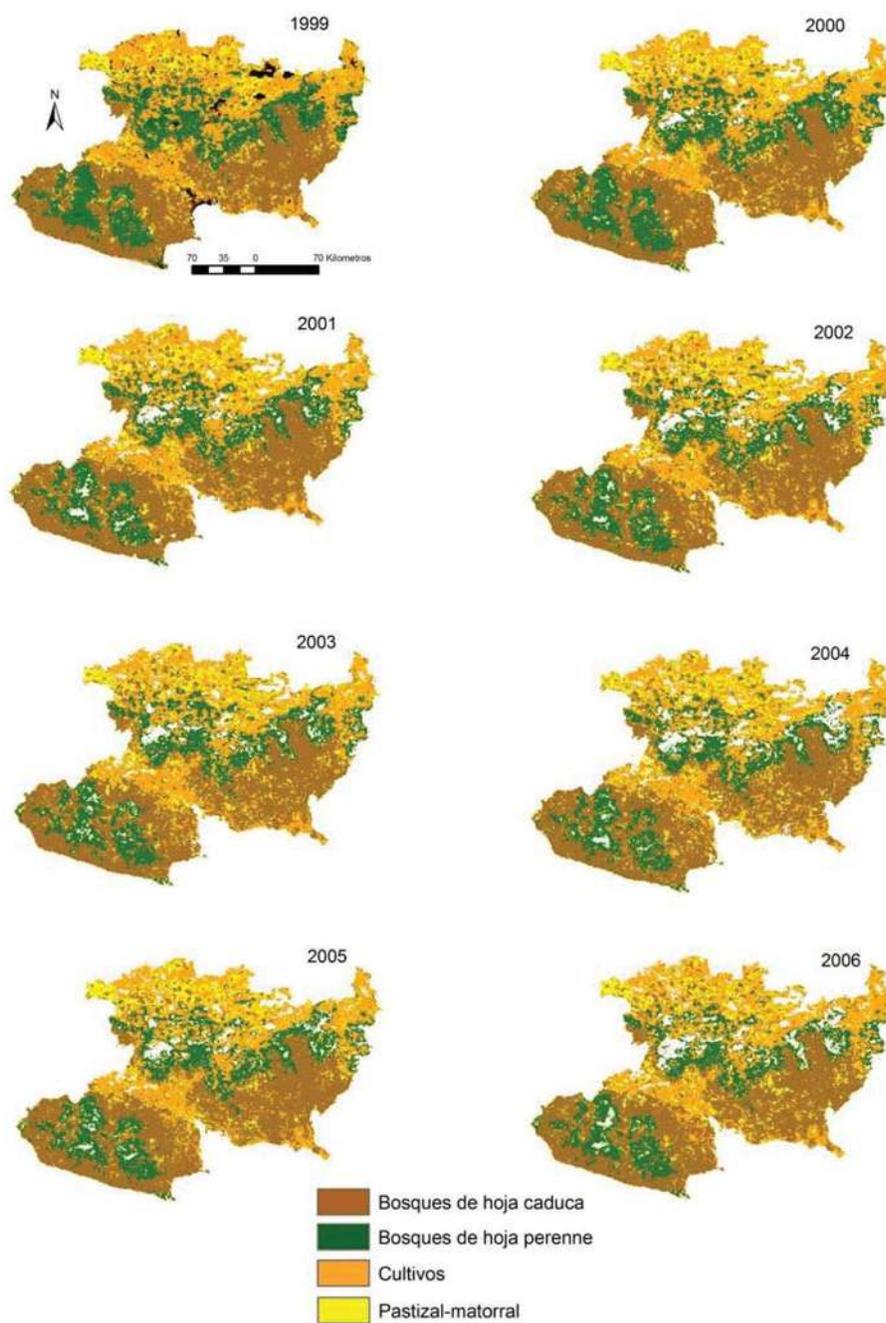


Figura VI.34. Mapas CYLC1999-2006 obtenidos para el área de estudio. Las áreas sin color dentro del mapa corresponden a las zonas sin información fenológica debido a problemas de huecos o bien a objetos sin fenología (cuerpos de agua y zonas urbanas).

En la Fig. VI.35 se muestran los mapas de frecuencia de la moda de cada pixel, para cada año. Las frecuencias son expresadas como porcentajes la asignación total a la clase (20).

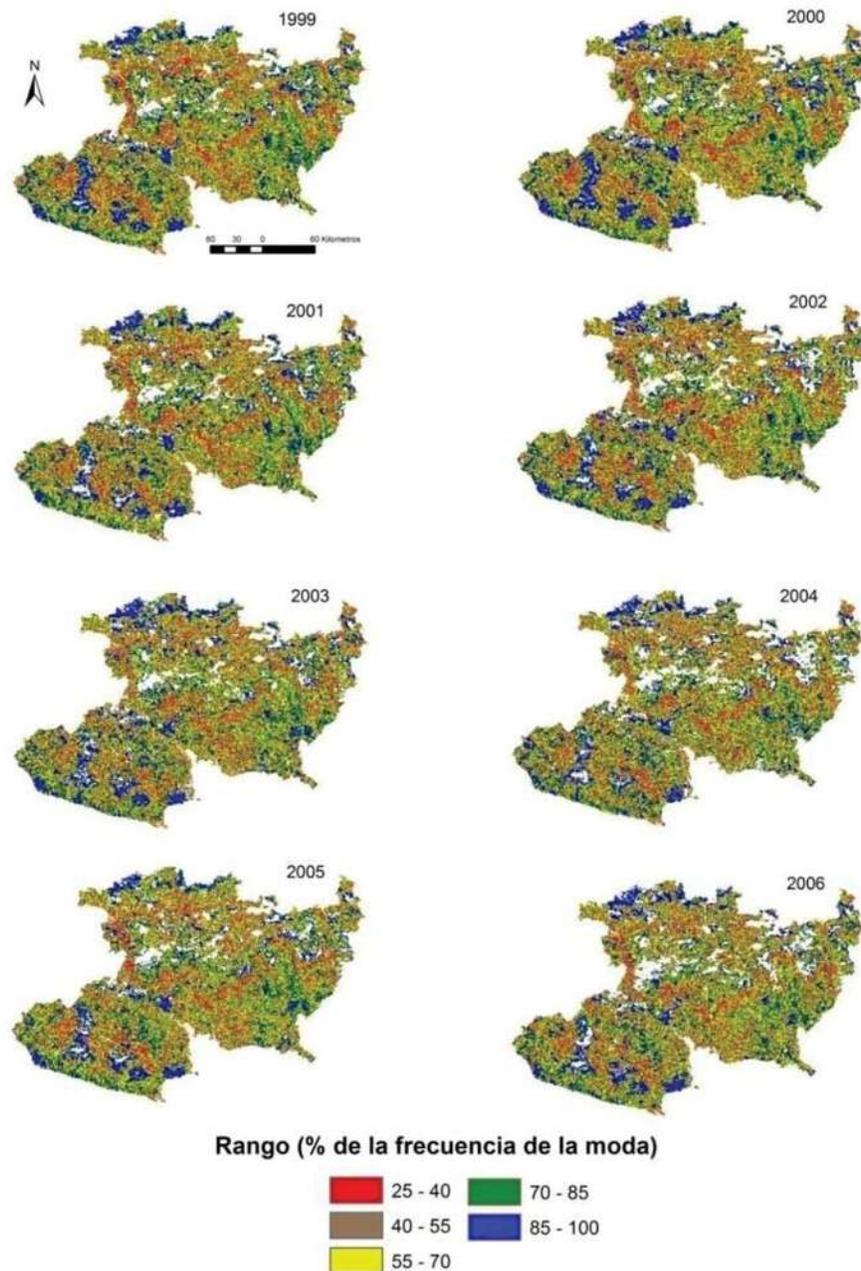


Figura VI.35. Frecuencias de moda en la asignación de clase para cada pixel. Las áreas sin color dentro del mapa corresponden a las zonas sin información fenológica debido a problemas de huecos o bien a objetos sin fenología (cuerpos de agua y zonas urbanas)

Los patrones de distribución de frecuencias se repiten aproximadamente en las mismas zonas, todos los años, y no se corresponden a ningún tipo de vegetación en específico. Las frecuencias más bajas (25-40%) se encuentran especialmente en las zonas de bordes entre clases, por la presencia de píxeles mixtos asociada a la baja resolución.

En la Fig. VI.36 se observa el número de píxeles para cada clase por cada mapa anual, además del número de huecos, que como se explicó en el capítulo II, son el resultado de eliminar valores bizarros en las variables de salida y los píxeles con doble estación de crecimiento. La mayor cantidad de estos se presentaron en los años 2004, 2006 y 2002. La clase más con menos cambios es BHC, que salvo por tres años, 2001, 2003 y 2004 incrementa su extensión en los mapas. La clase BHP, muestra una tendencia a disminuir su extensión, aunque parte de esta debe los huecos, que como se comentó en el anexo A.VI.2.2, se concentran principalmente en las partes de mayor altitud. Las clases CU y P&M muestran cambios erráticos en su extensión entre los años, al ser las clases con mayores problemas para ser identificadas bajo el enfoque planteado en este trabajo, son más susceptibles a presentar ruido.

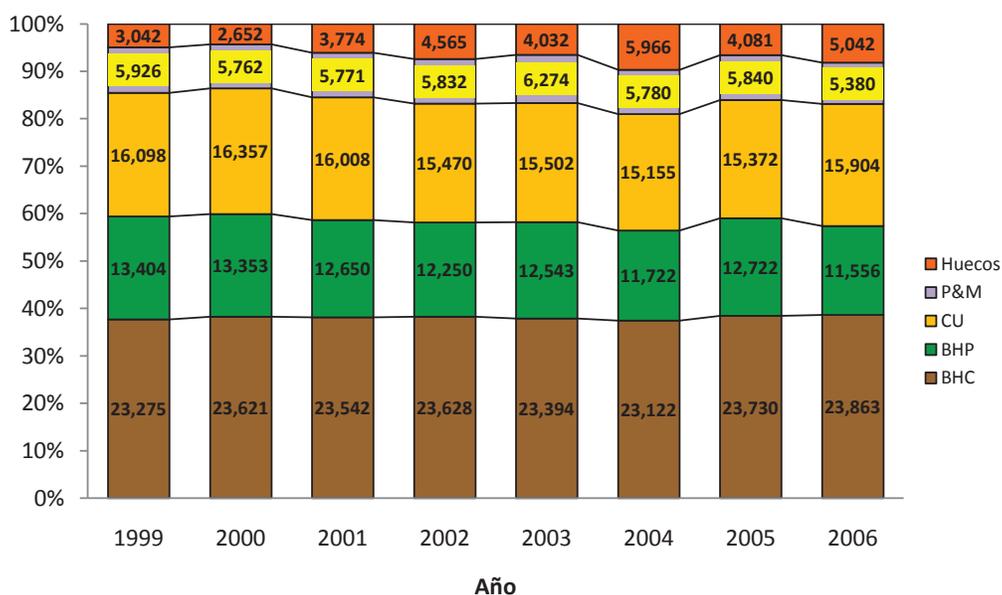


Figura VI.36. Composición por clases en número de píxeles para cada mapa anual.

Una manera de conocer la estabilidad de un pixel es considerar las ocasiones en que es clasificado en el mismo tipo de vegetación. Esto se muestra los mapas de la Fig. VI.37.

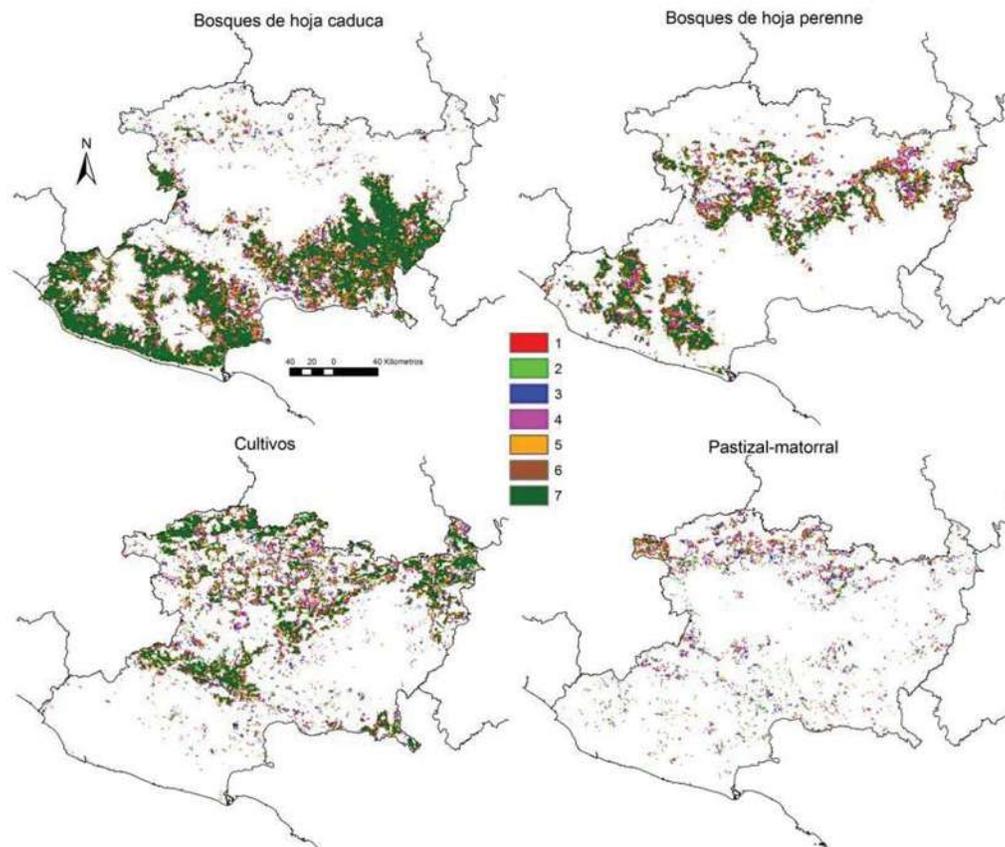


Figura VI.37. Frecuencia de clasificación de cada pixel en cada clase.

Los pixeles con valor 7 han sido identificados en su clase en todos los años de la serie y se pueden considerar muy estables, esto es, que no han sufrido cambios. Para los valores menores de 7, hay dos posibilidades: que los cambios hayan sido permanentes (de una clase a otra y permanece en la nueva clase) o variables (de una clase a otra, a otra, a otra...), incluyendo el regreso a la (o las) clase(s) anteriores.

Considerando la frecuencia de la moda promedio para cada pixel durante la serie, la Fig. VI.38 muestra que el grupo de pixeles seleccionados como

cambios con el criterio señalado en la metodología (pixeles que cambian y permanecen en su nueva clase), presenta en general, valores más altos en su frecuencia promedio de moda que los de los pixeles que cambian de la clase BHP intermitentemente en algún periodo de la serie. La mitad de los valores de las frecuencias promedio de la moda para los pixeles de cambio que lo hacen en forma consistente o permanente, se encuentra entre 60 y 75% y no se presentan valores inferiores a 45%, mientras que los pixeles de cambio intermitente, presentan la mitad de sus datos con valores entre 55 y 70%, alcanzando valores de hasta 35%.

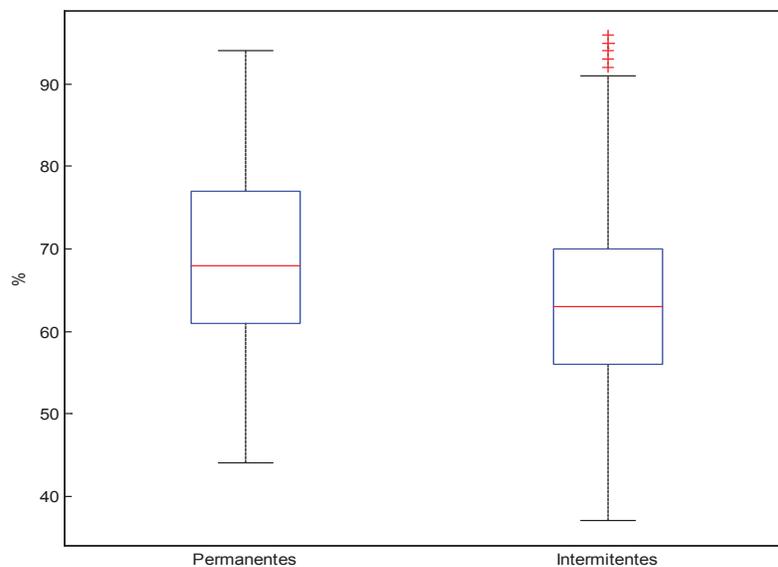


Figura VI.38. Distribuciones de la frecuencia promedio de la moda para los pixeles identificados como sospechosos de cambio en la clase BHP. Permanentes e intermitentes.

Lo anterior muestra que los pixeles dentro de los cambios en la clase BHP que forman patrones estables, tienen también, bajo el método de clasificación, una mayor certidumbre en su identificación con respecto al resto.

El mapa de la Fig. VI.39 muestra los píxeles que presentan cambios permanentes de BHP a alguna otra clase. El cambio de BHP a BHC se debe fundamentalmente a talas selectivas de especies arbóreas (puntos verdes en la

Fig. 4.21, principalmente en la región Sierra-Costa) y el paso a CU o a P&M corresponde a las zonas propiamente deforestadas por introducción de actividades agrícolas o ganaderas (puntos rojos).

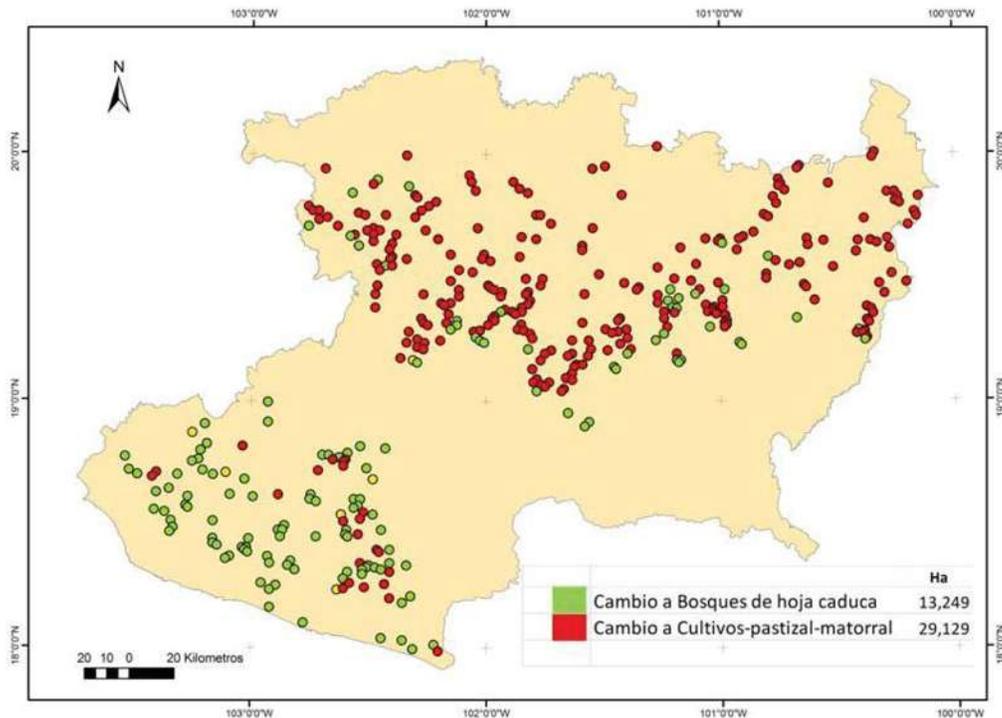


Figura VI.39. Pixeles de cambio de bosque de coníferas a otra categoría entre el periodo 2000-2006

La cantidad estimada de pérdidas de BHP en el periodo de estudio, de acuerdo a estos resultados es de 42,378 ha, de las cuales 13,249 ha pasan a BHC y 29,129 ha a CU o a M&P.

VI.3.5.4 Validación

Para la validación de los resultados se tomaron dos muestras del 10% de los pixeles detectados como cambios y no cambios, respectivamente, y se verificaron de manera visual comparando la superficie correspondiente en la correspondiente imagen Landsat del año 2000 (mosaico CIRCA 2000) y una imagen SPOT de 2006. Se asignó un valor de ambigüedad a cada comparación visual, para los casos considerados como aciertos.

Para la validación de los cambios, la muestra se compuso de 46 píxeles (Cuadro VI.8), uno de ellos se descartó por nubes, quedando en 45, de los cuales 32 fueron considerados aciertos, lo que corresponde a un 71.1%.

Bajo un punto de vista difuso, añadiendo un criterio de duda la identificación de cambio, de los 32 píxeles que se considera que cambiaron, para 6 resulta indiscutible, por apreciarse visiblemente que la mayor parte del píxel ha cambiado, para 13 ambiguo tipo 1, y para los otros 13 ambiguo tipo 2. Tomando los aciertos calificados con menor ambigüedad, (tipos 0 y 1) se tiene un 42.2% de aciertos. Los sitios con ambigüedad 2 representan áreas en donde es necesario recabar información en campo para saber si efectivamente se han presentado allí algún proceso de deforestación.

Cuadro VI.8: Resumen de la validación de los píxeles de cambio bajo un enfoque borroso

Tipo	Ambigüedad			Total	Max	Correcto
	0	1	2			
Aciertos	6	13	13	32	42.2	71.1
Errores	13			13	57.8	28.9
Total				45		

El Cuadro VI.9 muestra el resultado del ejercicio de validación con los píxeles estables, es decir clasificados como BHP durante todos los años de la serie. La muestra se compuso de 473 píxeles, de los cuales 386 se consideraron aciertos (81.6%). De éstos, 250 con ambigüedad tipo 0, 65 tipo 1 (66.6% de aciertos en conjunto) y 71 tipo 2.

Cuadro VI.9. Resumen de la validación de los píxeles de no cambio bajo un enfoque borroso

Tipo	Ambigüedad			Total	Max	Correcto
	0	1	2			
Acierto	250	65	71	386	66.6	81.6
Error	87			87	33.4	18.4
Total				473		

Para estudiar la relación entre la ocurrencia de los cambios y la cercanía a la zona agrícola, se consideró un área de 2km alrededor de ésta y se analizó la proporción de píxeles de cambio en ella (Fig. VI.40).

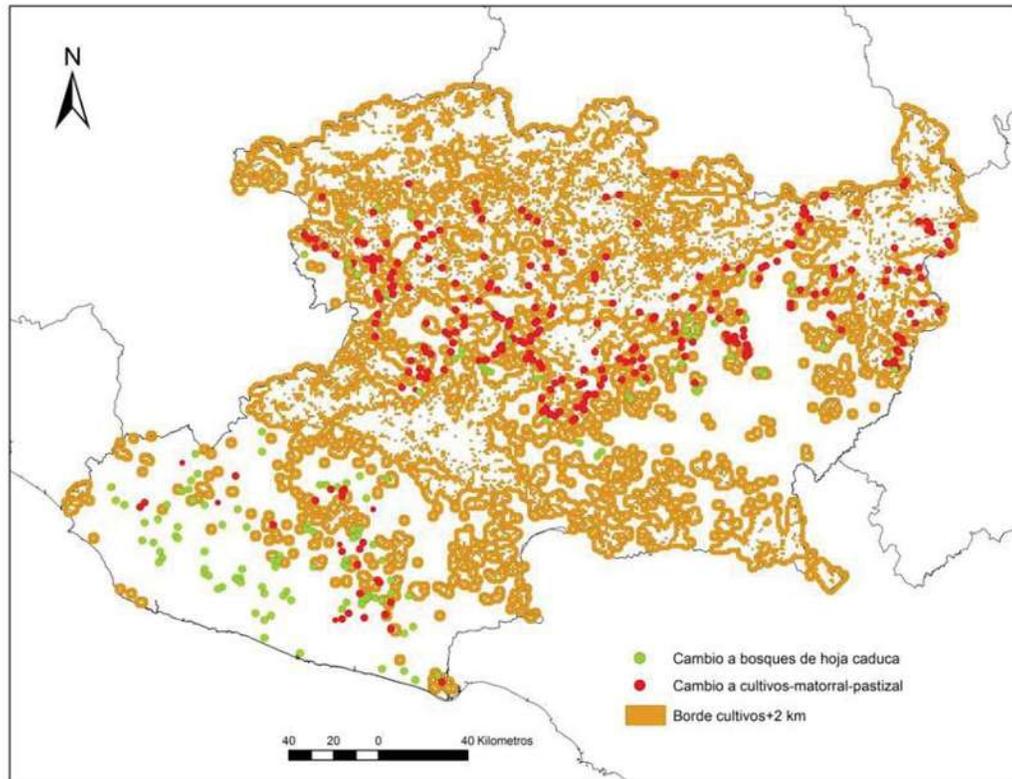


Figura VI.40. Área de 2km marcada por el borde de la clase Cultivos y los píxeles de cambio.

El 84% de los píxeles señalados como cambios de bosque perennifolio a cultivos o a pastizal-matorral, se localizan dentro del área de 2 km alrededor de las áreas agrícolas (en el caso de cambios a bosque caducifolio la proporción es mucho menor). Esto puede deberse a la incertidumbre asociada al efecto de borde. Sin embargo, también se puede esperar que las zonas cercanas a áreas agrícolas sean las más dinámicas y susceptibles a cambios, en un afán de aumentar la superficie cultivada. Los píxeles que pasan de BHP a CU o P&M está fuera de este contexto, y también del borde de la zona agrícola.

VI.3.6 CONCLUSIONES

A partir de las 11 variables fenológicas por año, calculadas con el programa TIMESAT sobre la serie LAI del proyecto CYCLOPES (1999-2007), se construyeron 8 mapas de cobertura, uno por año, considerando los principales tipos de vegetación (bosque de hoja perenne (BHP), bosque de hoja caduca (BHC), cultivos (CU) y pastizal-matorral (P&M)). Se analizó la variación interanual de cada variable con respecto a las condiciones ambientales (dadas por promedios mensuales de precipitación y temperatura). Si bien los datos climatológicos empleados no resultaron suficientes para explicar las diferencias de la fenología de los diferentes tipos de vegetación cada año, el análisis permitió observar que algunas variables fenológicas (como el *Inicio de estación*, *Fin de Estación*, *Longitud de estación* y *Mitad de estación*) presentan mayores variaciones interanuales que otras (como el *Mínimo de LAI*) y podrían considerarse más dependientes de factores externos.

Un análisis de componentes principales permitió identificar las variables que contienen la mayor cantidad de información para distinguir los diferentes tipos de vegetación: el *Mínimo de LAI*, la *Derivada derecha* y la *Derivada izquierda*, que muestran una clara dependencia con la condición caducifolia o perennifolia de la vegetación.

La metodología empleada en el capítulo II para construir los mapas de cobertura anuales a partir de las componentes principales se adaptó para lograr que los mapas fueran comparables entre sí. Para la asignación de clases se evaluaron las distancias mínimas entre los valores de los 5 primeros componentes principales del pixel objetivo y todos y cada uno de los valores de los 5 primeros componentes principales de un año referencia (2000).

Los mapas así obtenidos se compararon año con año para identificar las tendencias generales de cada tipo de cobertura. La presencia de huecos en algunos años de la serie dificulta el análisis en algunos casos. Sin embargo se puede constatar la disminución de la superficie de bosque de hoja perenne.

Con el fin de evaluar la capacidad de los mapas generados para estimar la deforestación en el estado de Michoacán durante el periodo estudiado, se buscó

identificar los píxeles de bosque de hoja perenne que habían cambiado a otro tipo de cobertura. Se consideró que un píxel había cambiado si después de pertenecer, desde el inicio de la serie, a la clase BHP, pasaba a otra clase y se mantenía en ella. Se calculan 42,378 ha deforestadas, de las cuales 13,249 ha pasan a BHC y 29,129 ha a CU o a M&P. Es una superficie menor a la reportada con otras metodologías para el mismo periodo, aunque debe considerarse que sobre la región, no hay trabajos desarrollados a la misma resolución espacial y que la última estimación data del año 2000 con datos de 19 años atrás, lo que dificulta cualquier comparación.

Se analizó la relación entre la incertidumbre asociada a la clasificación de un píxel y la probabilidad de que se detectara como un píxel de cambio. Se concluyó que si hay una correspondencia, cuando se consideran como cambios a los píxeles que lo hacen de forma permanente a otra clase, mientras que los píxeles que cambian de forma intermitente, presentan en general, una distribución de datos con valores más bajos de certitud, considerando a esta como la frecuencia de la moda promedio del píxel.

Los resultados fueron validados con imágenes de mayor resolución sobre una muestra de 10% de los píxeles de cambio. Se encontró una proporción de aciertos 71% considerando y 42% sin considerar los casos más ambiguos. El 84% de estos píxeles de cambio, se encuentran dentro de un área de 2 km alrededor de la clase cultivos, lo que sugiere un fuerte efecto de borde en los resultados. Este efecto puede admitir más de una interpretación, pues por una parte se puede entender debido a la baja resolución espacial y la naturaleza necesariamente mixta de los píxeles de 1 km en un área muy heterogénea; y por otra parte, es en este cinturón que, por la facilidad de acceso y la cercanía con las actividades humanas, la dinámica de cambios puede ser más activa.

En resumen, el análisis de los datos CYCLOPES a lo largo de serie, bajo un enfoque fenológico permite circunscribir zonas sospechosas de cambios en su cobertura forestal, pero no hacer estimaciones precisas. Por otra parte, la información adicional obtenida por la generación de los mapas de cada una de las 11 variables fenológicas, abre un campo de exploración con la evolución del clima y su relación con la vegetación.

VI.3.7 REFERENCIAS

CONAGUA, 2010. Comisión Nacional del Agua. México D.F.

Kennedy, R.E., Townsend, P.A., Gross, J.E., Cohen, W.B., Bolstad, P., Wang, Y.Q., Adams, P., 2009. Remote sensing change detection tools for natural resource managers: Understanding concepts and tradeoffs in the design of landscape monitoring projects. *Remote Sensing of Environment* 113, 1382-1396.

Lunetta, R.S., Knight, J.F., Ediriwickrema, J., Lyon, J.G., Worthy, L.D., 2006. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. *Remote Sensing of Environment* 105, 142-154.

NASA, 2010. GeoCover™ Product Description Sheet, Orthorectified Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+) Compressed Mosaics.

Turner, B.L., Lambin, E.F., Reenberg, A., 2007. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104, 20666.

Weiss, M., Baret, F., Garrigues, S., Lacaze, R., 2007. LAI and fAPAR CYCLOPES global products derived from VEGETATION. Part 2: validation and comparison with MODIS collection 4 products. *Remote Sensing of Environment* 110, 317-331.

Woodcock, C.E., Sucharita, G., 2000. Fuzzy set theory and thematic maps: accuracy assesment and area estimation. *International Journal of Geographical Information Science* 14, 153-172.

VII. CONCLUSION GENERAL

El interés de este trabajo, fue explorar el potencial de una serie de tiempo construida a partir de datos de baja resolución a nivel global, para el estudio de los procesos de deforestación en el estado de Michoacán. La serie LAI del proyecto CYCLOPES, ha sido puesta recientemente a disposición de la comunidad científica con información de 9 años (1999-2007) constituye una valiosa herramienta que ha sido poco explorada en todas sus aplicaciones.

En la primera fase del trabajo se comparó, para el caso particular de Michoacán, el mapa generado por la CONABIO para el año 2000, basado en imágenes de alta resolución y datos de campo, con mapas globales de cobertura construidos a nivel global con datos de baja resolución. Con este ejercicio se evidenciaron los problemas asociados a la utilización de este tipo de información en una región de alta biodiversidad y fragmentación. Por una parte, los errores en la identificación de los tipos de vegetación, se asociaron a que ninguno de los trabajos globales se había apoyado en información particular del terreno para el área de estudio. Por otra parte, la inclusión de diferentes tipos de cobertura en una sola clase se explicó por la baja resolución espacial. Se concluyó que con este tipo de datos sólo se pueden considerar tipos de vegetación muy generales.

Para la realización de las siguientes etapas del trabajo con la serie CYCLOPES, se buscó apoyo en información local, con el mapa INF2000 generado con imágenes de alta resolución del año 2000, que es uno de los primeros de la serie. Así mismo, se consideraron tipos muy generales de cobertura. Con el fin de utilizar el potencial de la serie de tiempo, se partió de un enfoque fenológico, utilizando el programa TIMESAT para generar mapas de 11 variables fenológicas a partir de los valores de LAI.

Para obtener los mapas de todos los años a comparar, se propuso un método basado en la transferencia de las clases del mapa referencia en el año 2000 al resto de los años. Al mismo tiempo se generaron mapas asociados que indican la fiabilidad en la clasificación de cada pixel. Comparando los mapas

obtenidos, se identificaron las áreas “sospechosas” de haber perdido su cobertura forestal.

Se encontró que la mayor parte de las detecciones, se encuentran dentro de un área de 2 km alrededor de los cultivos. Por tratarse de zonas con alto nivel de fragmentación, la identificación de cambios de cobertura puede reflejar la incertidumbre asociada a la identificación de cada pixel. Sin embargo, la fragmentación también es producto de la desorganización de las actividades humanas en el espacio, por lo que es posible que en estas zonas, la probabilidad de cambios sea mayor.

Si bien, el porcentaje de éxito en la detección, no permite emplear a CYCLOPES como una fuente para identificar cambios de forma tan precisa que permita hacer estimaciones confiables en el contexto de Michoacán, los datos en general confirman una tendencia a la reducción de las áreas de bosques perennes, es decir, con presencia de coníferas, permitiendo destacar las regiones con mayor incidencia en estos procesos.

La baja resolución espacial de los datos, que da lugar a un gran número de pixeles mixtos en una zona de gran heterogeneidad, es sin duda el principal obstáculo para el buen funcionamiento de la metodología. En regiones más homogéneas, como las mesetas semidesérticas del norte de México o los bosques tropicales de la Península de Yucatán, la aplicación de esta fuente de datos, con un enfoque como el utilizado aquí, tendría sin duda un mejor desempeño y valdría la pena abordarlo en futuros estudios.

Los mapas de variables fenológicas en sí mismos, mostraron tener relación con información general del clima, lo que abre un campo de estudio sobre la respuesta de los grupos de vegetación a las variaciones de los patrones del clima. Ante el escenario actual de cambio climático, las series de tiempo, cada vez más largas y disponibles, podrían servir para estudiar la respuesta de los diferentes grupos de vegetación a las nuevas condiciones ambientales.

VIII. PERSPECTIVAS Y RECOMENDACIONES

Tras el análisis de los resultados obtenidos en este trabajo, se pueden proponer algunas recomendaciones:

1. Ensayar variaciones a la metodología, como la eliminación de la fase de cálculo de componentes principales. Se podría realizar la clasificación directamente sobre las variables fenológicas.
2. Cambiar el enfoque anual a uno más continuo: en lugar de construir mapas anuales y compararlos, se podría considerar para cada píxel, su evolución en el tiempo, desde perspectiva de análisis de señales.
3. Probar el método propuesto en alguna zona más homogénea.
4. Considerar una fuente de datos climatológicos más completa y continua, que permita asociar valores a cada píxel, (por ejemplo imágenes satelitales meteorológicas), para profundizar en el análisis de las relaciones de cada variable fenológica con los factores externos.
5. Probar algunas técnicas de píxeles mixtos para abordar el problema de la baja exactitud de la metodología propuesta en las zonas heterogéneas.
6. Proponer metodologías de *upscaling* para pasar los mapas de baja resolución a resoluciones más finas, con ayuda de otro tipo de datos (imágenes de alta resolución, etc.).
7. Abordar la detección de cambios particulares, como la sustitución de bosque por huertas de frutales (aguacate, en particular).
8. Estudiar los procesos de cambio de los bosques caducifolios.
9. Analizar la utilización de los datos de LAI (integral anual) para realizar estimaciones de producción de biomasa y almacenamiento de carbono.
10. Abordar otro tipo de aplicaciones, enfocadas a la predicción de fechas claves para la programación de labores en el ámbito agrícola o pecuario, por ej. el inicio del periodo de agostadero, de cosecha, etc.

IX. BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

Baret, F., Guyot, G., 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assesment. *Remote Sensing of Environment*, 161-173.

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*.

Béjar, R.Á., 2004. Obtención de cartas de vegetación a partir de imágenes de satélite AVHRR. Instituto de Geografía, UNAM.

Bocco, G., Mendoza, M., Maser, O., R, 2001. La dinámica del cambio de uso de suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 18-38.

Bontemps, S., Bogaert, P., Titeux, N., Defourny, P., 2008. An object-based change detection method accounting for temporal dependences in time series with medium to coarse spatial resolution. *Remote Sensing of Environment*, 3181-3191.

Colditz, R.R., 2007. Time Series Generation and Classification of MODIS data for Land Cover Mapping. Institut für Geographie

Universität Würzburg, Würzburg, p. 334.

CONAFOR, 2009. Inventario.

Desclée, B., Bogaert, P., Defourny, P., 2006. Forest change detection by statistical object-based method. *Remote Sensing of Environment*, 1-11.

Eidenshink, Faudeen, 1994. The 1 km AVHRR global land data set: first stages in implementation. *International Journal of Remote Sensing* 15, 3443-3462.

Embleton, B.J.J., Kingwell, J., 1997. Co-ordination of satellite and data programs: The committee on earth observation satellites' approach. *Acta Astronautica* 40, 397-405.

FAO, 2009. Situación de los bosques del mundo 2009. Roma.

Fen-Li, Z., 2005. Effects of Accelerated Soil Erosion on Soil Nutrient Loss After Deforestation on the Loess Plateau *Pedospkera* 15, 707-715.

Fox, N., Pegrum-Browning, H., Mackin, S., 2008. Towards the implementation of an international quality assurance strategy for earth observation data. In: Society, R.S.a.P. (Ed.), Proceeding of remote sensing and photogrammetric society conference, University of Exeter.

Fraser, R., Li, Z., Landry, R., 2000. SPOT VEGETATION for characterizing boreal forest fires. *International Journal of Remote Sensing* 21, 3525-3532.

Ganguly, S., Schull, M.A., Samanta, A., Shabanov, N.V., Milesi, C., Nemani, R.R., Knyazikhin, Y., Myneni, R.B., 2008. Generating vegetation leaf area index earth system data record from multiple sensors. Part 1: Theory. *Remote Sensing of Environment* 112, 4333-4343.

García, M., Palacios-Orueta, A., Ustin, S.L., 2001. Análisis de patrones espacio-temporales de la estructura de la vegetación en ecosistemas mediterráneos a distintas escalas. *Revista de Teledetección*, 29-35.

Garrigues, S., Lacaze, R., Baret, F., Morisette, J., Weiss, M., Nickeson, J.E., Fernandes, R.A., Plummer, S., Shabanov, N.B., Myneni, R.B., Knyazikhin, Y., Yang, W., 2008. Validation and intercomparison of global Leaf Area Index products derived from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research* 113.

GEOLAND, 2009. Integrated GMES Project on Land Cover and Vegetation.

Gobron, N., Pinty, B., Taberner, M., Mélin, F., Verstraete, M.M., Widlowski, J.L., 2006. Monitoring the photosynthetic activity of vegetation from remote sensing data. *Advances in Space Research* 38, 2196-2202.

Goryl, P., Huot, J., 2003. Overview of the ENVISAT MERIS and AATSR data quality, calibration and validation program. *IEEE*, pp. 1588-1590.

Herold, M., Woodcock, C.E., Stehman, S., Baret, F., Wulder, M.A., Schullius, C., 2009. The GOFC-GOLD/CEOS land cover harmonization and validation initiative: Technical design and implementation framework. 33rd International Symposium on Remote Sensing of Environment, Stresa (IT).

INEGI, 2009. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Mex.

Jakubauskas, M.E., Legates, D.R., Kastens, J.H., 2002. Crop identification using harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data. *Computers and Electronics in Agriculture* 37, 127-139.

Jeganathan, C., Dash, J., Atkinson, P., 2010. Characterising the spatial pattern of phenology for the tropical vegetation of India using multi-temporal MERIS chlorophyll data. *Landscape Ecology* 25, 1125-1141.

Jensen, J.R., 2000. Remote Sensing of the Environment: an Earth Resource Perspective. Prentice Hall, Saddle River, NJ.

Knyazikhin, Y., Glassy, J., Tian, H., Lotsch, A., Zhang, Y., Wang, Y., Morisette, J.T., Votava, P., Myneni, R., Nemani, R.R., Running, S., 1999. MODIS Leaf Area Index (LAI) and Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation (FPAR) Product (MOD15) Algorithm Theoretical Basis Document.

Lambin, E.F., 1999. Monitoring Forest Degradation in Tropical Regions by Remote Sensing: Some Methodological Issues. *Global Ecology & Biogeography* 8, 191-198.

Lambin, E.F., Geist, H.J., 2001. Global land-use and land-cover change: what have we learned so far? *Global Change News Letter* 27-30.

Lambin, E.F., Geist, H.J., Lepers, E., 2003. DYNAMICS OF LAND-USE AND LAND-COVER CHANGE IN TROPICAL REGIONS. *Annual Review of Environment and Resources* 28, 205-241.

Lambin, E.F., Linderman, M., 2006. Time Series of Remote Sensing Data for Land Change Science. *Time Series of Remote Sensing Data for Land Change Science* 44, 1926-1928.

Lobo, A., Maisongrande, P., 2008. Searching for trends of change through exploratory data analysis of time series of remotely sensed images of SW Europe and NW Africa. *International Journal of Remote Sensing* 29, 5237-5245.

Loveland, T.R., Reed, B.C., Brown, J.F., Ohlen, O., Zhu, J., Yang, L., Merchant, J.W., 2000. Development of a Global Land Cover Characteristics Database and IGBP DISCover from 1-km AVHRR Data. *International Journal of Remote Sensing* 21, 1303-1330.

Mas, J.F., Velázquez, A., Couturier, S., 2009. La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación ambiental* 1, 23-39.

McClain, C.R., Feldman, G.C., Hooker, S.B., 2004. An overview of the SeaWiFS project and strategies for producing a climate research quality global ocean bio-optical time series. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 51, 5-42.

Ordoñez, J.A.B., Maser, O., R, 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques* 7, 3-12.

Paruelo, J.M., 2008. La caracterización funcional de los sistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas* 3, 4-22.

Pompa, M., 2008. Análisis de la deforestación en ecosistemas montañosos del noroeste de México. *Avances en Investigación Agropecuaria* 2, 35-43.

POSTEL, 2008. Pôle d'Observation des Surfaces continentales par TELédétection.

Reed, B.C., Schwartz, M.D., Xiao, X., 2009. Remote Sensing Phenology. In: Noormets, A. (Ed.), *Phenology of Ecosystem Processes*. Springer New York, pp. 231-246.

Ridder, R.M., 2007. Global Forest Resources Assessment 2010 Options and recommendations for a global remote sensing survey of forest. In: Department, F.F. (Ed.). *FAO, Roma*, p. 68.

Roderick, M.L., Noble, I.R., Cridlan, S.W., 1999. Estimating Woody and Herbaceous Vegetation Cover from Time Series Satellite Observations. *Global Ecology & Biogeography* 8, 501-508.

Rogan, J., Chen, D.M., 2004. Remote sensing technology for mapping and monitoring land-cover and land-use change. *Progress in Planning* 61, 301-326.

Running, S.W., Baldocchi, D.D., Turner, D.P., Gower, S.T., Bakwin, P.S., Hibbard, K.A., 1999. A Global Terrestrial Monitoring Network Integrating Tower Fluxes, Flask Sampling, Ecosystem Modeling and EOS Satellite Data. *Remote Sensing of Environment*, 108-127.

Salam, A., Rahman, H., 2010. Role of Space Technology for Crop Monitoring and Food Security Planning in Bangladesh. *Asian Journal of GEOINFORMATICS* 10.

Sánchez-Azofeifa, G.A., Castro, K.L., Rivard, B., Kalascka, M.R., 2003. Remote Sensing Research Priorities in Tropical Dry Forest Environments. *Biotropica* 35, 134-142.

Scurlock, J.M.O., Asner, G.P., Gower, S.T., 2001. Worldwide Historical Estimates of Leaf Area Index, 1932-2000. *NASA*, p. 34.

Sharma, N., Rowe, R., 1992. *Managing the world's forests: looking for balance between conservation and development*.

Skole, D.L., Justice, C., Townshend, J.R.G., Janetos, A.C., 1997. *A Land Cover Change Monitoring Program: Strategy for an International Effort*

Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change

2, 157-175.

Sparks, T.H., Menzel, A., 2002. Observed changes in seasons: an overview. *International Journal of Climatology* 22, 1715-1725.

Swinnen, E., Veroustraete, F., 2008. Extending the SPOT-VEGETATION NDVI TIME series (1998-2006) Back in time with NOAA-AVHRR Data (1985-1998) for Suthern Africa *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 46, 558-572.

Tucker, C., Pinzon, J., Brown, M., Slayback, D., Pak, E., Mahoney, R., Vermote, E., El Saleous, N., 2005. An extended AVHRR 8km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing* 26, 4485-4498.

Turcotte, K.M., Lulla, K., Venugopal, G., 1993. Mapping small-scale vegetation changes of Mexico. *Geocarto International* 8, 73-85.

Turner II, B.L., Meyer, W.B., Skole, D., 1994. Global Land-Use/Land-Cover Change: Towards an Integrated Study. *Ambio* 23, 91-95.

Vancutsem, C., Pekel, J.F., Evrard, C., Malaisse, F., Defourny, P., 2009. Mapping and characterizing the vegetation types of the Democratic Republic of Congo using SPOT VEGETATION time series. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 11, 62-76.

Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G., Culvenor, D., 2010. Detecting trend and seasonal changes in satellite images time series. *Remote Sensing of Environment*, 106-115.

Wang, Q., Adiku, S., Tenhunen, J., Granier, A., 2005. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote Sensing of Environment* 94, 244-255.

Wardlow, B.D., Egbert, S.L., Kastens, J.H., 2007. Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains. *Remote Sensing of Environment*, 290-310.

Watson, R., Noble, I.R., Bolin, B., Ravindranath, N.H., Verardo, D.J., Dokken, D.J., 2000. *Land Use, Land-Use Change, and Forestry*

A Special Report of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Weiss, M., Baret, F., Garrigues, S., Lacaze, R., 2007. LAI and fAPAR CYCLOPES global products derived from VEGETATION. Part 2: validation and comparison with MODIS collection 4 products. *Remote Sensing of Environment* 110, 317-331.

Weiss, M., Baret, F., Smith, G.J., 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.

White, M.A., de Beurs, K.M., Didan, K., Inouye, D.W., Richardson, A.D., Jensen, O.P., O'KEEFE, J., Zhang, G., Nemani, R.R., van Leeuwen, W.J.D., 2009. Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006. *Global Change Biology* 15, 2335-2359.

Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., 1994. *At risk: natural hazards, people's vulnerability, and disasters*. Routledge, Oxon.

Wolfe, R.E., Nishihama, M., Fleig, A.J., Kuyper, J.A., Roy, D.P., Storey, J.C., Patt, F.S., 2002. Achieving sub-pixel geolocation accuracy in support of MODIS land science. *Remote Sensing of Environment* 83, 31-49.

Xiao, Z., Liang, S., Wang, J., Jiang, B., Li, X., 2011. Real-time retrieval of Leaf Area Index from MODIS time series data. *Remote Sensing of Environment* 115, 97-106.