



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA**

**PATRONES REGIONALES DE PRODUCTIVIDAD PRIMARIA
NETA EN EL ESTADO DE OAXACA: EL USO DE LA
PERCEPCIÓN REMOTA EN LOS ANÁLISIS ESPACIALES.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
LICENCIADO EN GEOGRAFÍA**

PRESENTA:

MARÍA LUISA CUEVAS FERNÁNDEZ



**FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
COLEGIO DE GEOGRAFÍA**

ASESOR: DR. LEOPOLDO GALICIA SARMIENTO

México, D.F., Agosto de 2004.





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**



Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: María Luisa Cuevas
Fernández

FECHA: 02 Agosto 2004

FIRMA: [Firma]

A PATRICIA FERNÁNDEZ HERNÁNDEZ (1947-2003)

Han habido personas a lo largo de mi vida que me han ayudado y enseñado a entender el valor de la misma, de ahí mi necesidad de agradecerles y mostrarles todo mi cariño.

A mis padres Luis Cuevas y Patricia Fernández por su amor, por enseñarme a ser reflexiva, por confiar en mi y respetar mis decisiones. Gracias por apoyarme moral y económicamente durante estos años. A mi hermana Patty, por su enorme cariño.

A Manolo por su amor, su confianza, por compartir los momentos felices y los tristes. Por ser cómplice y compañía. Por enseñarme y dejarse enseñar los cachitos de mundo por lo que hemos andado juntos. Gracias.

A la familia Cuevas y a la familia Fernández.

A Jesús por ser un verdadero abuelo y a Ana Rosa por su cariño incondicional.

A Romina, Hylsia, Sandra y Araceli por todos los buenos momentos que hemos compartido y por lo mucho que hemos reído a lo largo de nuestra amistad.

A las Ararus por mostrarme que lo importante no es el tamaño de la semilla sino la fuerza y profundidad de sus raíces.

A la familia Canto Vergara por sus atenciones y su cariño.

A Socorro Estrada por desenredar mi cabeza loca y ayudarme a caer.

Al Dr. José Lugo, la Dr. Irasema Alcántara, y la Mtra. Tobyanne por contagiarme su amor a la geografía y por su amistad.

A René Ramos por su constante ayuda en todo lo referente a esta tesis.

Este trabajo es el resultado de cinco años de constante aprendizaje acerca de la Geografía así como fruto de un intenso año de reflexiones, ideas discutidas y de mucho trabajo. Agradezco el apoyo económico recibo por la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) y el Instituto de Geografía de la UNAM bajo el proyecto IN208902.

A pesar de todo este esfuerzo y tiempo invertido, no hubiera sido posible realizar esta tesis sin la ayuda y apoyo de ciertas personas a las cuales quisiera agradecer.

Al Dr. Leopoldo Galicia por su confianza y su enorme ayuda para completar este trabajo. Gracias por todo lo que aprendí de ti.

Al Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota del Instituto de Geografía por las imágenes y las facilidades brindadas para realizar el procesamiento de las mismas.

Especialmente agradezco a la M. en C. Gabriela Gómez Rodríguez, Técnico Académico Titular B su apoyo en el laboratorio, el cual consistió en el asesoramiento del manejo de las imágenes, los programas utilizados para su procesamiento, así como el trabajo con las bases de datos y mapas.

Al Dr. Víctor Magaña Rueda del Centro de Ciencias de la Atmósfera, por su ayuda en la recolección de los datos de precipitación así como en la aplicación del análisis espectral.

Al jurado conformado por el Dr. José Luis Palacio Prieto, el Biol. Edward M. Peters Recagno., el Dr. Arturo García Romero y la Mtra. en Geog. Leticia Gómez Mendoza por las valiosas observaciones que permitieron el enriquecimiento de la tesis.

INDICE

RESUMEN	I
1.INTRODUCCIÓN	
1.1. Productividad Primaria Neta	1
1.2. Fenología	5
1.3. Productividad Primaria Neta, Clima y NDVI	7
1.4. Percepción Remota y NDVI	9
1.5. Diversidad biológica del Estado de Oaxaca	14
1.6. Planteamiento del problema	22
1.7. Objetivo general	23
1.8. Objetivos particulares	23
2.METODOLOGÍA	
2.1. Agrupación de tipos de vegetación	24
2.2. Procesamiento de imágenes	27
2.3. Análisis de imágenes	29
2.4. Análisis estadístico	30
2.5. Obtención y análisis de datos climáticos	30
3.RESULTADOS	
3.1. Variabilidad interanual de la productividad primaria del Estado de Oaxaca	32
3.1.1. Valores anuales promedio del NDVI	32
3.1.2. Valores anuales máximos del NDVI	35
3.1.3. Valores anuales mínimos del NDVI	38
3.2. Variabilidad interanual de la productividad primaria neta acumulada	41
3.3. Variabilidad espacial anual de los NDVI para el Estado de Oaxaca	45
3.4. Variabilidad intraanual de los NDVI para los 15 tipos de vegetación estudiados	55
3.4.1. Bosque de encino	55
3.4.2. Bosque de encino-pino	58
3.4.3. Bosque de pino	61
3.4.4. Bosque de pino-encino	64
3.4.5. Bosque de táscate	67
3.4.6. Bosque mesófilo	70
3.4.7. Chaparral	73
3.4.8. Matorral	76
3.4.9. Selva alta y mediana perenne	78
3.4.10. Selva alta y mediana subperenne	82
3.4.11. Selva baja caducifolia	85
3.4.12. Selva baja subcaducifolia	87
3.4.13. Selva mediana	90
3.4.14. Cultivos	93
3.4.15. Pastizales inducidos	96

3.5.	Relación NDVI-precipitación	99
3.5.1.	Patrones de precipitación de los seis tipos de vegetación estudiados mediante un análisis espectral	99
3.5.2.	Resultados del análisis espectral aplicado a los valores de NDVI y la precipitación	110
4.	DISCUSIÓN	
4.1.	Patrones anuales de NDVI de 15 tipos de vegetación del Estado de Oaxaca	114
4.2.	Patrones estacionales de los NDVI de 15 tipos de vegetación del Estado de Oaxaca	118
4.3.	Relaciones entre la precipitación y los NDVI de 6 tipos de vegetación del Estado de Oaxaca	121
5.	CONCLUSIONES	125
6.	BIBLIOGRAFÍA	128

INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

FIGURAS

1.	Topografía del Estado de Oaxaca	15
2.	Mapa reclasificado de la vegetación del Estado de Oaxaca	26
3.	Variabilidad interanual de los valores promedio del NDVI en 15 tipos de vegetación a lo largo de siete años	34
4.	Variabilidad interanual de los valores promedio del NDVI en 7 años para los tres tipos de vegetación más contrastantes	34
5.	Variabilidad interanual de los valores máximos de NDVI en los 15 tipos de vegetación a lo largo de siete años	37
6.	Variabilidad interanual de los valores máximos de NDVI en el chaparral y los matorrales a lo largo de siete años	37
7.	Variabilidad interanual de los valores acumulados del NDVI en 15 tipos de vegetación a lo largo de siete años	43
8.	Variabilidad de los valores acumulados del NDVI en las selvas altas y medianas perennes en una secuencia de siete años	43
9.	Variabilidad interanual de los valores acumulados del NDVI en cinco tipos de selvas a lo largo de siete años	44
10.	Variabilidad interanual de los valores acumulados del NDVI en seis tipos de bosques a lo largo de siete años	44
11.	División del Estado de Oaxaca según los ciclos anuales regionales de la precipitación	47
12.	Valores de la media anual del NDVI para el Estado de Oaxaca en 1997	48
13.	Valores de la media anual del NDVI para el Estado de Oaxaca en 1998	49
14.	Valores de la media anual del NDVI para el Estado de Oaxaca en 1999	50
15.	Valores de la media anual del NDVI para el Estado de Oaxaca en 2000	51
16.	Valores de la media anual del NDVI para el Estado de Oaxaca en 2001	52
17.	Valores de la media anual del NDVI para el Estado de Oaxaca en 2001	53
18.	Valores de la media anual del NDVI para el Estado de Oaxaca en 2003	54
19a.	Variabilidad intraanual de los valores promedio en los bosques de encino del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	57
19b.	Variabilidad interanual de los valores acumulados en los bosques de encino del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	57
20a.	Variabilidad intraanual de los valores promedio en los bosques de encino-pino del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	60
20b.	Variabilidad interanual de los valores acumulados en los bosques de encino-pino del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	60

21a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en los bosques de pino del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	63
21b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en los bosques de pino del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	63
22a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en los bosques de pino-encino del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	66
22b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en los bosques de pino-encino del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	66
23a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en los bosques de táscate del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	69
23b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en los bosques de táscate del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	69
24a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en los bosques mesófilos del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	71
24b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en los bosques mesófilos del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados.	71
25a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en los chaparrales del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	75
25b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en los chaparrales del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	75
26a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en los matorrales del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados.	77
26b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en los matorrales del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	77
27a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en las selvas altas y medianas perennes del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	81
27b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en las selvas altas y medianas perennes del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	81
28a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en las selvas altas y medianas subperennes del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	83
28b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en las selvas altas y medianas subperennes del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	83
29a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en las selvas bajas caducifolias del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	86

29b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en las selvas bajas caducifolias del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	86
30a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en las selvas bajas subcaducifolias del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	89
30b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en las selvas bajas subcaducifolias del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	89
31a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en las selvas medianas del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	92
31b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en las selvas medianas del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	92
32a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en los cultivos del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	94
32b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en los cultivos del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	94
33a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en los pastizales inducidos del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados	98
33b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en los pastizales inducidos del Estado de Oaxaca en los siete años estudiado	98
34. Precipitación media anual en zona de cultivos para los siete años estudiados	100
35. Precipitación media en anual zona de matorrales para los siete años estudiados	102
36. Precipitación media anula en zona de pastizales para los siete años estudiados	104
37. Precipitación media anual en zona de bosques de pino-encino para los siete años estudiados	105
38. Precipitación media anual en zona de selvas bajas caducifolias para los siete años estudiados	107
39. Precipitación media anual en zona de selvas altas y medianas perennes para los siete años estudiados	109
40. Relación entre los valores de NDVI y la precipitación para dos tipos de vegetación en 1997: a) Matorral, b) Selvas bajas caducifolias.	111

TABLAS

1. Superficie cubierta por los grandes biomas en México y El Estado de Oaxaca	19
2. Clasificación y cobertura de la vegetación en el Estado de Oaxaca	25
3. Relación de satélites a partir de los cuales se obtuvieron las Imágenes	27
4. Relación de compuestos a lo largo de los siete años estudiados	29
5. Media anual de NDVI +- 1e.e de 15 tipos de vegetación para siete años en el Estado de Oaxaca.	33
6. Valores máximos de NDVI +- 1e.e de 15 tipos de vegetación para siete años en el Estado de Oaxaca.	36
7. Valores mínimos de NDVI +-1e.e de 15 tipos de vegetación para siete años en el Estado de Oaxaca.	40
8. Valores acumulados de NDVI +- 1e.e de 15 tipos de vegetación para siete años en el Estado de Oaxaca	42
9. Resultados del análisis espectral aplicado a seis tipos de vegetación representativos del Estado de Oaxaca	113

RESUMEN

La productividad primaria neta (PPN) es la cantidad de carbono fijado vía la fotosíntesis, disponible para el crecimiento y la reproducción de las plantas. La vegetación terrestre aporta 60% de la PPN total. La productividad primaria neta de los distintos tipos de vegetación está definida por el inicio, fin y duración de su época de crecimiento, la cual a su vez está principalmente influenciada por factores climáticos como la lluvia y la temperatura.

La medición de la PPN requiere de gran esfuerzo humano y económico, sobre todo cuando se busca estimar la PPN de amplias zonas geográficas con una marcada diversidad biológica. El uso de la percepción remota ha significado una alternativa útil para poder hacer dicha estimación en amplias escalas geográficas. Las imágenes NOAA-AVHRR y el Índice Diferencial Normalizado de la Vegetación (NDVI por sus siglas en inglés) permiten estimar la productividad primaria neta arbórea (PPNA) de la vegetación por medio de la reflectancia y la absorción de las bandas roja e infrarroja del espectro de luz por parte de las hojas.

El objetivo principal de éste trabajo fue establecer los patrones de PPN de los principales tipos de vegetación del Estado de Oaxaca, así como poder observar la influencia de la precipitación en el comportamiento de la época de crecimiento. El Estado de Oaxaca presenta una gran variedad de ecosistemas debido principalmente a su localización entre las dos grandes zonas templada y tropical, su compleja topografía, su hidrografía, su geología, su diversidad de tipos de suelo, su cercanía al mar y su clima. El trabajo realizado consistió en estimar la PPNA a lo largo de siete años (1997-2003) de quince tipos de vegetación (bosques de encino, encino-pino, pino-encino, táscate y mesófilo, selvas altas y medianas perennes, subperennes, bajas caducifolias, bajas subcaducifolias y medianas, matorral, chaparral, cultivos y pastizales inducidos) del Estado de Oaxaca, vía imágenes AVHRR procesadas con el NDVI.

Los resultados obtenidos nos indican que los años con mayor PPNA para los quince tipos de vegetación estudiados fueron 1997, 1998 y 2002, mientras que los de menor productividad fueron el 2000 y 2001. Este resultado coincide con los años en los que se registró mayor precipitación. Asimismo de los quince tipos de vegetación, las selvas altas y medianas perennes fueron las que mayor PPNA registraron a lo largo de los siete años, a diferencia de los matorrales, lo cuales reportaron los menores valores de productividad.

Con respecto a la duración de la época de crecimiento fue posible distinguir entre los tipos de vegetación perennes y los caducifolios, así como la influencia de la precipitación en el comportamiento anual de dicho periodo al interior de los distintos tipos de vegetación. También fue posible distinguir la relación directa entre el inicio, fin y duración del periodo de crecimiento y los valores de PPNA. Es así que las selvas altas y medianas perennes y los bosques templados tuvieron los periodos de crecimiento más extensos con valores de productividad más altos, mientras que los matorrales, cultivos, chaparrales y pastizales inducidos presentaron los valores de productividad más bajos, así como periodos de crecimiento más cortos.

Con la aplicación de un análisis espectral se buscó conocer el tiempo de respuesta de la vegetación ante condiciones cíclicas de precipitación. Los resultados indicaron que el matorral es el tipo de vegetación que más rápido responde ante los eventos de precipitación, mientras que los bosques de pino-encino son los que más tardan en dicha respuesta.

Los resultados sugieren que la precipitación juega un papel fundamental en los patrones de PPNA, así como en los periodos fenológicos de la vegetación. Las diferencias en los valores de productividad nos indican que la diversidad biológica del Estado de Oaxaca juega un papel fundamental en el secuestro de carbono.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Productividad primaria Neta

Las características de la vegetación como la estructura, la productividad primaria, así como su variabilidad espacial y temporal son algunos de los parámetros más utilizados para obtener un mejor entendimiento del complejo funcionamiento de los ecosistemas (Goward et al. 1985, Curran 1994, Markon et al. 2002, Scurlock y Olson 2002). Asimismo, dichos parámetros también son importantes para entender la salud de la biosfera, por lo que es urgente la necesidad de construir una base de datos consistente de la productividad primaria neta terrestre, sobre todo si consideramos que el 60% de la productividad primaria neta de la biosfera ocurre en la parte sólida del planeta (Curran 1994, Chapin et al. 2001, Scurlock y Olson 2002). La productividad primaria captura la porción de energía solar que soporta la vida de todos los componentes de la biosfera. La mayor parte del alimento de la humanidad es resultado de la productividad de las plantas vivas en la Tierra. La productividad de la vegetación tiene la habilidad de soportar a las poblaciones humanas desde hace miles de años. Asimismo los combustibles fósiles son producto de la acumulación de la productividad primaria del pasado (Lieth 1975). Se estima que sólo los bosques tropicales aportan un tercio de la productividad primaria neta terrestre del planeta y que los bosques en conjunto aportan la mitad (Chapin et al. 2001).

La productividad primaria neta de los ecosistemas se refiere al flujo de carbono de la atmósfera a la biomasa verde de las plantas (Odum 1971, Lieth 1975, Sala y Austin 2000). El intercambio de carbono como dióxido de Carbono (CO_2) entre ecosistemas y la atmósfera refleja el balance entre los procesos complementarios de la fotosíntesis y la respiración de las plantas. La productividad de la vegetación, en particular la productividad primaria neta ha sido históricamente un importante parámetro biofísico utilizado para determinar la salud y el "estatus" de la vegetación, asimismo es una variable ecológica fundamental cuando se relaciona con la entrada de energía en la biosfera (Sala y Austin

2000, Markon et al. 2002). McNaughton (1989) propuso a la productividad primaria neta como una variable integradora del funcionamiento de todo el ecosistema debido a su relación con la biomasa animal, la productividad secundaria y el ciclo de nutrientes.

Una porción de la radiación fotosintéticamente activa (RFA), radiación entre los 400 a los 700 nm de onda recibida por los ecosistemas es absorbida por las plantas verdes. La energía absorbida es también reflejada, perdida como calor latente o almacenado por la actividad fotosintética en sustancias orgánicas. La productividad primaria bruta es la energía almacenada por las plantas y convertida en sustancias orgánicas. La productividad primaria bruta incluye tanto la productividad primaria neta como la respiración de las plantas. Por otro lado, la productividad primaria neta es el balance entre la fijación del carbono vía la fotosíntesis y la pérdida de carbono debido a la respiración de las plantas, por lo que la productividad primaria neta representa el carbono disponible por la vegetación para su distribución en las hojas, ramas, tallos, raíces, regeneración, crecimiento y reproducción.

La estimación de la productividad primaria neta tiene numerosas aplicaciones y usos teóricos, incluyendo la estimación de la disponibilidad de comida en la agricultura y de la producción de madera (Lieth 1975, Vitousek et al. 1986), la disponibilidad de hábitats para la vida silvestre y la capacidad de carga (Hoefs 1984, Shariff et al. 1994, Blackburn y Gaston 1996), la diversidad de especies (Daniel et al. 1996) y la asimilación del dióxido de carbono terrestre (Ohta et al. 1993). Asimismo puede ser utilizada para documentar los cambios en las condiciones de uso del suelo, como los cambios de cobertura vegetal (Foster et al. 1998, Jobbágy et al. 2002, Maxwell et al. 2002, Velázquez et al. 2003), la disponibilidad de agua y la disponibilidad de nutrientes (Paruelo et al. 1998); finalmente ha demostrado ser sobre todo un parámetro integrador del funcionamiento del ecosistema así como un indicador de los procesos funcionales en

cuanto a la cadena alimenticia (McNaughton et al. 1989, Soriano y Paruelo 1992, Field et al. 1995) (Markon et al. 2002).

Registros de la productividad de la vegetación (en el sentido de la producción de materia económicamente valiosa por unidad de tiempo) comenzaron a ser elaborados a finales del siglo XIX para la comercialización de bienes como cereales, forrajes o productos forestales (Olson 1964). Sin embargo, estudios específicos de monitoreo de la productividad de la vegetación natural a largo plazo no se realizaron hasta la década de los cincuentas. Algunos ejemplos de esfuerzos coordinados para compilar información sobre la productividad primaria neta de la vegetación, incluyen al Programa Biológico Internacional (IBP por sus siglas en inglés), al Programa de Investigación Ecológica a Largo Plazo de Estados Unidos (LTER por sus siglas en inglés) así como la base de datos Osnabrück (Scurlock y Olson 2002).

Estimar la productividad primaria neta ha sido una meta central de la ecología básica y aplicada a lo largo de los últimos treinta años, es por ello que se ha venido desarrollando de manera coordinada una base de datos con la productividad primaria neta terrestre estimada para distintos puntos del planeta (Scurlock y Olson 2002). Temas relevantes como el balance del carbono, la localización de los sumideros de carbono y la predicción del cambio climático global, son cuestiones que están relacionadas con una buena estimación de la productividad primaria neta (Sala y Austin 2000).

Dada su importancia ecológica, existen diversos métodos para estimar la productividad primaria neta arbórea según la velocidad con la que se lleven a cabo los procesos en el ecosistema (Whittaker y Marks 1975, Sala y Austin 2000). Por ejemplo, calcular los picos de la biomasa e igualar ese valor con al productividad anual, estimar la biomasa mínima y máxima y obtener su diferencia, medir la productividad por especies y luego sumarlas para calcular la productividad total, cosechar la biomasa arbórea durante la época de crecimiento, son métodos utilizados en vegetación con un rápido recambio

como sería el caso de los pastizales, las estepas y los cultivos. Por otro lado, cosechar muestras de diversos componentes de las plantas y el ecosistema para luego separar los componentes, secarlos y obtener sus pesos secos; coleccionar hojas y ramas a lo largo de un periodo mínimo de un año asumiendo que el mantillo representa la productividad arbórea en un periodo determinado; estimar el índice de área foliar por medio de la intensidad de la luz en la parte baja y alta del dosel; medir la altura, circunferencia basal y diámetro a la altura del pecho para estimar la biomasa vía regresiones; ayudan a estimar la productividad primaria en vegetación de mayores dimensiones y con un recambio lento como serían los bosques y las selvas. De los objetivos del estudio, así como la extensión temporal deseada, dependerá el método a utilizarse (Markon et al. 2002).

Sin embargo, cuando lo que se busca es la estimación de la productividad primaria neta en amplias escalas espaciales los métodos anteriores resultan difíciles de llevar a cabo, en parte por la cantidad de recursos humanos y económicos necesarios, así como por la dificultad de extrapolar dicha información a mayores escalas. El reto más grande que enfrentan quienes estudian a la Tierra como un sistema global es la búsqueda de métodos cuantitativos para monitorear y cartografiar a distintas escalas los patrones de productividad primaria neta.

Vale la pena mencionar el trabajo realizado por el Programa Biológico Internacional a principios de los sesentas, el cual consistió en estimar la productividad primaria neta de la vegetación del mundo con base a trabajos realizados en distintos tipos de vegetación. Entre los datos que se presentan cabe resaltar que los bosques tropicales lluviosos son el tipo de vegetación más productivo ($\sim 2000 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$), le siguen los bosques lluviosos perennes ($\sim 1500 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$), los bosques templados perennes ($\sim 1300 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$), los bosques templados deciduos ($\sim 1200 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$), los bosques caducifolios ($\sim 1000 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$), los bosques boreales ($\sim 800 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$), el chaparral ($\sim 800 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$), los pastizales tropicales ($\sim 700 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$), la estepa ($\sim 600 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$),

las zonas cultivadas ($\sim 650 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$), y los pastizales templados ($\sim 500 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) (Lieth 1975). Este trabajo fue el primer esfuerzo real a nivel mundial de cuantificar y cartografiar la productividad primaria neta.

Hoy en día son muchos los trabajos relacionados con la estimación de la productividad primaria neta tanto a nivel mundial como continental o regional. El uso de la percepción remota y los sistemas de información geográfica han resultado ser de gran ayuda en los estudios de éste tipo gracias a su amplia distribución y a su cada vez más accesible manejo (Ricota y Avena 2000).

1.2. Fenología

La fenología es el estudio a través del tiempo de ciclos biológicos recurrentes y su conexión con el clima (Jackson et al. 2001, White et al. 2002). La caída de las hojas, su reverdecimiento, la floración y la aparición de frutos son ejemplos típicos de ciclos biológicos recurrentes. Sin embargo, existen procesos que se llevan a cabo en el suelo que también son importantes, el inicio de la época de crecimiento de las raíces es un ejemplo, sin embargo éstos ciclos son mucho más difíciles de estudiar y medir.

La fenología de las plantas es el resultado de la interacción entre los factores bióticos y los climáticos los cuales ayudan a determinar el mejor momento para el crecimiento y la reproducción (Van Schaik et al. en Marques et al. 2004), así como la distribución de los recursos para el adecuado funcionamiento de la planta en un periodo climático determinado (primavera, verano, otoño e invierno, principalmente) (Jackson et al. 2001). Las diferentes formas de vida responden de manera distinta a los factores climáticos debido a sus adaptaciones morfológicas y fisiológicas, reflejando así las distintas maneras en las que el agua y los nutrientes son incorporados, distribuidos y utilizados (Marques et al. 2004). Es común encontrar una concordancia entre las distintas respuestas fenológicas de las plantas debido a que dependen de los mismos recursos

internos, es así que algunas especies producen sus flores y hojas al mismo tiempo, mientras otras lo hacen en distintos momentos. De igual manera, algunas plantas asignan la misma cantidad de recursos para el crecimiento de la estructura externa como para el de las raíces, mientras que otras lo separan (Jackson et al. 2001).

Las condiciones ambientales también juegan un papel importante en las respuestas fenológicas de la vegetación. Los ambientes ricos en luz, agua y nutrientes favorecen la producción de hojas de rápido recambio a lo largo de la época de crecimiento y su arreglo a lo largo de múltiples capas, mientras que los ambientes pobres favorecen la producción de pocas hojas pero que duran toda la época de crecimiento con un arreglo en una sola capa (Jackson et al. 2001)

Los estudios relacionados con el inicio, fin y duración de la época de crecimiento de la vegetación han tomado cada vez más relevancia debido a la relación directa que existe entre éste periodo, el clima y la productividad primaria neta de la vegetación. Los cambios registrados en el clima global, están obligando a los científicos a hacer estudios más completos acerca de los costos y beneficios asociados con las respuestas fenológicas, así como de las alteraciones en los tiempos de respuesta de ciertos procesos de la vegetación. Estudios realizados a mediados de los años 90 han determinado que en las últimas décadas, entre los 40° N y los 70° N, la vegetación ha adelantado 12 días su inicio de secuestro de CO₂ (Myneni et al. 1997), lo que implica una extensión del periodo de crecimiento y por lo tanto una modificación a los patrones de productividad primaria neta.

Estas modificaciones en los patrones fenológicos obligan a pensar en las consecuencias globales que los cambios en la composición de los biomas pueden desencadenar. Si los cambios climáticos afectan a la vegetación lo suficiente como para modificar las interacciones y competitividad entre las especies, la composición de los ecosistemas se vería alterado lo que conllevaría a una modificación de la fenología

dominante y de la productividad primaria neta. Especies que en la actualidad son componentes minoritarios en los ecosistemas, podrían volverse de suma importancia antes cambios más significativos del clima, su eliminación por cambios de uso de suelo en la actualidad podría significar una limitante importante en el funcionamiento de los ecosistemas en el futuro (Jackson et al. 2001), de ahí la importancia de estudiar las respuestas fenológicas de los distintos tipos de vegetación así como de mantener la biodiversidad.

El monitoreo de la fenología de la vegetación es de suma utilidad en la planeación y manejo de los recursos. La percepción remota y el Índice Diferencial Normalizado de la Vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés) ofrecen la oportunidad de medir los patrones fenológicos a escalas locales (White et al. 2002, Bonfiglio et al. 2002, Groten et al. 2002, Hope et al. 2003, Marques et al. 2004) y regionales (Minen et al. 1997, Foster et al. 1998, Chidumayo et al. 2001, Sarkar y Kafatos 2004), lo cual a su vez permite estimar la variabilidad de los patrones de productividad primaria neta, las diferencias entre los distintos tipos de vegetación con respecto a su capacidad para secuestrar y aprovechar el carbono, así como para medir la respuesta de la vegetación a variaciones climáticas en un corto, mediano y largo plazo.

1.3. Productividad Primaria Neta, Clima y NDVI

Como se ha mencionado anteriormente la productividad primaria neta se ve modificada por las condiciones ambientales como la topografía, la disponibilidad de agua, la temperatura, los nutrientes del suelo, la predisposición a los fuegos, etc. Sin embargo, a escala global, la temperatura y la precipitación son los principales factores que controlan la variabilidad en la productividad primaria bruta y la productividad primaria neta de los ecosistemas (Rosenzweig 1968, Lieth 1975, Churkina y Running 1998, Chapin et al. 2002, Wang et al. 2003). El estrés causado por la falta de agua está comúnmente asociado a

condiciones de alta luminosidad, lo que implica mayor insolación, baja precipitación y baja humedad. Así mismo, la alta luminosidad favorece el incremento de la temperatura en las hojas y la concentración de vapor de agua encima de las mismas lo que condiciona la pérdida de mucha agua vía la transpiración, así como la limitación para capturar carbono.

Los patrones espaciales y temporales del NDVI están ligados con: los patrones de temperatura y precipitación (Schultz y Halpert 1993), la evapotranspiración (Cihlar et al. 1991), la humedad (Narasimha Roa et al. 1993) y las propiedades físicas del suelo (Lozano-García et al. 1991 en Yang et al. 1994). En amplias escalas geográficas la determinación de los NDVI permite predecir los cambios en la productividad bajo diferentes escenarios climáticos (Wang et al. 2003). Debido a lo anterior, es necesario entender la influencia de las variables del clima, principalmente precipitación y temperatura en la productividad primaria neta. Jobbagy et al. (2002) sugieren que la variación de la precipitación a lo largo de un gradiente espacial provoca cambios en la productividad primaria neta arbórea (PPNA), al igual que en la estructura de la comunidad vegetal o su composición florística. En contraste la fluctuación a través del tiempo de la precipitación afecta la PPNA sin causar importantes cambios en la estructura de la vegetación.

Existen numerosos estudios acerca de la influencia de la precipitación y la temperatura en los NDVI y por lo tanto de la productividad primaria neta (Yang et al. 1994, Veron et al. 2002, Wang et al. 2003, Wang et al. 2003), y aunque queda claro que la relación entre dichas variables es directa no siempre ésta relación es positiva o puntual.

La finalidad principal de los estudios que miden la relación de la productividad con los factores climáticos radica en determinar la fenología de la vegetación es decir estimar el inicio y fin de la época de crecimiento, su duración y la variabilidad de dicho comportamiento a lo largo de una escala temporal amplia (Lieth 1975, Paruelo et al. 1998, Groten y Ocatre 2002, Bubier et al. 2003, Hope et al. 2003). La fenología ayuda, entre

otras cosas, a decidir en que momento sembrar, en cual cosechar, etc. Pero lo esencial es que se ha comprobado que la duración de los eventos fenológicos pueden afectar directa y significativamente el crecimiento y reproducción de las plantas de ahí la necesidad de estudiar el comportamiento de las distintas comunidades vegetales ante los eventos fenológicos. De igual manera se busca entender los cambios en la fenología de la vegetación que podrían llevar a una pobre sincronización entre los eventos de crecimiento y reproducción y los ciclos estacionales (primavera, verano, otoño e invierno) (Jackson et al. 2001).

Otro aspecto interesante es la disminución en los periodos de recurrencia de los fenómenos climáticos, es por ello que otro de los objetivos por lo que se llevan a cabo estudios de la relación clima-productividad, es analizar la variabilidad de la productividad primaria neta, por medio de los NDVI, bajo condiciones específicas de extrema sequía o humedad como sería el caso de los años en los que se presenta El Niño (Holmgren et al. 2001, Salinas-Zavala et al. 2002, Yu et al. 2003). Así mismo, bajo escenarios de cambio climático se busca estimar la variación de la productividad primaria a distintas escalas y con ello determinar las zonas de mayor vulnerabilidad en lo que ha perdidas de carbono se refiere. Se ha sugerido que durante periodos de El Niño de calor y sequías extremas la región del Amazonas actúa como una fuente de emisión de carbono en lugar de su función habitual como sumidero (Holmgren et al. 2001).

1.4. Percepción Remota y NDVI.

Gran parte de los problemas ambientales que enfrenta la ciencia y la humanidad hoy en día están relacionados con amplias escalas espaciales y temporales, los cambios de uso de suelo, las modificaciones del clima, el aumento de CO₂ en la atmósfera son solo algunos de ellos. Como consecuencia del incremento del dióxido de carbono atmosférico y el cambio climático global, la productividad primaria neta de grandes áreas

puede estar cambiando (Myneni et al. 1997, VEMAP 1995, Melillo et al. 1993). Es por eso que se requiere entender la variabilidad regional en el proceso del ciclo del carbono y su repercusión en los procesos globales en la superficie terrestre, desde un análisis espacial más detallado (Running y Gower 1991, Waring y Running 1998, Running et al. 2000, Roy et al. 2001, Wang et al. 2003).

Las estimaciones de la dinámica de C a escala regional son poco comunes, pero son imprescindibles para evaluar los efectos del cambio de uso del suelo sobre el los capitales de C en vegetación y suelo (Wali et al. 1999, Wessman y Asner 1998, West y Wali 2001). La biomasa aérea y subterránea de los ecosistemas forestales sin perturbar juega un papel importante en el ciclo global del C, debido a que estos sistemas contienen en sus plantas la fracción predominante del capital de carbono global, la biomasa de los ecosistemas forestales representa el 30% del C terrestre, y evidentemente tiene una mayor acumulación de C que otros tipos de uso del suelo (Jackson et al. 2001, Wang et al. 2001). La utilización de herramientas como la percepción remota y los sistemas de información geográfica nos han permitido entender los procesos ecosistémicos a otras escalas espaciales (Jobbágy et al. 2002, Lefsky et al. 2002, Ollinger et al. 2002). Las imágenes de satélite AVHRR, Landsat, SPOT, MODIS, entre otras, permiten generar información para clasificar los tipos de uso del suelo (Bürgi y Turner 2002, Dale et al. 2001, Heilman et al. 2002); los bosques en función de su composición de especies y su fenología (Blair y Hofton 1999, Dubaya y Drake 2000); la composición química del dosel (Ollinger et al. 2002, Wesman y Asner 1997), el índice de área foliar, la densidad y la biomasa vegetal (Davis y Roberts 2000). La información generada a través de las imágenes adquiridas por la percepción remota permite entender y analizar los aspectos estructurales y funcionales de los ecosistemas a diferentes escalas espaciales y temporales.

La magnitud de los capitales del carbono terrestre varía en tiempo y espacio, y el balance entre los principales procesos activos (asimilación de carbono por fotosíntesis, tasas de respiración y salida de carbono) determinan el intercambio neto entre la biosfera y la atmósfera. Hasta hace poco, los procesos ecológicos se estudiaban a escala de sitio, mientras que los procesos atmosféricos requerían de ser trabajado a una escala mayor, es por ello que los retos actuales de la ciencia han obligado a que los procesos ecológicos se estudien a la misma escala que los atmosféricos o por lo menos a una escala más amplia, para poder así entender el impacto que los diferentes aspectos del clima global tienen sobre ellos y para poder conectar los estudios ecológicos con los atmosféricos (Wessman 1992, Paruelo y Lauenroth 1995, Ciais et al. 2001, Cramer et al. 2001).

Herramientas de investigación como la percepción remota y los modelos de simulación permiten clarificar principios ecológicos generales expandiendo las limitaciones propias de los estudios de sitio (Jobbagy et al. 2002, Lefsky et al. 2002, Ollinger et al. 2002). Asimismo los avances de la percepción remota, los sistemas de información geográfica y los modelos de simulación permiten cálculos cuantitativos de las consecuencias de la heterogeneidad en los sistemas terrestres sobre grandes escalas espaciales y temporales (Wessman 1992), así como monitorear la estacionalidad de la productividad primaria neta (PPN) sobre grandes extensiones.

Para Running et al. (2000) la base teórica para la estimación satelital de la PPN terrestre tiene tres componentes: i) la idea de que la PPN de las plantas está directamente relacionada a la energía solar absorbida, ii) la conexión teórica entre la energía solar absorbida y los índices de vegetación satelitales y iii) el análisis de las causas en las variaciones de la conversión final de la eficiencia. Los índices espectrales de la vegetación derivados de los datos de la percepción remota cuantifican la fracción absorbida de la radiación fotosintéticamente activa. Existen varios índices de vegetación: El primer índice el Radio Vegetation Index (RVI) fue creado por Pearson & Miller en 1972; le

siguió el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) creado por Rouse et al. en 1974; en 1977 Richardson & Wiegand elaboraron el Perpendicular Vegetation Index (PVI) el cual es reescrito en 1980 por Jackson et al.; Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) es un índice creado en 1988 por Huete, Baret & Guyot introdujeron en 1991 el Transformed SAVI (TSAVI), en 1994 Qi et al. crearon el Modified SAVI (MSAVI) el más reciente de los índices, el Optimized SAVI (OSAVI) apareció en 1996 y fue elaborado por Rondeaux et al. (Gilabert et al. 1997). Sin embargo el índice más usado, casi por tres décadas, para describir coberturas vegetales es el Índice Diferencial Normalizado de la Vegetación (NDVI), el cual usa la reflectancia de la onda roja e infrarroja debido a que la reflectancia de la vegetación pasa de un mínimo relativo en el rojo, correspondiente a la banda de absorción de la clorofila, a un máximo absoluto en el infrarrojo cercano que es consecuencia de las dispersiones múltiples de la radiación por el interior de la estructura celular. Se puede entonces afirmar que aproximadamente el 90% de la información relativa a la vegetación está contenida en estas dos bandas, por ello su amplia utilización en los índices de vegetación (Gilabert et al. 1997).

La productividad primaria bruta y la productividad primaria neta estimadas a través del NDVI son una aproximación de la actividad productiva o crecimiento de la vegetación terrestre. Varios estudios han sugerido la existencia de una relación positiva entre el NDVI derivado de los datos del satélite de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica/ Radiómetro de alta resolución (NOAA/AVHRR por sus siglas en inglés) y la biomasa o la productividad primaria neta anual para diferentes áreas geográficas y ecológicas (Goward et al. 1985, Tucker et al. 1985, Jobbagy et al. 2002). Sin embargo, gran parte de estos estudios se han realizado en áreas con tipos de vegetación homogénea (Paruelo et al. 1993, Paruelo et al. 1995, Paruelo et al. 1997, Paruelo et al. 1998, Groten et al. 2002, Jobbagy et al. 2002, Kitayama y Aiba 2002, Veron et al. 2002, Hicke et al. 2003, Hope et al. 2003, Moreau et al. 2003, Wang et al. 2003, Wang et al. 2003). Pocos han sido los

estudios que se han realizado en áreas donde la cobertura vegetal sea heterogénea (Ricota y Avena 2000, Markon et al. 2002, Maxwell et al. 2002, Bubier et al. 2003, Suzuki et al. 2003, Yu et al. 2003).

De la habilidad para usar los datos satelitales y ajustar los análisis regionales de la vegetación a zonas heterogéneas dependerá nuestro avance en la comprensión del papel de la fenología y el crecimiento en la productividad global de las plantas (Jackson et al. 2001). El estudio del papel funcional de la biodiversidad debe ser tomado cada vez más en serio si se quiere avanzar en la comprensión de los procesos ecológicos, especialmente en los referente a la productividad primaria (Roy 2001).

El principal uso teórico de la productividad primaria neta vía los NDVI es definir la dinámica estacional del balance de CO₂ en la superficie terrestre para estudios globales del ciclo de carbono así como medir los efectos de la destrucción de ciertos biomas en la composición de la atmósfera y el clima. La utilidad práctica es su utilización para estimar la distribución potencial de fuentes de alimento, el rendimiento de cultivos, la producción forestal, la capacidad de carga en los ecosistemas de cada país y otros beneficios económicos y sociales relacionados con el crecimiento de la vegetación (Box 1975, Running et al. 2000)

Lieth en 1960 elaboró el primer mapa mundial de productividad primaria de la vegetación, y desde entonces se han venido desarrollando nuevas técnicas y se ha generado nueva información que permite elaborar mapas más precisos y sofisticados, con información que permite reconocer los cambios en la cobertura vegetal, la influencia del clima en los procesos productivos, la duración de las épocas de crecimiento, la acumulación de biomasa por tipos de vegetación, entre otros. Sin embargo, los objetivos iniciales para la elaboración de dichos mapas siguen siendo los mismos: 1) crear mapas confiables de la productividad actual, 2) crear mapas de la productividad de los ecosistemas basados en las predicciones hechas a futuro con base a los datos actuales y

3) crear mapas a distintas escalas, desde la global hasta la local, que sean útiles para la planeación y el manejo de los recursos.

1.5. Diversidad biológica del Estado de Oaxaca

El Estado de Oaxaca, situado en el sector sureste de la República Mexicana, pertenece a la región del Pacífico Sur. El Estado de Oaxaca representa el 4.8 % de la superficie del país; sus coordenadas geográficas extremas son: 18°39' y 15°39' de latitud norte; 93°52' y 98°32' de longitud oeste (INEGI 2002). El Estado, colinda al norte con Puebla y Veracruz; al este con Chiapas; al sur con el Océano Pacífico y al oeste con Guerrero (Figura 1).

México alberga dentro de su territorio más de 12% de la biota total de mundo (Toledo 1988); pero los Estados de Oaxaca, Veracruz y Chiapas son los que contienen la mayor diversidad florística y faunística del país (Dávila y Sousa 1991). Por ejemplo, solamente Oaxaca en sus 95,364 Km² alberga el 10.2 % de bosques, el 8.5 % de selvas y el 4.2 % de pastizales a nivel nacional (INEGI 2002).

La diversidad biológica de una región es consecuencia de aquellos factores que favorecen tanto la aparición, acumulación y mantenimiento de nuevas especies, y que actúan durante un tiempo geológico considerable (Graham 1993). En el caso de Oaxaca, el mosaico de la gran diversidad biológica que en él alberga se debe a su acentuada y accidentada topografía, a su compleja historia geológica, a sus diferentes rasgos hidrológicos, a los diversos tipos de suelo que ahí se desarrollan, y a la gran variedad de climas y microclimas que se presentan como resultados de los factores anteriores. Todos estos elementos han contribuido al desarrollo de una flora y fauna característica y endémica (Dávila y Sousa 1991).

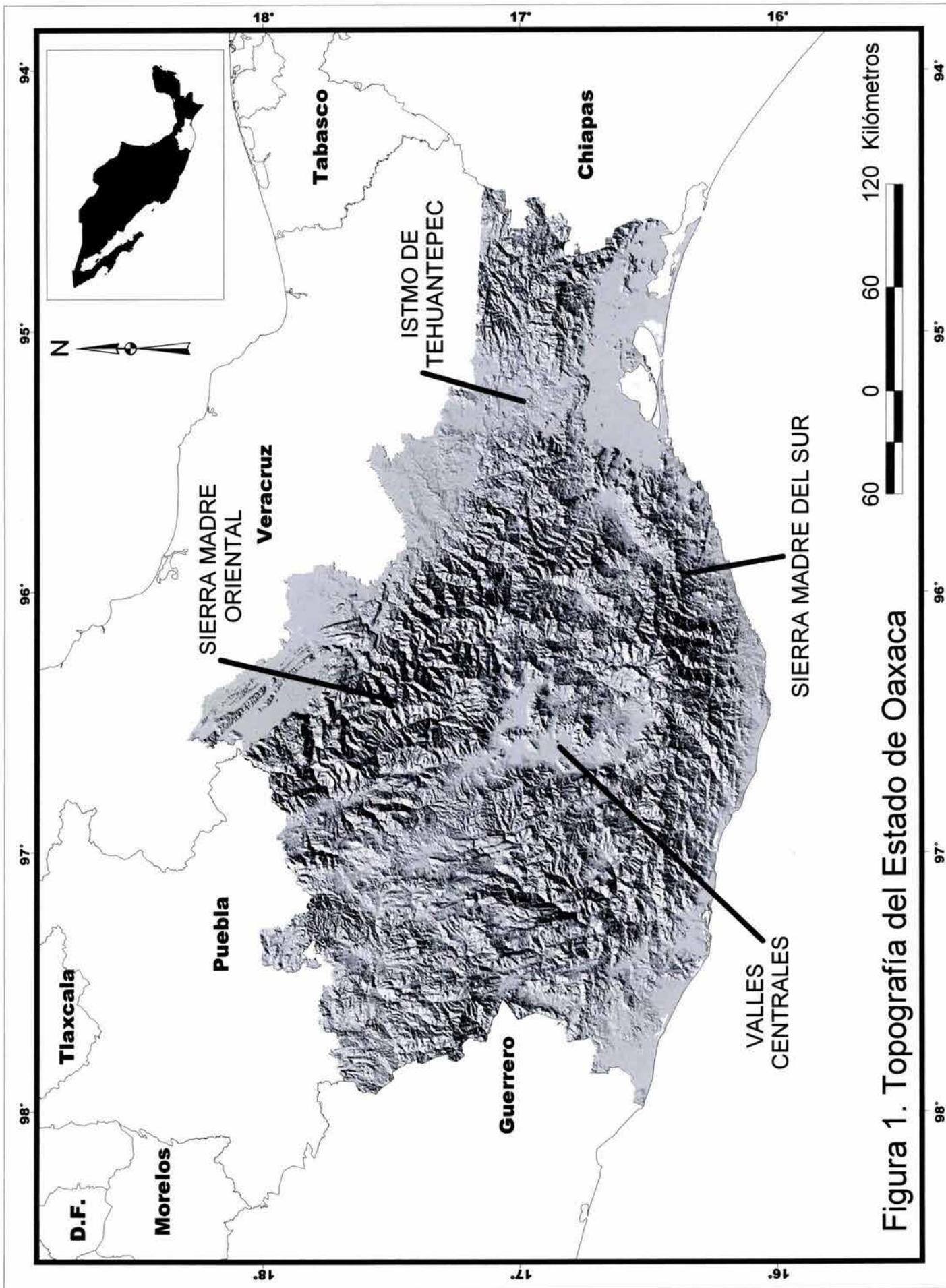


Figura 1. Topografía del Estado de Oaxaca

Elaboró: Ma. Luisa Cuevas Fdz.

Fuente: INEGI-CONABIO
Modelo Digital del Terreno

La localización geográfica de Oaxaca, así como las condiciones topográficas, geológicas, hidrológicas, edáficas y climáticas del Estado de Oaxaca han favorecido el desarrollo de la mayor parte de los tipos de vegetación existentes en el país, creando condiciones para la presencia de gran cantidad de endemismos. Se estima que para Oaxaca existen alrededor de 10,000 especies de plantas vasculares (Dávila y Sousa 1991), y aunque no se conoce el número exacto de especies endémicas, se sabe que el 6-7 % de las especies son endémicas. Por ejemplo, en una porción de la Sierra de Tamazulapan, en la Mixteca alta el 5% de las 500 especies de plantas vasculares registradas también son exclusivas de la región (García 1983 en Dávila y Sousa 1991).

La complejidad en la topografía de Oaxaca, se debe a la intersección de varios sistemas montañosos y los constantes movimientos tectónicos que se presentan. Estos sistemas montañosos, principalmente los cercanos a las costas del Pacífico facilitan el aislamiento de las comunidades bióticas y de sus especies (Challenger 1998). En el Estado de Oaxaca se pueden reconocer cinco principales sistemas hidrográficos los cuales se encuentran en estrecha relación con los cuatro principales sistemas montañosos: 1) La Sierra Madre de Oaxaca que forma parte de la Sierra Madre Oriental, por su extensión se le subdivide en Sierra Norte de Oaxaca, Sierra de Juárez, de Ixtlán, Sierra Mixe, de Tamazulapan y de Nochixtlán. El Río Papaloapan se origina en la Sierra de Juárez, corre por el Cañón de Tomellín donde se le unen varios afluentes y finalmente cruza la Sierra Madre de Oaxaca para desembocar en el Golfo de México (Lorence y García 1989; Tamayo 1999). 2) La Sierra Norte de Oaxaca, localizada en la porción noreste del Estado y dispuesta en sentido noroeste-sureste conforma el límite nororiental de los Valles Centrales. Los Valles Centrales están delimitados por las sierras Zapotecas al occidente, Miahuatlán al sur y la de Ixtlán y de Villalta al noreste (Ferrusquía-Villafranca 1993), en esta zona de valles es donde se origina el Río Verde que corre a través de la parte sur de la Sierra de Juárez, cruza la Sierra Madre del Sur para desembocar en los

estuarios de la Bahía de Chacahua (Lorence y García 1989). 3) La Sierra Madre del Sur, también llamada Sierra de Miahuatlán, se localiza al oeste del Estado y corre paralela a las costas del Océano Pacífico hasta el Istmo de Tehuantepec, donde se origina el Río Mixteco, un afluente del Río Balsas que drena al oeste de la Sierra Mixteca y la porción norte de la Sierra Madre del Sur (Lorence y García 1989). El Río Tehuantepec se origina entre la Sierra de Miahuatlán y la Sierra Mixe, y desemboca en la Bahía de la Ventosa en el Golfo de Tehuantepec (Lorence y García 1989). 4) La Sierra Madre de Chiapas encuentra su extremo noroeste en la Sierra Atravesada, una cordillera que recorre el Istmo de Tehuantepec en dirección oeste-este (Tamayo 1999). El río Coatzacoalcos se origina en la porción norte de la Sierra Atravesada y desemboca en el Golfo de México. La planicie costera Ístmica-Chiapaneca, corre paralela al Océano Pacífico y la Sierra Atravesada (Lorence y García 1989, Ferrusquía-Villafranca 1993, Tamayo 1999).

Los suelos predominantes en Oaxaca son los Cambrisoles, Andosoles y Litosoles, estos últimos son el resultado de la erosión y la actividad volcánica o tectónica (Tamayo 1999). Sin embargo una gran variedad de suelos se encuentran distribuidos a lo largo de un extenso gradiente altitudinal que va desde los 0 a más de 3,000 m.

Los vientos prevalecientes, las líneas de costa y las principales cadenas montañosas, son los factores que más influyen en el clima de México (Challenger 1998). En el caso de Oaxaca, la Sierra Madre del Sur impide el paso de masas de aire provenientes del norte, lo que contribuye a que en invierno las zonas cercanas a la costa pacífica sean más cálidas que las localizadas cerca del Golfo de México. Sin embargo, los vientos prevalecientes del este, al entrar en contacto con las masas frías de las zonas montañosas del Golfo de México, se condensan y precipitan, aportando la mayor cantidad de lluvia de Oaxaca y del país (Challenger 1998). La condensación y precipitación de dichas masas de aire, permiten a la vegetación reducir su pérdida de humedad durante los meses secos del invierno. (Challenger 1998). Así mismo esa nubosidad reduce la

insolación recibida por la vegetación, lo que a su vez reduce las tasas de evapotranspiración, y por lo tanto de humedad (Tamayo 1999). Del mismo modo, el Trópico de Cáncer marca la transición entre los climas húmedos y subhúmedos de la zona ciclónica y por lo tanto la duración e intensidad de la precipitación en verano (Rzedowski 1978 en Challenger 1998).

Los climas representativos de Oaxaca siguiendo la clasificación de García (1981), basada en las modificaciones al sistema de Köppen, son los climas cálido y húmedo Af y Am, en la vertiente del Golfo de México, cálido subhúmedo (Aw) en las regiones bajas y secas del sur del Estado, principalmente en el Istmo de Tehuantepec. Los climas templados subhúmedos Cw se localiza en las zonas montañosas con alturas arriba de los 1,000 m. Y los climas cálidos secos Bs se restringen a los Valles Centrales, así como a las partes intermedias del río Mixteco, río Tehuantepec y río Papaloapan (Lorence y García 1989).

Algunos autores han dividido la flora y fauna del país según la relación del clima, la vegetación y la biogeografía en distintas zonas ecológicas (Rzedowski 1978 en Challenger 1998, Toledo y Ordóñez 1993, Challenger 1998, INEGI 2002). Con base en estas clasificaciones podemos encontrar que gran parte de los ecosistemas tienen alguna representación en Oaxaca.

En la Tabla 1 se muestra que el Estado de Oaxaca tiene principalmente cuatro tipos de vegetación; tiene el 10 % de área de los bosques templados a nivel nacional, el 8% de todas las selvas (selvas altas, medianas y bajas); el 1% de los matorrales y el 4% pastizales de lo que existe a nivel nacional.

Sin embargo Lorence y García (1989) realizaron una división de la vegetación de Oaxaca mucho más detallada y reconocen principalmente 12 tipos de vegetación: selvas altas perennifolias, bosque mesófilo de montaña, selva alta y mediana subperennifolia,

selva alta y mediana subcaducifolia, bosque de pino, bosque de encino, selva baja caducifolia, bosque de pino-encino, matorral xerófito y manglar.

Tabla 1. Superficie cubierta por los grandes biomas en México y el Estado de Oaxaca

Tipo de vegetación	Sup. Nacional (has)	Superficie Oaxaca (has)
Bosques	34,503,836.158	3,508,146.55
Selvas	34,229,443.14	2,907,629.76
Matorral	55,588,182.28	51,230.78
Pastizal	16,351,907.26	691,314.94
Otros tipos	9,829,343.02	85,566.82

La selva alta perennifolia ocupa de los 50 a 1,000 m, en las zonas cálidas, principalmente en la cuenca del Río Papaloapan, así como en la porción media del Istmo de Tehuantepec. Los suelos son profundos, lateríticos y están bien drenados. La densa vegetación está dominada por árboles siempre verdes con alturas mayores a los 30 m, la estratificación de la vegetación es clara y abundan las lianas y las epifitas.

El bosque mesófilo de montaña, se localiza entre los 1,000- 2,250 m, principalmente en la Sierra de Juárez y la Sierra Mixe, así mismo en la parte del Pacífico encontramos algunas áreas de bosque mesófilo dentro de la Sierra Madre del Sur. Los árboles que lo componen miden en promedio entre 20 y 40 m de altura, en este tipo de vegetación encontramos tanto especies caducifolias como perennes.

La selva mediana subperennifolia se localiza al norte de Oaxaca y las vertientes del Océano Pacífico. Se desarrollan en suelos karsticos, con laderas escalonadas y una topografía altamente disectada. El promedio de altura de los árboles esta entre los 25 y los 30 m de altura, y en los estratos más bajos dominan las palmas.

La selva alta y mediana subcaducifolia se caracteriza porque las especies vegetales que la componen pierden entre el 50 y el 75 % de su follaje durante la época seca. Ésta se localiza principalmente en la Planicie Costera del Pacífico y en menor proporción en el Istmo de Tehuantepec. El clima predominante es cálido subhúmedo con una estación seca bien definida de cuatro meses. Las especies arbóreas que la componen tienen un dosel abierto, el periodo máximo de floración generalmente coincide con el periodo de recambio de hojas.

La selva baja caducifolia se caracteriza por tener árboles de entre 4 y 15 m de altura, la mayoría con espinas. Pierden sus hojas durante la estación seca, la cual tiene una estacionalidad muy marcada de entre cinco y ocho meses. Se localizan principalmente entre los 0 y los 1,900 m, en áreas donde el clima es cálido y seco. Se presenta en suelos bien drenados, principalmente en el noroeste, centro y sureste de Oaxaca.

En el matorral xerófito predominan especies deciduas y suculentas, muchas de las cuales cuentan con espinas. Los matorrales predominan en las zonas secas donde la variación de temperatura entre el día y la noche es extrema. Existen dos zonas específicas donde se localizan los matorrales una al norte, en el límite de Oaxaca con Puebla aproximadamente a 1000 m y que representa el límite sur del Desierto de Tehuacan. La otra zona es a lo largo de los Valles Centrales de Oaxaca, aquí el matorral se entremezcla con algunos árboles pequeños y algunos cactus. Los suelos donde se desarrollan los matorrales se caracterizan por ser pobres en materia orgánica, así como tener altos niveles de calcio.

Dentro de las 35 especies de coníferas calculadas para el Estado de Oaxaca, el genero *Pinus* cuenta con más de 15 especies distintas. Los géneros *Pinus* y *Quercus* tienen requerimientos ecológicos similares por lo que generalmente ocupan los mismos nichos. Los bosques de pino, se presentan en las regiones montañosas húmedas, entre

los 1,500 y 3,000 m. Generalmente están por encima de las selvas altas perennes y los bosques mesófilos de montaña. Asimismo, la mayoría de los bosques de pino se desarrollan en suelos relativamente ácidos. Los bosques de abetos y oyameles están restringidos a las zonas montañosas frías en la Sierra de Juárez, Sierra de Miahuatlán y en el macizo de Zempoaltépetl. Están compuestos por varios estratos arbóreos y herbáceos. El bosque de pino-encino, pínar y encinar, ocupan una vasta extensión de la Mixteca Alta y la Sierra Madre del Sur, principalmente a un rango entre los 500 y los 2,500 m. Se presenta en climas templados subhúmedos o templados húmedos.

1.6. Planteamiento del problema

La heterogeneidad paisajística del Estado de Oaxaca, en parte producto de la conversión de los principales sistemas montañosos en su territorio, permite que localicemos, distribuidos a lo largo de gradientes altitudinales y longitudinales, la gran mayoría de los tipos de vegetación y usos de suelo. Bosques perennes y caducifolios, selvas perennes y caducifolias, matorrales, pastizales y cultivos son algunos ejemplos de coberturas vegetales que se pueden identificar en el Estado de Oaxaca. De igual manera, los patrones de precipitación se ven influenciados por las características físicas del Estado, lo que propicia diferentes patrones de precipitación los cuales a su vez condicionan el comportamiento de la vegetación.

La información biológica y ecológica hasta ahora generada en el Estado de Oaxaca es difícil de extrapolar por su naturaleza puntual, debido a que se genera en condiciones homogéneas, y en reducidas unidades espaciales ($\sim 1-10000 \text{ m}^2$) y temporales ($\sim 1-365$ días). Por lo tanto, este estudio intenta comprender los patrones espaciales y temporales de la productividad primaria neta, así como la influencia de la precipitación sobre los mismos, en un mosaico biológico tan diverso como es el Estado de Oaxaca, lo cual nos permitirá extender nuestro conocimiento acerca de cómo se desarrollan los procesos ecológicos a escalas mayores.

La percepción remota permite conocer, en primera instancia, los patrones de productividad primaria neta así como los factores que la están limitando a escalas distintas a la local. La recopilación de esta información permite hacer estimaciones acerca de la respuesta de la vegetación ante eventos extremos o ante el cambio climático global.

1.7. Objetivo General

Reconocer los patrones interanuales e intraanuales de la Producción Primaria Neta Aérea (ANPP) de 15 tipos de vegetación en el Estado de Oaxaca mediante el análisis del Índice Diferencial Normalizado de la Vegetación (NDVI).

1.8. Objetivos particulares

- 1) Caracterizar la fenología (inicio, fin y duración de la época de crecimiento) de 15 tipos de vegetación en el Estado de Oaxaca mediante el análisis del Índice Diferencial Normalizado de la Vegetación (NDVI).
- 2) Analizar la relación Precipitación-ANPP de 6 tipos de vegetación característicos en el Estado de Oaxaca mediante el análisis espectral del NDVI y la precipitación.

2. METODOLOGÍA

Se utilizó la cartografía digital de Uso de suelo y Vegetación del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática serie II, a escala 1:250,000 del Estado de Oaxaca para la delimitación de las coberturas vegetales.

Así mismo fueron utilizadas imágenes diarias Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) con una resolución de 1.1 Km x 1.1 Km en nadir, provenientes de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y recibidas en el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota del Instituto de Geografía de la UNAM (LSIGPR).

2.1. Agrupación de tipos de vegetación

El Estado de Oaxaca alberga en su territorio 72 tipos de vegetación reconocidos por INEGI, esto incluye vegetación primaria y secundaria y uso del suelo (INEGI, 2002). Debido a la complejidad de hábitats, la vegetación se reclasificó tomando en cuenta la división propuesta por Lorence y García (1989) y los grandes grupos propuestos por el INEGI (2002). Los 72 tipos de vegetación con las cuales el INEGI divide al Estado de Oaxaca fueron reclasificados en 18 tipos (Tabla 2). Los bosques de pino-encino presentan la mayor área de la vegetación primaria (1, 337,802 ha), seguidas de la selva baja caducifolia (1, 199,652 ha) y selva alta y mediana subpennifolia (1, 052,865 ha) (Tabla 2). En contraste, para los sistemas productivos, los cultivos de temporal ocupan una mayor área (1, 895,592) que los pastizales inducidos para la ganadería (691,314 ha) (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación y cobertura de la vegetación en el Estado de Oaxaca.

VEGETACIÓN	VEGETACIÓN AGRUPADA	ÁREA (ha.)	ÁREA (%)
Bosque de Encino	Bosque de encino y bosque de encino con vegetación secundaria	750,114.68	8.13
Bosque de Encino-Pino	Bosque de encino-pino y bosque de encino-pino con vegetación secundaria	291,688.99	3.16
Bosque de Pino	Bosque de pino, bosque de pino con vegetación secundaria y bosque de oyamel	554,575.58	6.01
Bosques de Pino-Encino	Bosque de encino y bosque de encino con vegetación secundaria	1,337,802.75	14.51
Bosques de Táscate	Bosque de táscate y bosque de táscate con vegetación secundaria	31,279.32	0.34
Bosques Mesófilo de Montaña	Bosque mesófilo de montaña y bosque mesófilo de montaña con vegetación secundaria	542,685.24	5.89
Chaparral	Chaparral y chaparral con vegetación secundaria	28,912.63	0.31
Áreas sin Vegetación		23,388.02	0.25
Matorral	Matorral crasicaule, matorral crasicaule con vegetación secundaria, matorral desértico rosetofilo, matorral rosetofilo con vegetación secundaria y mezquital con vegetación secundaria	22,318.15	0.24
Cuerpos de Agua		58,537.82	0.63
Selva Alta y Mediana Perenne	Selva alta y mediana perenne y selva alta y mediana perenne con vegetación secundaria	1,052,865.72	11.42
Selva Alta y Mediana Subperenne	Selva alta y mediana subperenne y selva alta y mediana subperenne con vegetación secundaria	189,226.57	2.05
Selva Baja Caducifolia	Selva baja caducifolia, selva baja caducifolia con vegetación secundaria, selva espinosa y selva espinosa con vegetación secundaria	1,199,652.93	13.01
Selva Baja Subcaducifolia	Selva baja subcaducifolia y selva baja subcaducifolia con vegetación secundaria	5,566.19	0.06
Selva Mediana	Selva mediana caducifolia, selva mediana caducifolia con vegetación secundaria, selva mediana subcaducifolia y selva mediana subcaducifolia con vegetación secundaria	460,315.35	4.99
Otras	Manglar, palmar, plantaciones, popal-Tular, vegetación de dunas costeras, vegetación de galería y vegetación halófila y gipsofila	85,566.82	0.93
Cultivos		1,895,592.68	20.56
Pastizal Inducido		691,314.94	7.50

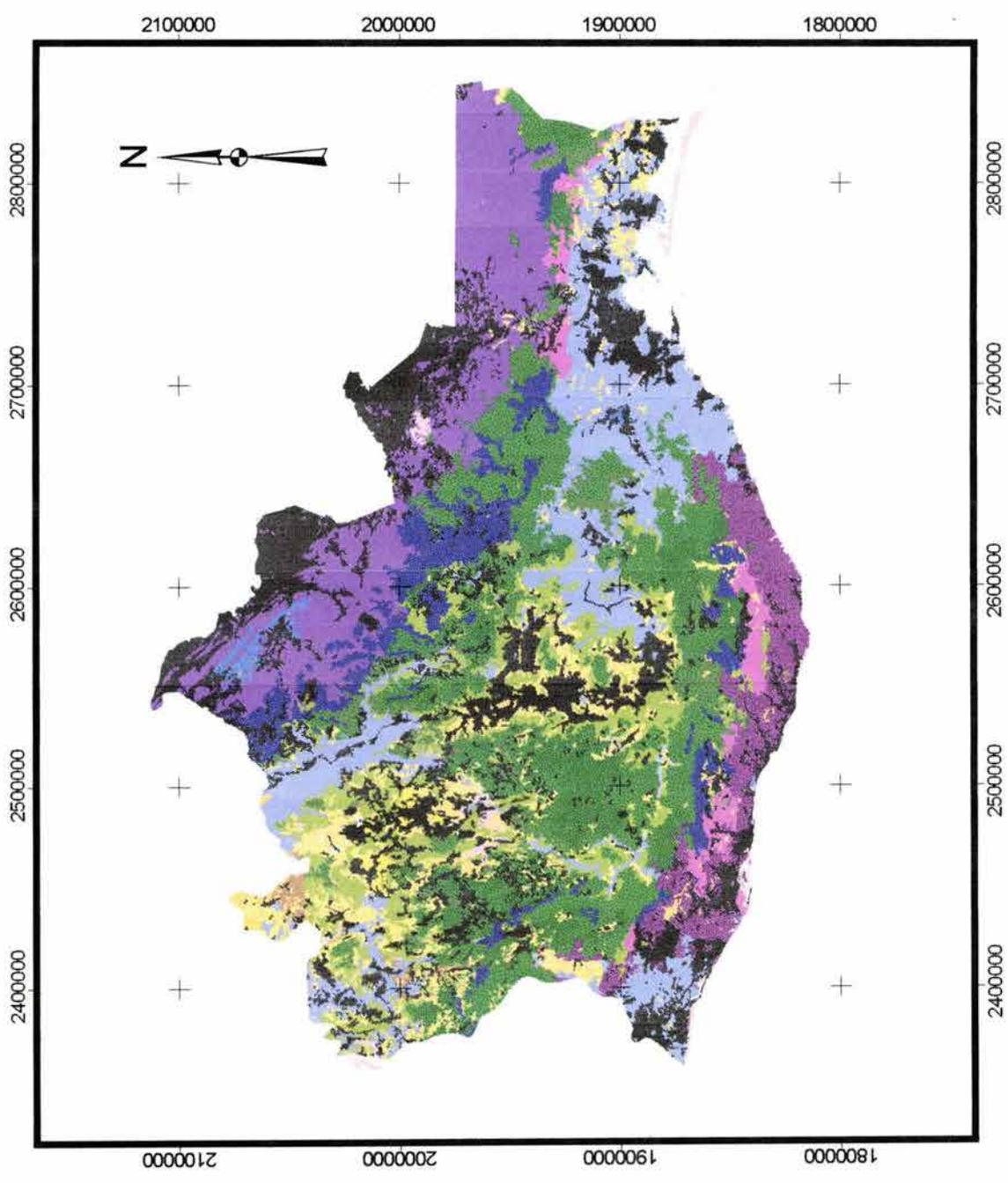
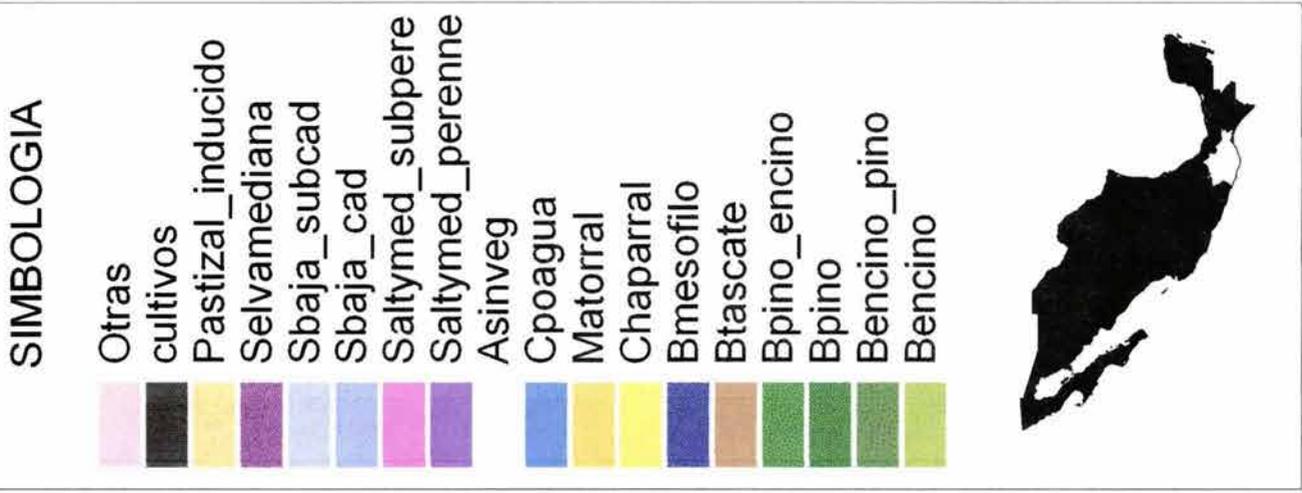


Figura 2. Mapa reclasificado de la vegetación del Estado de Oaxaca

Elaboró: Ma. Luisa Cuevas

FUENTE- INEGI-CONABIO

100



0 100 Kilometers

2.2. Procesamiento de imágenes

La utilización de imágenes NOAA-AVHRR nos permite hacer estudios multi-temporales acerca de la variación y los cambios en la biomasa, índice de área foliar, y la productividad primaria neta, así como hacer inferencias de la aridez en amplias escalas geográficas (Hoffer, 1978, Paruelo et al. 2001).

Con la finalidad de estimar la productividad primaria neta de 15 tipos de vegetación del Estado de Oaxaca, las imágenes diarias Advanced Very High Resolution (AVHRR), fueron georeferenciadas y calibradas en el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota del Instituto de Geografía, desde 1997 al año 2003. Las imágenes provienen de los sensores (NOAA 12, NOAA, 14, y NOAA 16) (Tabla 3).

Tabla 3. Relación de satélites a partir de los cuales se obtuvieron las imágenes.

AÑO	SATÉLITE
1997	NOAA-14
1998	NOAA-14
1999	NOAA-14
2000	NOAA-14
2001	NOAA-12, 14 Y 16
2002	NOAA-16
2003	NOAA-16

Las imágenes AVHRR se componen de cinco bandas espectrales; la visible (0.58-0.68 μm), infrarroja cercana (0.725-1.1 μm), infrarrojo medio (3.55-3.93 μm) y dos bandas infrarrojas térmicas (10.3-11.3 μm y 11.5-12.5 μm). A partir de las imágenes AVHRR se obtiene el índice de vegetación NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Este índice está basado en la relación que existe entre la respuesta de la vegetación en el canal visible (Banda 1) y la respuesta al infrarrojo cercano (Banda 2). El NDVI ha demostrado ser útil describiendo las características biofísicas de la vegetación debido a que ésta tiene una reflectancia menor en el canal visible debido a que es absorbida por la clorofila y otros pigmentos de la planta, mientras que en el infrarrojo cercano es mayor

debido a las características en la estructura de la hoja (Hoffer, 1978, Paruelo et al., 2001, Maxwell et al., 2002). La fórmula para obtener el NDVI es la siguiente:

$$\text{NDVI} = (\text{infrarrojo cercano} - \text{rojo}) / (\text{infrarrojo cercano} + \text{rojo})$$

Aplicando la fórmula anterior a las imágenes diarias se obtiene el valor de NDVI para cada píxel. Al ser un índice normalizado los valores quedan comprendidos entre -1 y $+1$.

El número total de imágenes analizadas para el periodo de 1997 a 2003 fue de 2008. Los NDVI fueron procesados en ENVI (RSI), programa que permite observar las imágenes y realizar compuestos de las mismas. Para eliminar el ruido atmosférico - interferencia atmosférica de las nubes, el vapor de agua, los aerosoles, así como el ángulo solar y posibles errores de las imágenes (Ruimy et al, 1994; Manzo-Delgado, 2003)- y obtener imágenes más claras, se formaron compuestos, los cuales son la agrupación de una serie de imágenes que permiten obtener el valor máximo del NDVI para cada píxel a lo largo una serie de imágenes (Holben, 1986; Jobbagy et al. 2002; Manzo-Delgado, 2003). En este caso se realizaron compuestos de cada 10 días, lo que permitió tener imágenes más claras. El promedio de imágenes utilizadas en cada compuesto fue de 7 y 8 esto debido a la calidad o ausencia de imágenes para ciertas fechas.

En total se elaboraron 228 compuestos para los siete años comprendidos en esta investigación (Tabla 4). Para calcular el valor de los compuestos faltantes se promediaron el dato anterior y el dato siguiente al compuesto faltante. Para el año de 2001 los valores de NDVI no tienen la misma calidad que los otros años debido a que las imágenes no están completas, presentan demasiada nubosidad así como errores en la imagen conocida como "sal y pimienta". Incluso, faltan cinco compuestos seguidos los cuales no fueron estimados, lo que implica que es el año en el que faltan más compuestos, esto

debido a los cambios en los sensores del satélite NOAA-14 a NOAA-15 y más tarde a NOAA-16, lo que obstaculizó la obtención de las imágenes.

Tabla 4. Relación de compuestos a lo largo de los siete años estudiados.

AÑO	No. COMPUESTOS	COMPUESTO FALTANTE
1997	35	9706_3
1998	33	9807_3, 9808_1 y 9809_2
1999	36	-
2000	36	-
2001	30	0102_1,0109_1,0109_2,0109_3,0110_1,0110_2
2002	32	0209_3,0210_2,0211_1 Y 0211_3
2003	26	0304_2

Se realizó un corte del Estado de Oaxaca sobre cada imagen de la República Mexicana a la misma resolución. Los límites corresponden a INEGI, límites estatales 1:250,000 (INEGI 2000).

2.3. Análisis de imágenes

Con el propósito de determinar valores de NDVI para cada tipo de vegetación se identificaron rodales de vegetación puros de una resolución de 1.1 Km², con la finalidad de evitar valores erróneos o intermedios entre los límites de los diferentes rodales de vegetación. Para este procedimiento se rasterizó el mapa de uso de suelo y vegetación reagrupado en 18 clases a una resolución de 1.1 Km². Posteriormente se analizó pixel a pixel, la homogeneidad del vecindario.

Se obtuvieron los valores máximos, mínimos, la media y desviación estándar de los NDVI por tipo de vegetación. Para esto se sobrepuso la imagen GRID con los pixels puros a cada uno de los 228 compuestos, esta información se procesó en ENVI para los 18 tipos de vegetación.

2.4. Análisis estadístico

Los valores de NDVI, en un rango de 0 a 255, fueron transformados nuevamente a un rango estándar de entre -1 a +1, para poder obtener los valores normalizados que permiten inferir la productividad primaria neta de la vegetación, para lo cual se aplicó la siguiente fórmula:

$$NDVI = (n/127) - 1$$

Donde n es igual al valor de NDVI obtenido en ENVI.

Los valores promedio de aquellos compuestos faltantes en cada año se obtuvieron a partir de la media del compuesto anterior y el compuesto siguiente. El valor acumulado de cada tipo de vegetación en cada año se obtuvo de la suma de los valores promedio.

Conforme a la metodología propuesta por White et al. (2002) los valores promedio decenales de cada año y de cada tipo de vegetación fueron graficados; el inicio de la época de crecimiento se definió a partir de la decena donde el incremento de los valores fuera constante, por otro lado el fin de la época de crecimiento se marcó en aquella decena donde se percibe un descenso marcado de los valores.

2.5. Obtención y análisis de datos climáticos

Se utilizaron los datos de precipitación diaria desde enero de 1997 a diciembre de 1999, y de mayo del 2001 a diciembre del 2003 de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NCEP-NOAA). Los datos de enero de 1997 a abril de 1999 tienen una resolución de 1° x 1°, mientras que los datos a partir de mayo del 2001 tienen una resolución de 0.25° x 0.25°. Sobreponiendo la malla de 1° x 1° al mapa de tipos de vegetación, se seleccionaron aquellas gradillas donde se encuentra el polígono más representativo de cada uno de los 18 tipos de vegetación. Lo mismo se hizo con la malla de 0.25° x 0.25°.

Los datos de mayo de 1999 a abril del 2000 se obtuvieron de la misma fuente, sin embargo se obtuvieron mediante la interpolación de puntos en una malla a resolución 2.5° X 2.5°. Para determinar las coordenadas que se interpolaron, se identificaron los rodales más grandes de los distintos tipos de vegetación y las estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional que se encontraban dentro de ellos. Tomando a las estaciones como puntos de referencia se obtuvieron las coordenadas a utilizar.

Los datos diarios de precipitación seleccionados fueron sumados cada 10 días para poder ser analizados con los valores decenales de los NDVI. Se realizó un análisis espectral de la precipitación y los valores de NDVI en seis tipos de vegetación: cultivos, matorrales, pastizales, bosques de pino-encino, selvas bajas caducifolias y selvas altas y medianas perennes utilizando el paquete STATISTICA. El objetivo fue reconocer el tiempo de respuesta de la vegetación con respecto a eventos de precipitación.

A pesar de que la relación entre la vegetación y la lluvia es estrecha y directa, ésta relación no siempre puede ser apreciada mediante regresiones estadísticas simples debido a que existe un retraso entre los eventos de lluvia y la respuesta de la vegetación. La vegetación necesita una cantidad específica de lluvia y humedad acumulada para poder comenzar su periodo de crecimiento y regeneración por lo que el tiempo de respuesta varía según el tipo de vegetación y la cantidad de precipitación requerida. El análisis espectral resulta una herramienta muy útil para determinar el tiempo y rapidez con que la vegetación responde a los procesos pluviales debido a que este análisis estadístico busca la relación entre procesos que ocurren a velocidades y tiempos distintos. Tomando en cuenta que el NDVI mide la productividad de la vegetación y que ésta depende en gran parte de la precipitación, fue posible realizar para los seis tipos de vegetación un análisis espectral con los valores de NDVI reportados. Se seleccionaron los seis tipos de vegetación que mejor representan las características funcionales y estructurales de las plantas.

3. RESULTADOS

3.1. Variabilidad interanual de la productividad primaria del Estado de Oaxaca

3.1.1. Valores anuales promedio del NDVI

Los valores del Índice Diferencial Normalizado de Vegetación (NDVI) representan una medida de la productividad primaria neta (Sala et al. 2001). De manera general, los valores promedio anuales del NDVI en 1997, 1998 y 2002 fueron mayores con respecto a 2000 y 2001 en los quince tipos de vegetación (Tabla 5). Asimismo, la variabilidad interanual de los valores promedio del NDVI se reflejó entre los diferentes tipos de vegetación (Figura 3).

El valor promedio del NDVI en las selvas altas y medianas perennes fue mayor en 1997 (0.4708 ± 0.02), 2002 (0.4851 ± 0.01) y 2003 (0.4711 ± 0.02); en relación a 2000 (0.3190 ± 0.02) y 2001 (0.2776 ± 0.03) (Tabla 5). De manera similar las selvas medianas registraron valores mayores en 1997, 2002 y 2003 (0.4367 ± 0.02 ; 0.4112 ± 0.03 y 0.4154 ± 0.03 , respectivamente) en comparación con los valores registrados en el 2000 y 2001 (0.2937 ± 0.02 y 0.2470 ± 0.03 , respectivamente) (Tabla 5).

Independientemente de los valores reportados para cada año el valor del NDVI promedio a lo largo de los siete años estudiados fue mayor en las selvas altas y medianas perennes que en los matorrales y los pastizales inducidos (Figura 4). Por ejemplo en 1997, las selvas altas y medianas perennes tuvieron mayor valor promedio de NDVI (0.4708 ± 0.02) en relación a los matorrales (0.2466 ± 0.01) y los pastizales inducidos (0.2934 ± 0.01) (Tabla 5). De manera similar, en el 2000 el valor del NDVI promedio fue mayor en las selvas altas y medianas perennes (0.3190 ± 0.02) en relación a los matorrales (0.2079 ± 0.02) y los pastizales inducidos (0.2073 ± 0.01) (Tabla 5).

Tabla 5. Media anual de NDVI +- 1e.e de 15 tipos de vegetación para siete años en el Estado de Oaxaca.

Vegetación	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Bosque de Encino	0.3641 (0.01)	0.3523 (0.01)	0.3322 (0.01)	0.2621 (0.01)	0.2109 (0.03)	0.3526 (0.01)	0.3432 (0.02)
Bosque de Encino pino	0.4002 (0.01)	0.3798 (0.01)	0.3693 (0.01)	0.2985 (0.01)	0.02523 (0.03)	0.3958 (0.01)	0.3926 (0.02)
Bosque de Pino	0.3826 (0.02)	0.3690 (0.02)	0.3335 (0.02)	0.2642 (0.02)	0.2381 (0.03)	0.3875 (0.02)	0.3871 (0.02)
Bosque de Pino encino	0.3966 (0.01)	0.3786 (0.01)	0.3492 (0.02)	0.2735 (0.02)	0.2410 (0.03)	0.4025 (0.01)	0.3976 (0.02)
Bosque de I ascate	0.3001 (0.01)	0.3116 (0.01)	0.3129 (0.01)	0.2391 (0.01)	0.1943 (0.02)	0.2828 (0.02)	0.3008 (0.02)
Bosque Mesotilo	0.3881 (0.02)	0.3803 (0.02)	0.3534 (0.02)	0.2622 (0.02)	0.2386 (0.03)	0.4090 (0.02)	0.4124 (0.03)
Chaparral	0.3219 (0.01)	0.3060 (0.01)	0.3284 (0.01)	0.2626 (0.01)	0.2137 (0.02)	0.3042 (0.01)	0.2985 (0.02)
Matorral	0.2466 (0.01)	0.2595 (0.02)	0.2714 (0.02)	0.2079 (0.02)	0.1420 (0.02)	0.2266 (0.02)	0.2345 (0.02)
S. altymed Perenne	0.4708 (0.02)	0.4188 (0.01)	0.4404 (0.02)	0.3190 (0.02)	0.2776 (0.02)	0.4851 (0.01)	0.4711 (0.02)
S. altymed Subperenne	0.4372 (0.02)	0.3928 (0.02)	0.3724 (0.02)	0.3098 (0.02)	0.2817 (0.03)	0.4236 (0.02)	0.4315 (0.02)
S. baja Caducifolia	0.3664 (0.02)	0.3691 (0.02)	0.3511 (0.02)	0.2665 (0.02)	0.2006 (0.03)	0.3469 (0.02)	0.3402 (0.03)
S. baja sub-Caducifolia	0.3666 (0.02)	0.3407 (0.02)	0.2963 (0.02)	0.1995 (0.02)	0.1407 (0.03)	0.3387 (0.02)	0.3440 (0.03)
Selva Mediana	0.4367 (0.02)	0.4094 (0.02)	0.3611 (0.02)	0.2937 (0.02)	0.2470 (0.03)	0.4112 (0.03)	0.4154 (0.03)
Cultivos	0.3752 (0.01)	0.3591 (0.01)	0.3462 (0.01)	0.2892 (0.01)	0.2413 (0.03)	0.3594 (0.02)	0.3627 (0.02)
Pastizal inducido	0.2934 (0.01)	0.2854 (0.01)	0.2726 (0.01)	0.2073 (0.01)	0.1660 (0.02)	0.2833 (0.01)	0.2837 (0.02)

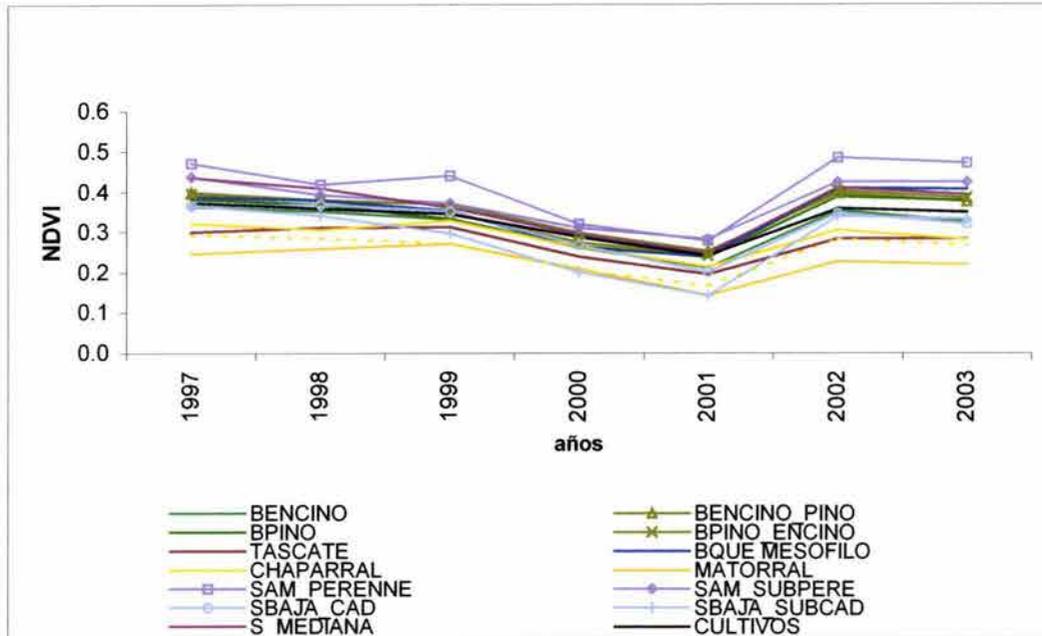


Figura 3. variabilidad interanual de los valores promedio del NDVI en 15 tipos de vegetación a lo largo de siete años. Bosque de encino=BENCINO, bosque de encino y pinos=BENCINO_PINO, bosques de pino=BPINO, bosques de pino y encino=BPINO_ENCINO, bosque de táscate=TASCATE, bosque mesófilo de montaña=BQUE MESOFILO, selva alta y mediana perenne=SAM_PERENNE, selva alta y mediana subperenne=SAM_SUBPERE, selva baja caducifolia=SBAJA_CAD, selva baja subcaducifolia=SBAJA_SUBCAD, selva mediana=S_MEDIANA.

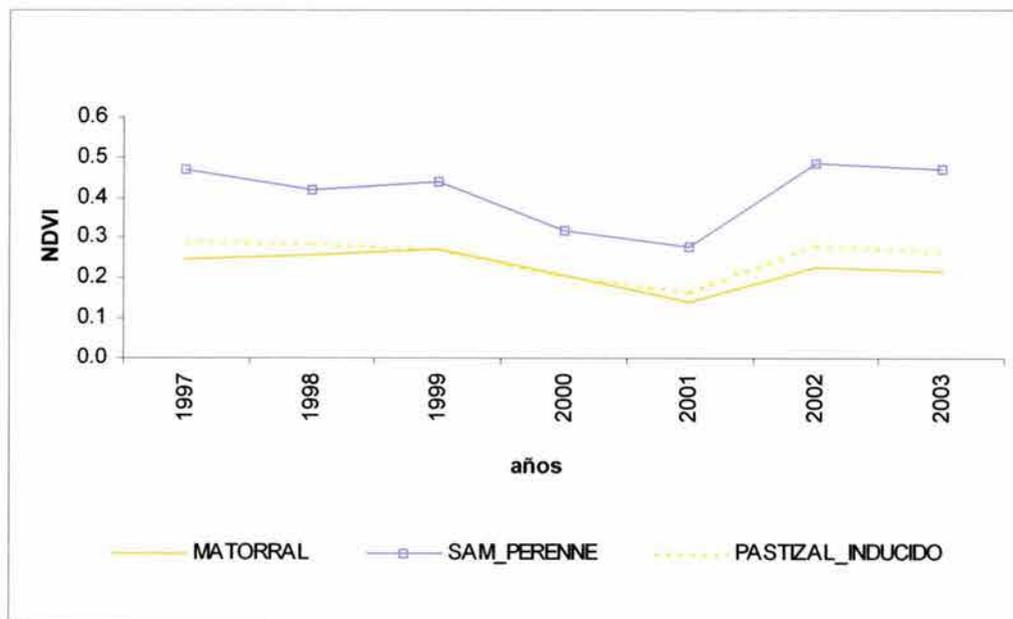


Figura 4. Variabilidad interanual de los valores promedio del NDVI en siete años para los tres tipos de vegetación más contrastantes. Selva alta y mediana perenne=SAM_PERENNE.

3.1.2. Valores anuales máximos del NDVI

Los valores máximos anuales, permiten hacer una estimación de la máxima productividad primaria neta de los diferentes tipos de vegetación. De manera general, los valores máximos anuales fueron mayores en 1999, 2001, 2002 y 2003 con respecto a 1997, 1998 y 2000 (Tabla 6). Entre los distintos tipos de vegetación también se puede apreciar la variabilidad interanual de los valores máximos (Figura 5).

Sin embargo, existen algunas diferencias dentro de las mismas selvas que valen la pena resaltar. No obstante a nivel general los valores promedio anuales del NDVI en el 2000 fueron menores, es en este año donde las selvas altas y medianas perennes, las altas y medianas subperennes y las bajas caducifolias presentan los máximos valores anuales del NDVI (0.8819 ± 0.01 ; 0.8425 ± 0.02 y 0.8189 ± 0.02 , respectivamente) (Tabla 6).

Al igual que las selvas, el chaparral y los matorrales presentan ciertas particularidades con respecto a la variabilidad interanual de los valores máximos. El chaparral presenta valores máximos de NDVI mayores en 1997, 1999, 2000 y 2003 (0.5984 ± 0.04 ; 0.5984 ± 0.01 ; 0.6693 ± 0.01 y 0.6063 ± 0.05 , respectivamente) con respecto a 1998, 2001 y 2002 (0.5669 ± 0.07 ; 0.5827 ± 0.09 y 0.5591 ± 0.08 , respectivamente). Sin embargo, a nivel general los valores promedio anuales del NDVI en el 2000 fueron menores, es en este año el chaparral presenta los máximos valores anuales del NDVI (Tabla 6). En el caso de los matorrales los valores máximos son mayores en 1998 (0.5354 ± 0.06), 2000 (0.5354 ± 0.02), 2001(0.8661 ± 0.08) y 2003 (0.5354 ± 0.05) a los encontrados en 1997 (0.4724 ± 0.04), 1999 (0.5197 ± 0.02) y 2002 (0.5276 ± 0.07). Sin embargo, con respecto a los valores promedio del NDVI de los matorrales en 1998, 1999, 2000 y 2002, estos resultados no son similares (Figura 6).

Tabla 6. Valores máximos de NDVI +- 1e.e de 15 tipos de vegetación para siete años en el Estado de Oaxaca.

Vegetación	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Bosque de Encino	0.7165 (0.05)	0.6850 (0.08)	0.7559 (0.01)	0.7244 (0.01)	0.8740 (0.10)	0.7323 (0.09)	0.7165 (0.05)
Bosque de Encino pino	0.7323 (0.05)	0.7087 (0.08)	0.9134 (0.01)	0.6772 (0.01)	0.7008 (0.10)	0.7480 (0.09)	0.7559 (0.05)
Bosque de Pino	0.7087 (0.05)	0.6693 (0.08)	0.8504 (0.01)	0.6299 (0.01)	0.7008 (0.10)	0.7087 (0.09)	0.7165 (0.05)
Bosque de Pino encino	0.7165 (0.05)	0.7165 (0.08)	1.0000 (0.01)	0.9055 (0.01)	0.7480 (0.10)	0.9843 (0.09)	0.7323 (0.05)
Bosque de Iáscate	0.5591 (0.04)	0.5669 (0.07)	0.5512 (0.02)	0.4803 (0.01)	0.5984 (0.09)	0.5748 (0.08)	0.5906 (0.05)
Bosque Mesotilo	0.7087 (0.05)	0.7087 (0.08)	0.9134 (0.01)	0.6535 (0.01)	0.7165 (0.10)	0.7244 (0.09)	0.7244 (0.05)
Chaparral	0.5984 (0.04)	0.5669 (0.07)	0.5984 (0.01)	0.6693 (0.01)	0.5827 (0.09)	0.5591 (0.08)	0.6063 (0.05)
Matorral	0.4724 (0.04)	0.5354 (0.06)	0.5197 (0.02)	0.5354 (0.02)	0.8661 (0.08)	0.5276 (0.07)	0.5354 (0.05)
S. altymed Perenne	0.8346 (0.05)	0.6850 (0.08)	0.7638 (0.01)	0.8819 (0.01)	0.8740 (0.10)	0.7559 (0.09)	0.9370 (0.06)
S. altymed Subperenne	0.7323 (0.05)	0.7165 (0.08)	0.8976 (0.01)	0.8425 (0.02)	0.7087 (0.10)	0.7402 (0.09)	0.7480 (0.06)
S. baja Caducifolia	0.7323 (0.05)	0.7323 (0.08)	0.9370 (0.02)	0.8189 (0.02)	0.8031 (0.10)	0.8976 (0.09)	0.7480 (0.05)
S. baja sub-Caducifolia	0.5827 (0.04)	0.5276 (0.07)	0.5591 (0.02)	0.4724 (0.02)	0.5118 (0.08)	0.5748 (0.07)	0.6614 (0.05)
Selva Mediana	0.8031 (0.05)	0.7165 (0.08)	0.8425 (0.02)	0.6693 (0.01)	1.0000 (0.10)	0.8031 (0.09)	0.7323 (0.05)
Cultivos	0.8425 (0.05)	0.7087 (0.08)	0.8189 (0.01)	0.9055 (0.01)	0.9685 (0.10)	0.7087 (0.09)	0.7087 (0.05)
Pastizal inducido	0.7244 (0.05)	0.6772 (0.07)	0.8110 (0.01)	0.8425 (0.02)	0.7638 (0.10)	0.7087 (0.09)	0.7165 (0.06)

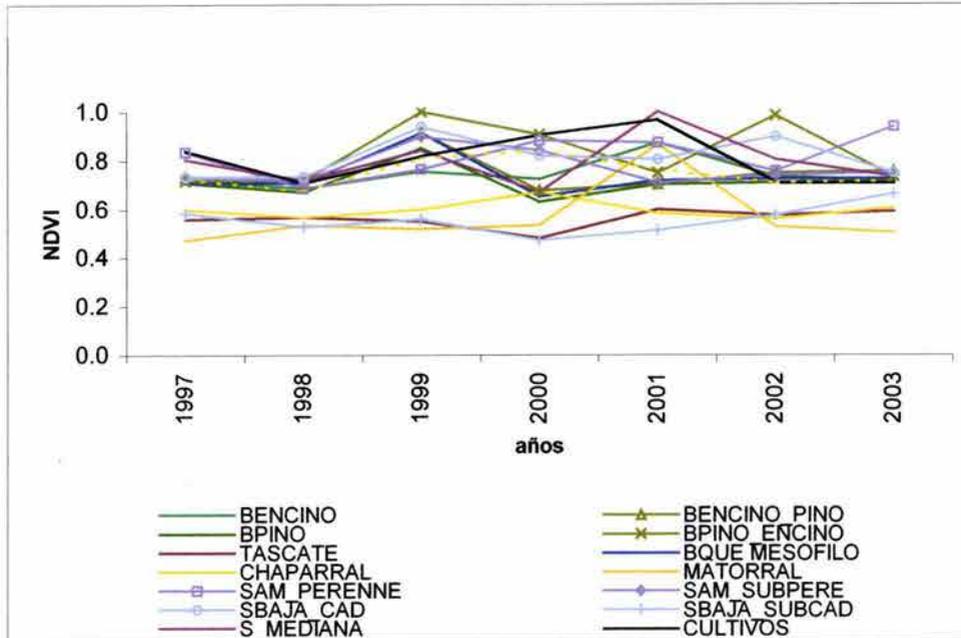


Figura 5. Variabilidad interanual de los valores máximos de NDVI en 15 tipos de vegetación a lo largo de siete años. Bosque de encino=BENCINO, bosque de encino y pinos=BENCINO_PINO, bosques de pino=BPINO, bosques de pino y encino=BPINO_ENCINO, bosque de táscate=TASCATE, bosque mesófilo de montaña=BQUE MESOFILO, selva alta y mediana perenne=SAM_PERENNE, selva alta y mediana subperenne=SAM_SUBPERE, selva baja caducifolia= SBAJA_CAD, selva baja subcaducifolia=SBAJA_SUBCAD, selva mediana= S_MEDIANA.

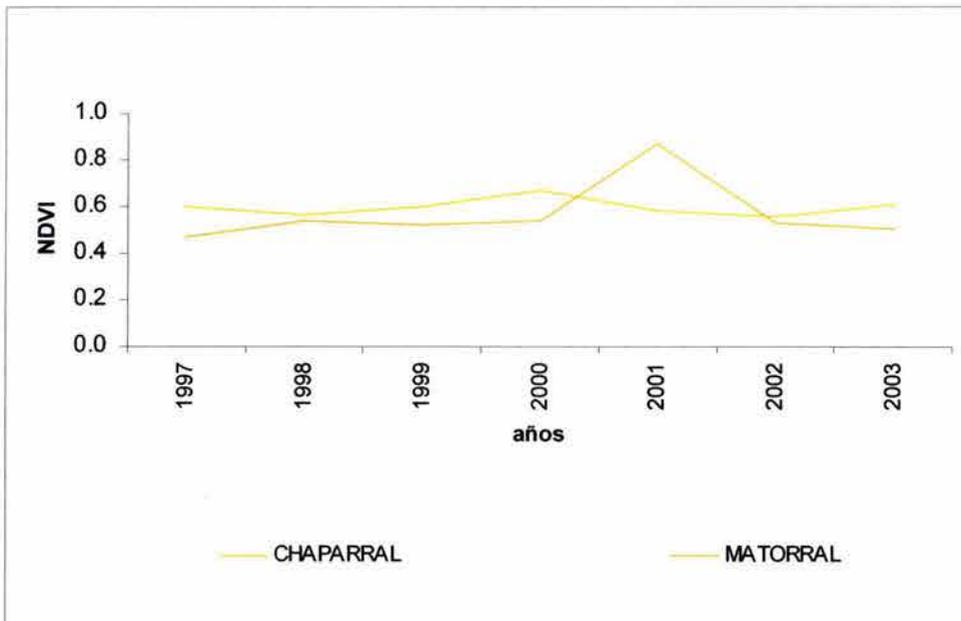


Figura 6. Variabilidad interanual de los valores máximos de NDVI en el chaparral y los matorrales a lo largo de siete años.

Independientemente de los años, los valores máximos fueron mayores en los bosques de pino encino y las selvas medianas con relación a los matorrales y las selvas bajas subcaducifolias (Tabla 6). En 1999, los bosque de pino-encino obtuvieron un valor máximo mayor (1.0000 ± 0.01) con respecto al obtenido por las selvas bajas subcaducifolias (0.5591 ± 0.02). Incluso en el año 2000 la diferencia entre los valores máximos registrados en los bosques de pino-encino (0.9055 ± 0.01) y los de las selvas bajas subcaducifolias (0.4724 ± 0.02) fue muy marcada (Tabla 6).

3.1.3. Valores anuales mínimos del NDVI

El valor mínimo del NDVI es un indicador del rango mínimo en el cual se distribuyen los datos de los distintos tipos de vegetación, lo cual permite identificar las oscilaciones entre las épocas de mayor y las de menor productividad primaria neta. Los valores mínimos anuales de NDVI no presentaron un patrón general definido.

Aunque es en el 2001 donde el mayor número de valores mínimos se concentran, esto puede deberse al número de imágenes y compuestos utilizados. No obstante, se observó que en las selvas bajas subcaducifolias los valores mínimos se registraron en el 2000 (-0.394 ± 0.02) y el 2001 (-0.0709 ± 0.03) mientras que en 1997, 1998, 1999, 2002 y 2003 (0.0630 ± 0.02 ; 0.0866 ± 0.07 ; 0.0394 ± 0.02 ; 0.0394 ± 0.02 y 0.0866 ± 0.03 , respectivamente) los valores fueron bajos pero positivos (Tabla 7).

A pesar de no haber un patrón claro a nivel general, la variabilidad interanual de los valores mínimos sí reflejó entre los diferentes tipos de vegetación algunas relaciones que vale la pena destacar. El valor mínimo de las selvas altas y medianas perennes se presenta en marzo de 1998 (-0.4331 ± 0.05), sin embargo es en ese mismo año donde las selvas altas y medianas subperennes, las bajas caducifolias y las bajas subcaducifolias presentan un valor mínimo mayor (0.0157 ± 0.06 ; 0.00 ± 0.05 ; 0.0866 ± 0.07 ,

respectivamente). De hecho son los mayores valores mínimos en la secuencia de siete años (Tabla 7).

Para los bosques la variabilidad interanual de los valores mínimos anuales está más clara ya que en los años 2000, 2001 y 2002 encontramos a los valores mínimos más bajos. Por ejemplo los bosques de encino-pino registraron valores mínimos en el 2001 y el 2002 (-0.0945 ± 0.02 y -0.0551 ± 0.02 , respectivamente) menores que en 1997 (0.0157 ± 0.02) y 1998 (0.0157 ± 0.06). Lo mismo sucede con los bosques de táscate que en 2000 y 2001 obtuvieron valores mínimos menores (-0.0472 ± 0.01 y -0.0551 ± 0.02 , respectivamente) en relación a 1998, 1999 y 2003 (0.0787 ± 0.06 ; 0.0709 ± 0.01 y 0.00 ± 0.02 , respectivamente) (Tabla 7).

El chaparral presenta valores mínimos en el 2000, 2001 y 2002 (-0.0394 ± 0.01 ; -0.0709 ± 0.02 ; -0.0079 ± 0.01 , respectivamente), menores en comparación con los obtenidos en 1997, 1998 y 1999 (0.0315 ± 0.01 ; 0.0472 ± 0.06 y 0.0157 ± 0.01 , respectivamente), lo que estaría correspondiendo con el patrón general encontrado.

Sin embargo los matorrales no se ajustan a este patrón ya que el menor valor mínimo se registró en 1998 (-0.5512 ± 0.06), mientras que en 1999 se registró el mayor valor mínimo positivo (0.0630 ± 0.01). Algo similar registraron los cultivos, los cuales también obtuvieron un valor mínimo menor en 1998 (-0.5197 ± 0.05), mientras que en 1997 el valor registrado fue más cercano a cero (-0.0079 ± 0.01) (Tabla 7).

El menor valor mínimo de entre todos los tipos de vegetación se registró en los matorrales, mientras que las selvas bajas caducifolias obtuvieron el valor mínimo más cercano a +1.00 (Tabla 7). En 1998, los matorrales obtuvieron el menor valor mínimo (-0.5512 ± 0.06), mientras que el mayor valor dentro de los mínimos se registro en el mismo año, en las selvas bajas subcaducifolias (0.0866 ± 0.07) (Tabla 7).

Tabla 7. Valores mínimos de NDVI $\pm 1e.e$ de 15 tipos de vegetación para siete años en el Estado de Oaxaca.

Vegetación	1997	e.e	1998	e.e	1999	e.e	2000	e.e	2001	e.e	2002	e.e	2003	e.e
Bosque de Encino	0.0079	(0.01)	0.0236	(0.06)	-0.0236	(0.01)	-0.0787	(0.01)	-0.0945	(0.02)	-0.0551	(0.01)	-0.0551	(0.01)
Bosque de Encino pino	0.0157	(0.02)	0.0157	(0.06)	0.0000	(0.02)	-0.0472	(0.01)	-0.0945	(0.02)	-0.0551	(0.02)	-0.0472	(0.02)
Bosque de Pino	0.0079	(0.01)	-0.4331	(0.06)	-0.0079	(0.01)	-0.0709	(0.01)	-0.1024	(0.02)	-0.0866	(0.02)	-0.0551	(0.02)
Bosque de Pino encino	-0.0079	(0.01)	0.0000	(0.06)	-0.0315	(0.01)	-0.0709	(0.01)	-0.1260	(0.01)	-0.0787	(0.02)	-0.0787	(0.02)
Bosque de Táscate	0.0315	(0.01)	0.0787	(0.06)	0.0709	(0.01)	-0.0472	(0.01)	-0.0551	(0.02)	-0.0315	(0.02)	0.0000	(0.02)
Bosque Mesófilo	-0.0157	(0.01)	0.0079	(0.06)	-0.0394	(0.01)	-0.0866	(0.01)	-0.1024	(0.02)	-0.0630	(0.02)	-0.0709	(0.03)
Chaparral	0.0315	(0.01)	0.0472	(0.06)	0.0157	(0.01)	-0.0394	(0.01)	-0.0709	(0.02)	-0.0079	(0.01)	-0.0236	(0.01)
Matorral	0.0472	(0.01)	-0.5512	(0.06)	0.0630	(0.01)	-0.0157	(0.01)	-0.0472	(0.02)	-0.0236	(0.01)	0.0551	(0.02)
S. altymed Perenne	-0.0315	(0.01)	-0.4331	(0.05)	-0.0315	(0.01)	-0.0866	(0.01)	-0.1024	(0.01)	-0.0866	(0.02)	-0.0866	(0.02)
S. altymed Subperenne	0.0079	(0.02)	0.0157	(0.06)	-0.0157	(0.02)	-0.0551	(0.02)	-0.0866	(0.02)	-0.0472	(0.02)	-0.0630	(0.02)
S. baja Caducifolia	-0.0315	(0.01)	0.0000	(0.05)	-0.0394	(0.01)	-0.1339	(0.01)	-0.1339	(0.02)	-0.0551	(0.01)	-0.0709	(0.02)
S. baja sub-Caducifolia	0.0630	(0.02)	0.0866	(0.07)	0.0394	(0.02)	-0.0394	(0.02)	-0.0709	(0.03)	0.0394	(0.02)	0.0866	(0.03)
Selva Mediana	0.0000	(0.02)	-0.0315	(0.06)	-0.0079	(0.02)	-0.0709	(0.01)	-0.1260	(0.02)	-0.1024	(0.02)	-0.0394	(0.02)
Cultivos	-0.0079	(0.01)	-0.5197	(0.05)	-0.0236	(0.01)	-0.0787	(0.01)	-0.0945	(0.01)	-0.0630	(0.01)	-0.0866	(0.01)
Pastizal Inducido	0.0236	(0.01)	0.0157	(0.05)	0.0079	(0.01)	-0.0709	(0.01)	-0.0866	(0.01)	-0.0394	(0.01)	-0.0472	(0.01)

3.2. Variabilidad interanual de la productividad primaria neta acumulada

Los valores acumulados anuales del NDVI fueron mayores en 1997, 1999, 2002 y 2003 con respecto a 2000 y 2001 (Tabla 8). La variabilidad interanual de los valores acumulados del NDVI también se reflejó entre los diferentes tipos de vegetación (Figura 7).

Dentro de los bosques templados, los bosques de pino-encino obtuvieron mayores valores acumulados, los cuales se registraron en 1997, 1999, 2002 y 2003 (14.28 ± 0.64 ; 12.57 ± 0.57 ; 14.49 ± 0.66 y 14.31 ± 0.76 , respectivamente) en relación al 2000 y 2001 (9.85 ± 0.46 y 7.47 ± 0.30 , respectivamente).

Independientemente de los años el valor del NDVI acumulado fue mayor en las selvas altas y medianas perennes que los matorrales y las selvas bajas subcaducifolias (Tabla 8). Por ejemplo, las selvas altas y medianas perennes tuvieron el mayor valor del NDVI acumulado en 2002 (17.46 ± 0.82) en relación a los matorrales (8.16 ± 0.439) y las selvas bajas subcaducifolias (12.19 ± 0.63) (Tabla 8). En contraste, en el 2001 el mayor valor acumulado del NDVI fue para las selvas altas y medianas perennes (8.60 ± 0.37) en relación a los matorrales (4.40 ± 0.23) y las selvas bajas subcaducifolias (4.36 ± 0.18) (Tabla 8).

Tabla 8. Valores acumulados de NDVI +- 1e.e de 15 tipos de vegetación para siete años en el Estado de Oaxaca

Vegetación	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Bosque de Encino	13.1069 (0.61)	12.6823 (0.59)	11.9578 (0.57)	9.4352 (0.47)	6.5394 (0.29)	12.6938 (0.61)	12.3551 (0.68)
Bosque de Encino pino	14.4056 (0.66)	13.6737 (0.63)	13.2933 (0.62)	10.7442 (0.51)	7.8218 (0.33)	14.2484 (0.66)	14.1351 (0.76)
Bosque de Pino	13.7721 (0.60)	13.2823 (0.59)	12.0045 (0.53)	9.5115 (0.42)	7.3801 (0.29)	13.9488 (0.62)	13.9341 (0.72)
Bosque de Pino encino	14.2769 (0.64)	13.6312 (0.62)	12.5704 (0.57)	9.8458 (0.46)	7.4706 (0.30)	14.4888 (0.66)	14.3148 (0.76)
Bosque de Táscate	10.7959 (0.51)	11.2179 (0.54)	11.2642 (0.56)	8.6086 (0.44)	6.0247 (0.29)	10.1800 (0.49)	10.8279 (0.61)
Bosque Mesófilo	13.9766 (0.61)	13.6907 (0.62)	12.7226 (0.57)	9.4389 (0.43)	7.3974 (0.29)	14.7235 (0.65)	14.8457 (0.77)
Chaparral	11.5878 (0.54)	11.0171 (0.51)	11.8212 (0.57)	9.4541 (0.46)	6.6261 (0.30)	10.9497 (0.51)	10.7074 (0.58)
Matorral	8.8793 (0.44)	9.3425 (0.46)	9.7708 (0.50)	7.4846 (0.41)	4.4034 (0.23)	8.1561 (0.43)	8.4432 (0.52)
S. altymed Perenne	16.9477 (0.79)	15.0755 (0.72)	15.8526 (0.76)	11.4849 (0.57)	8.6067 (0.37)	17.4651 (0.82)	16.9598 (0.94)
S. altymed Subperenne	15.7404 (0.71)	14.1405 (0.63)	13.4066 (0.61)	11.1531 (0.52)	8.7317 (0.36)	15.2512 (0.71)	15.5324 (0.83)
S. baja Caducifolia	13.1919 (0.62)	13.2866 (0.65)	12.6380 (0.64)	9.5945 (0.51)	6.2192 (0.30)	12.4893 (0.64)	12.2489 (0.73)
S. baja sub-Caducifolia	13.1982 (0.65)	12.2638 (0.60)	10.6667 (0.52)	7.1837 (0.36)	4.3622 (0.18)	12.1929 (0.63)	12.3832 (0.74)
Selva Mediana	15.7206 (0.74)	14.7373 (0.69)	12.9982 (0.63)	10.5740 (0.52)	7.6575 (0.34)	14.8029 (0.74)	14.9534 (0.86)
Cultivos	13.5054 (0.63)	12.9285 (0.62)	12.4625 (0.60)	10.4102 (0.52)	7.4794 (0.33)	12.9396 (0.63)	13.0583 (0.74)
Pastizal Inducido	10.5630 (0.50)	10.2732 (0.49)	9.8139 (0.49)	7.4622 (0.38)	5.1450 (0.23)	10.1990 (0.50)	10.2141 (0.58)

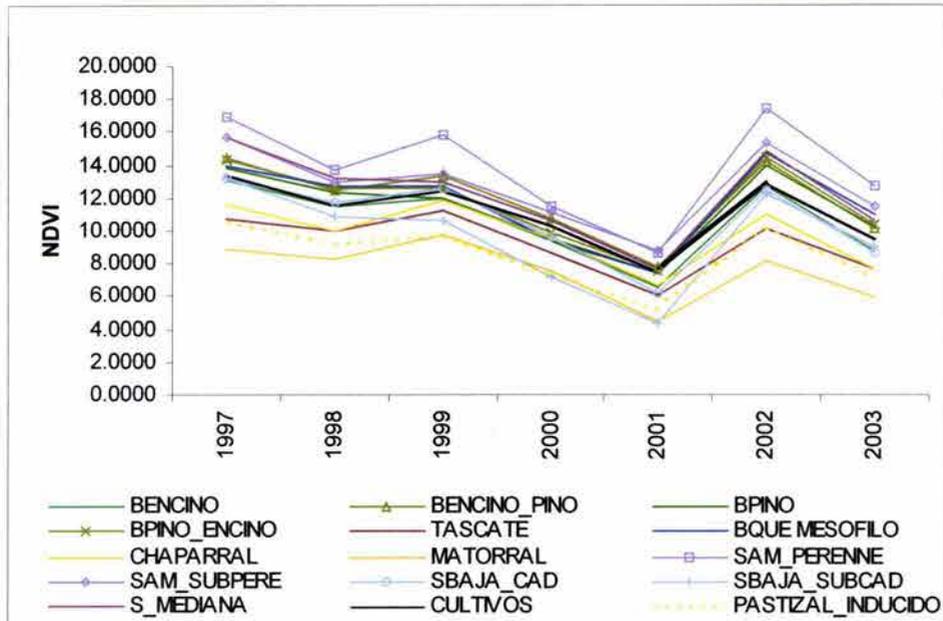


Figura 7. Variabilidad interanual de los valores acumulados del NDVI en 15 tipos de vegetación a lo largo de siete años. Bosque de encino=BENCINO, bosque de encino y pinos=BENCINO_PINO, bosques de pino=BPINO, bosques de pino y encino=BPINO_ENCINO, bosque de táscate=TASCATE, bosque mesófilo de montaña=BQUE MESOFILO, selva alta y mediana perenne=SAM_PERENNE, selva alta y mediana subperenne=SAM_SUBPERE, selva baja caducifolia=SBAJA_CAD, selva baja subcaducifolia=SBAJA_SUBCAD, selva mediana= S_MEDIANA.

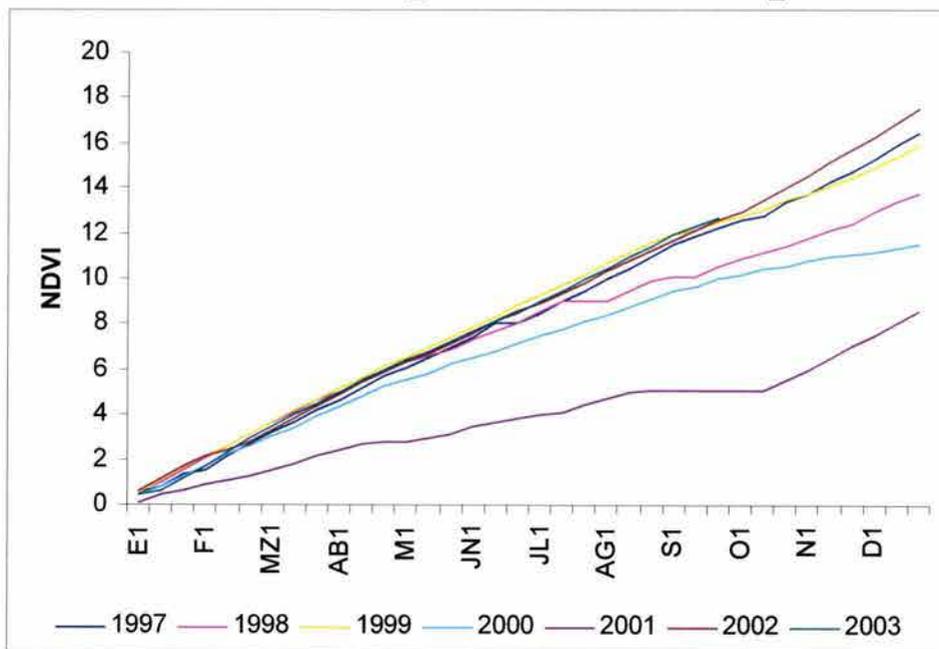


Figura 8. Variabilidad de los valores acumulados del NDVI en las selvas altas y medianas perennes en una secuencia de siete años.

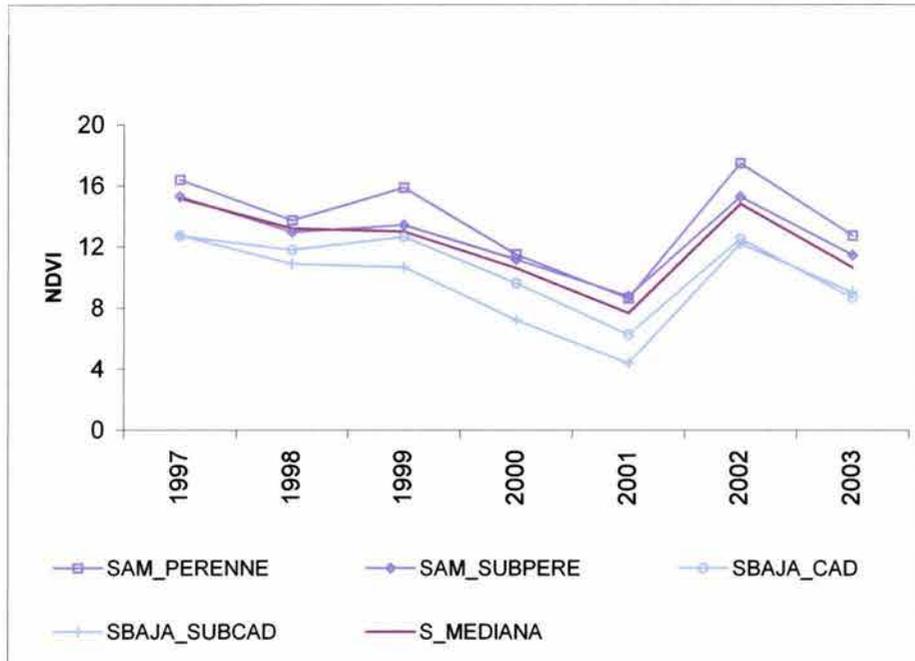


Figura 9. Variabilidad interanual de los valores acumulados del NDVI en cinco tipos de selvas a lo largo de siete años. Selva alta y mediana perenne=SAM_PERENNE, selva alta y mediana subperenne=SAM_SUBPERE, selva baja caducifolia= SBAJA_CAD, selva baja subcaducifolia=SBAJA_SUBCAD, selva mediana=S_MEDIANA.

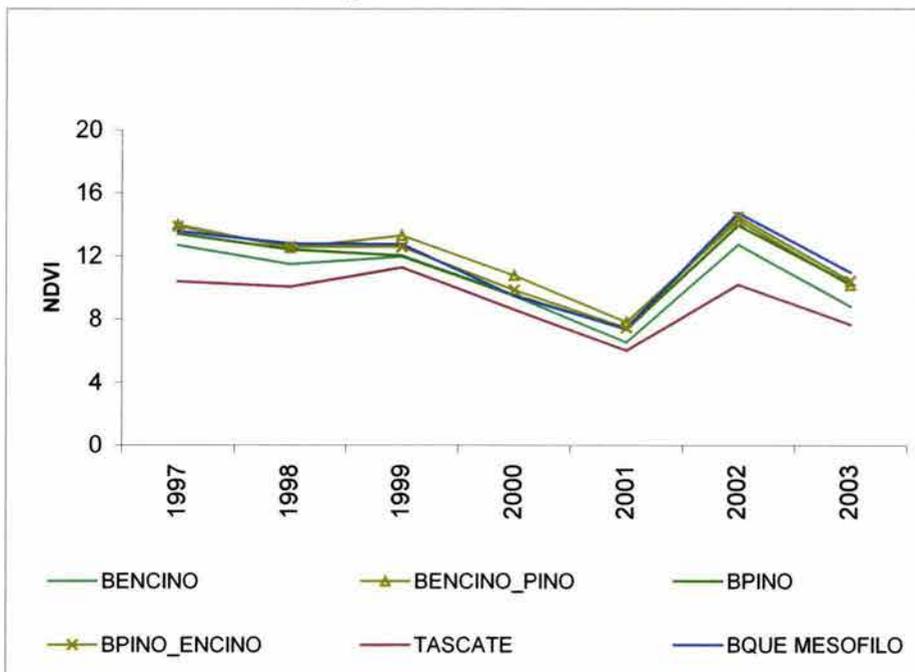


Figura 10. Variabilidad interanual de los valores acumulados del NDVI en seis tipos de bosques a lo largo de siete años. Bosque de encino=BENCINO, bosque de encino y pinos=BENCINO_PINO, bosques de pino=BPINO, bosques de pino y encino=BPINO_ENCINO, bosque de táscate=TASCATE, bosque mesófilo de montaña=BQUE MESOFILO

3.3. Variabilidad espacial anual de los NDVI para el Estado de Oaxaca

La precipitación posee una alta variación anual y espacial, lo cual no sólo se refleja en la variabilidad temporal de los valores promedio anual de los NDVI, sino en la distribución espacial de los mismos (Figuras, 12, 13, 14, 15, 16, 17 y 18). Debido a lo anterior, los valores de NDVI registrados por los 15 tipos de vegetación estudiados responden de manera similar a las regiones climáticas propuestas por Magaña et al. (2004) (Figura 11).

La región 1, localizada al Este del Estado de Oaxaca presentó un patrón de precipitación con una marcada estacionalidad, pero con baja cantidad de precipitación de enero a junio (2 mm día^{-1}); y una mayor cantidad de precipitación diaria de junio a septiembre (14 y 16 mm día^{-1}) (Figura 11). En esta zona, se registraron los mayores valores de NDVI durante los siete años de estudio, pero con una distribución espacial homogénea de dichos valores durante los siete años de estudio (Figuras, 12, 13, 14, 15, 16, 17 y 18). Asimismo, en esta región se encuentran principalmente la mayor parte de los bosques templados, así como parte de las selvas altas y medianas que dan al Golfo de México (Figura 2), lo cual puede explicar la constancia espacial y temporal de los valores de los NDVI en esta zona.

La región 4 forma parte del Istmo de Tehuantepec, en esta zona la precipitación se concentra en los meses de junio, julio, agosto y septiembre ($6-8 \text{ mm día}^{-1}$), pero disminuye drásticamente a partir de octubre hasta mayo $< 2 \text{ mm día}^{-1}$ (Figura 11). En esta zona, se registraron los valores de NDVI más contrastantes entre años y con mayor heterogeneidad espacial durante los siete años de estudio (Figuras, 12, 13, 14, 15, 16, 17 y 18). Entre la vegetación predominante en esta región es la selva baja caducifolia y los cultivos (Figura 2), es decir sistemas marcadamente estacionales y con una respuesta directa a la cantidad de precipitación anual; por lo que los valores de los NDVI tuvieron

una mayor variación espacial y temporal en los siete años de estudios (Figuras 12, 13, 14, 15 16, 17 y 18).

La región 5 tiene un patrón similar a las regiones 6 y 7. La estación seca de octubre a mayo presenta una precipitación de 2 mm día^{-1} ; mientras que durante la época húmeda (junio a septiembre) la precipitación oscila alrededor de los 10 mm día^{-1} . Los valores de NDVI son intermedios y se asocian a la vegetación secundaria, cultivos y pastizales, así como a las selvas medianas, las selvas altas subperennes y a pequeñas porciones de bosques (Figura 2).

La región 6 presenta un patrón similar a la región 7, pero con una mayor cantidad de precipitación. La época seca octubre-mayo tiene valores $< 2 \text{ día}^{-1}$; mientras que a partir de junio sus valores oscilan entre los 4 y los 12 mm día^{-1} (Figura 11). En esta zona, los valores de NDVI son intermedios, los cuales están asociados a bosques de pino, y áreas reducidas de selvas medianas y bajas. También cabe señalar que esta zona tuvo una baja variación espacial y temporal de los NDVI debido al carácter perenne de la vegetación.

La región 7 es la que presenta los menores valores de precipitación y una marcada estacionalidad de la precipitación diaria. La precipitación diaria de enero a junio es menor a 1 mm día^{-1} , mientras que la precipitación diaria durante la época húmeda de junio a octubre es de $1 - 6 \text{ mm día}^{-1}$ (Figura 11). Esta zona corresponde con los valores más bajos de NDVI, pero con una marcada variación espacial, la cual fue más contrastante de los valores promedio de los NDVI fueron en 1999, 2000 y 2001 con 1997, 2002 y 2003 Figuras, 12, 13 14,15 16, 17 y 18). Esta zona esta asociada principalmente a los matorrales xerófilos y a la vegetación inducida, lo cual puede sugerir la variación espacial temporal de las respuestas de la vegetación a la variabilidad espacial y temporal de la precipitación (Figura 2).

En la zona de los Valles Centrales, ocupada principalmente por cultivos y pastizales inducidos, se muestran valores de NDVI menores a cero a lo largo de los siete años estudiados (Figuras, 12, 13, 14, 15, 16, 17 y 18) lo que indica que es una zona con una baja productividad primaria neta. Esta condición es más crítica en 1999 (Figura 14), 2002 (Figura 17) y 2003 (Figura 18).

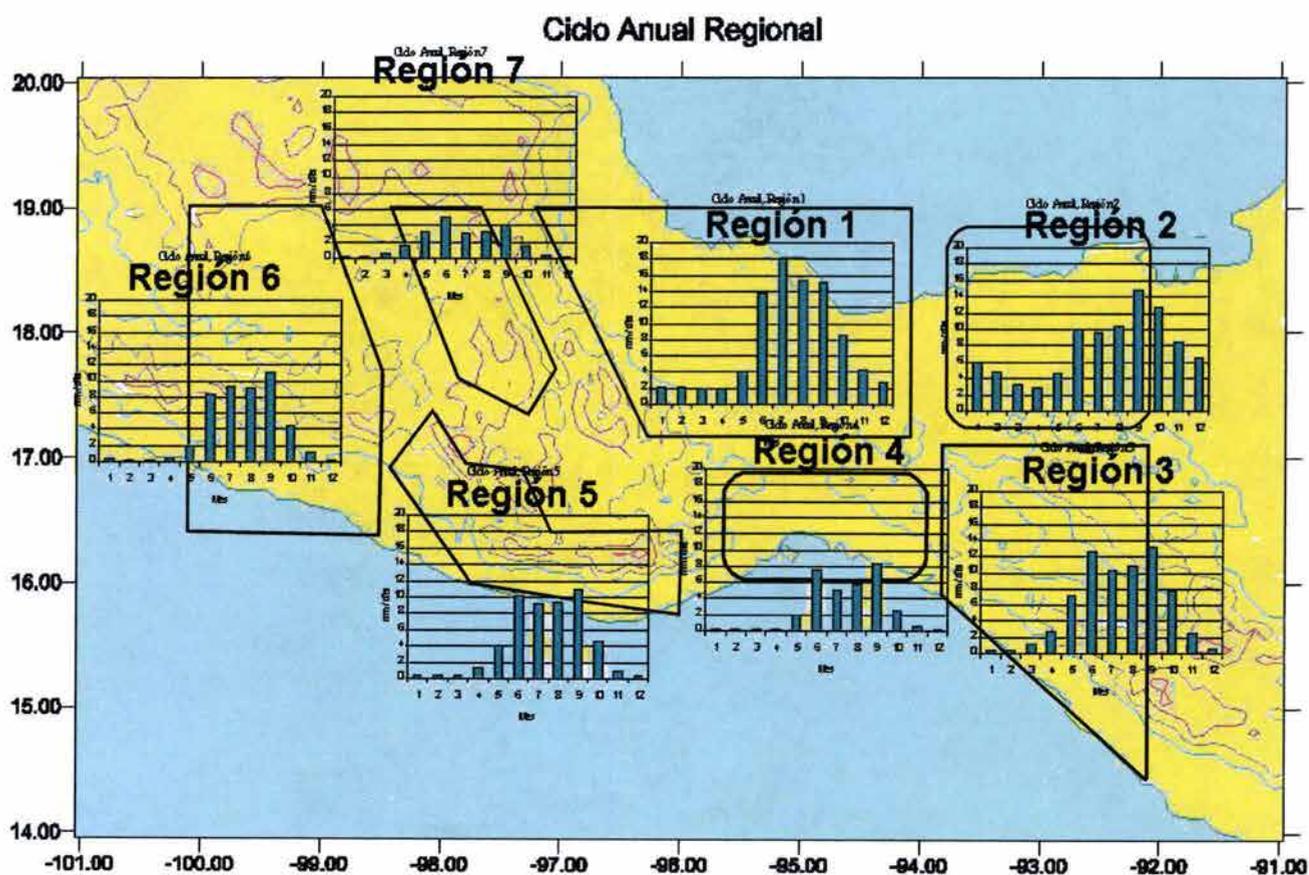


Figura 11. División del Estado de Oaxaca según los ciclos anuales regionales de la precipitación, propuesto por Magaña y colaboradores.

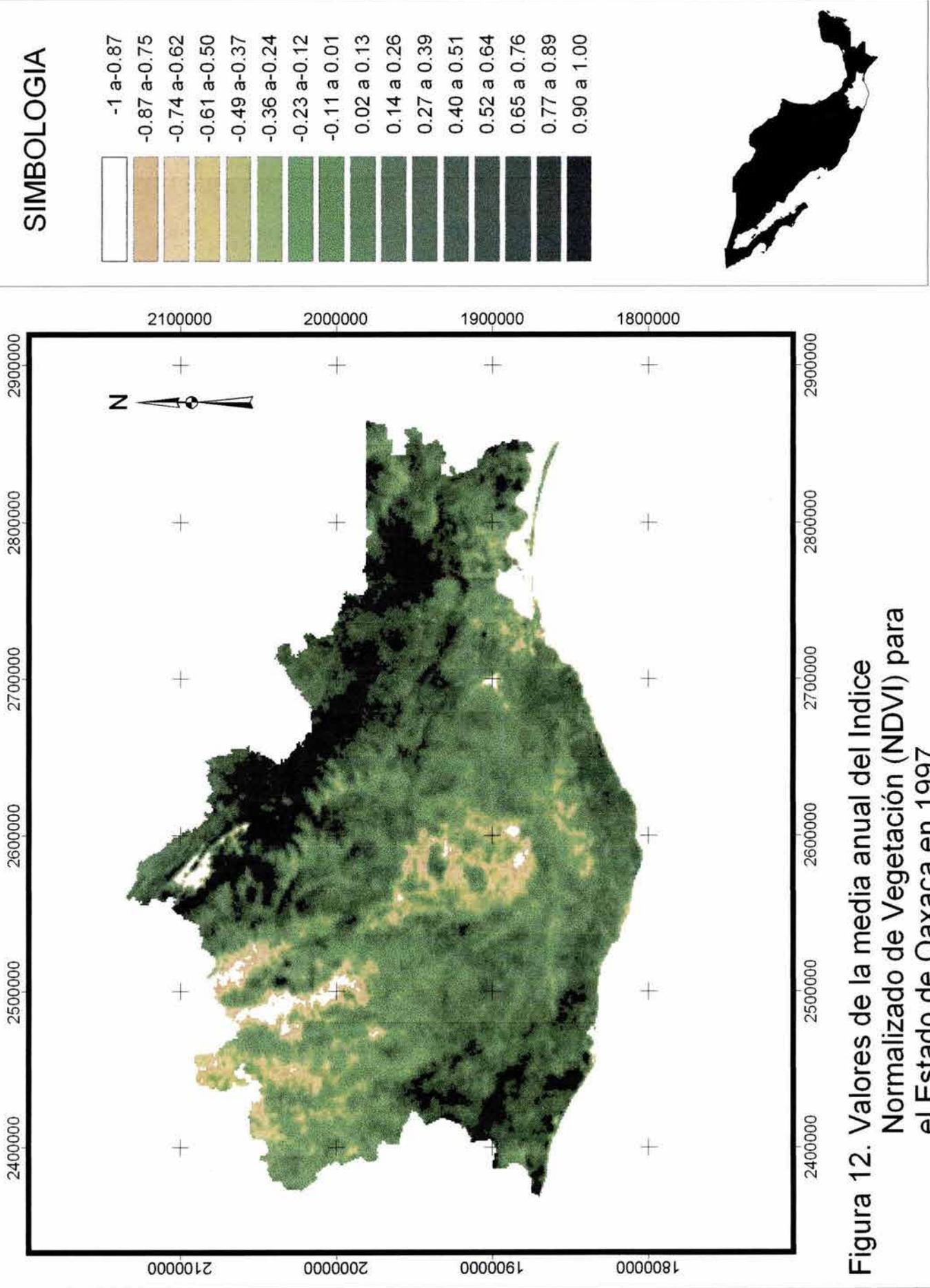


Figura 12. Valores de la media anual del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) para el Estado de Oaxaca en 1997

Elaboró: Ma. Luisa Cuevas Fdz.

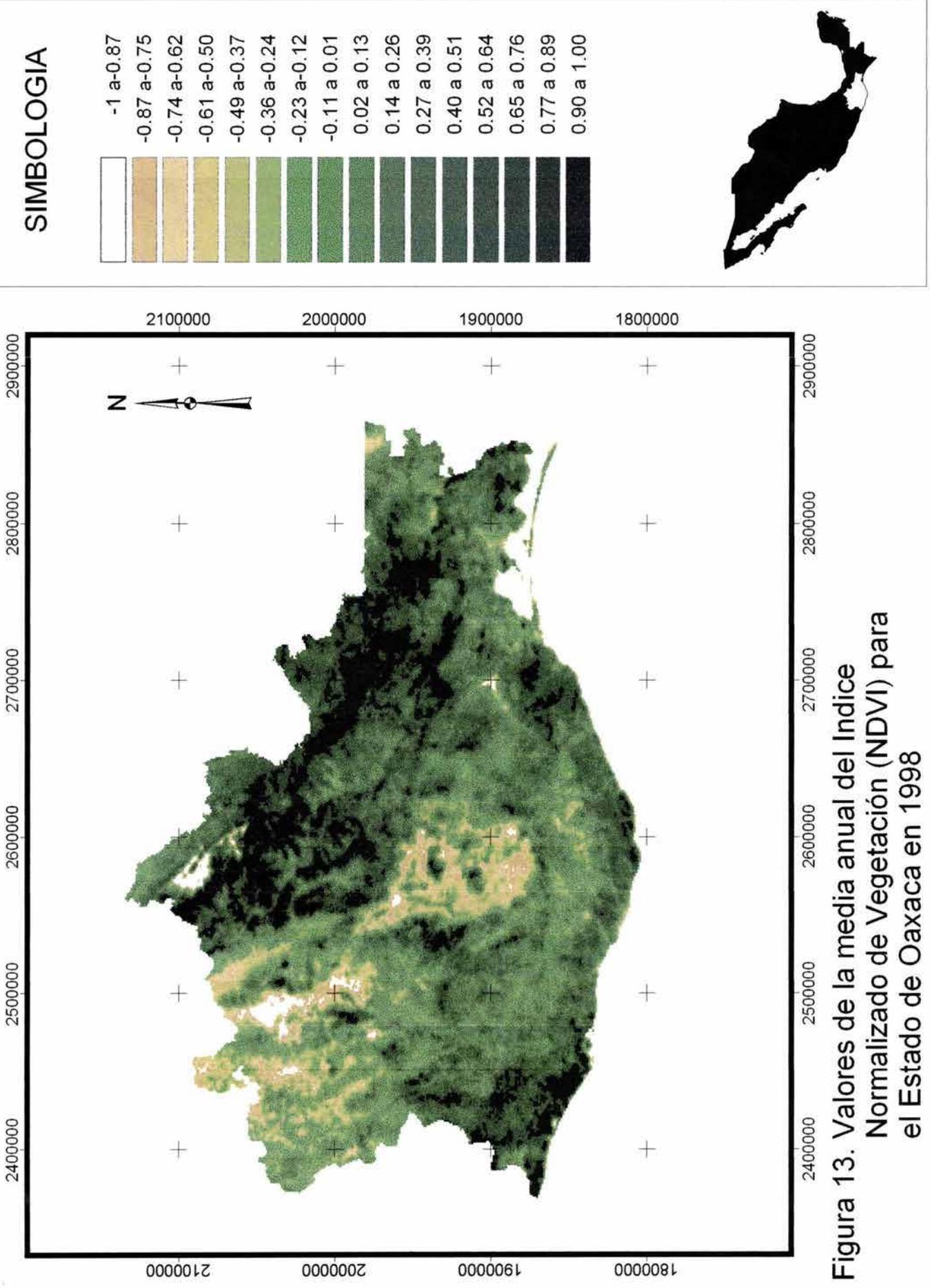


Figura 13. Valores de la media anual del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) para el Estado de Oaxaca en 1998

Elaboró: Ma. Luisa Cuevas Fdz.

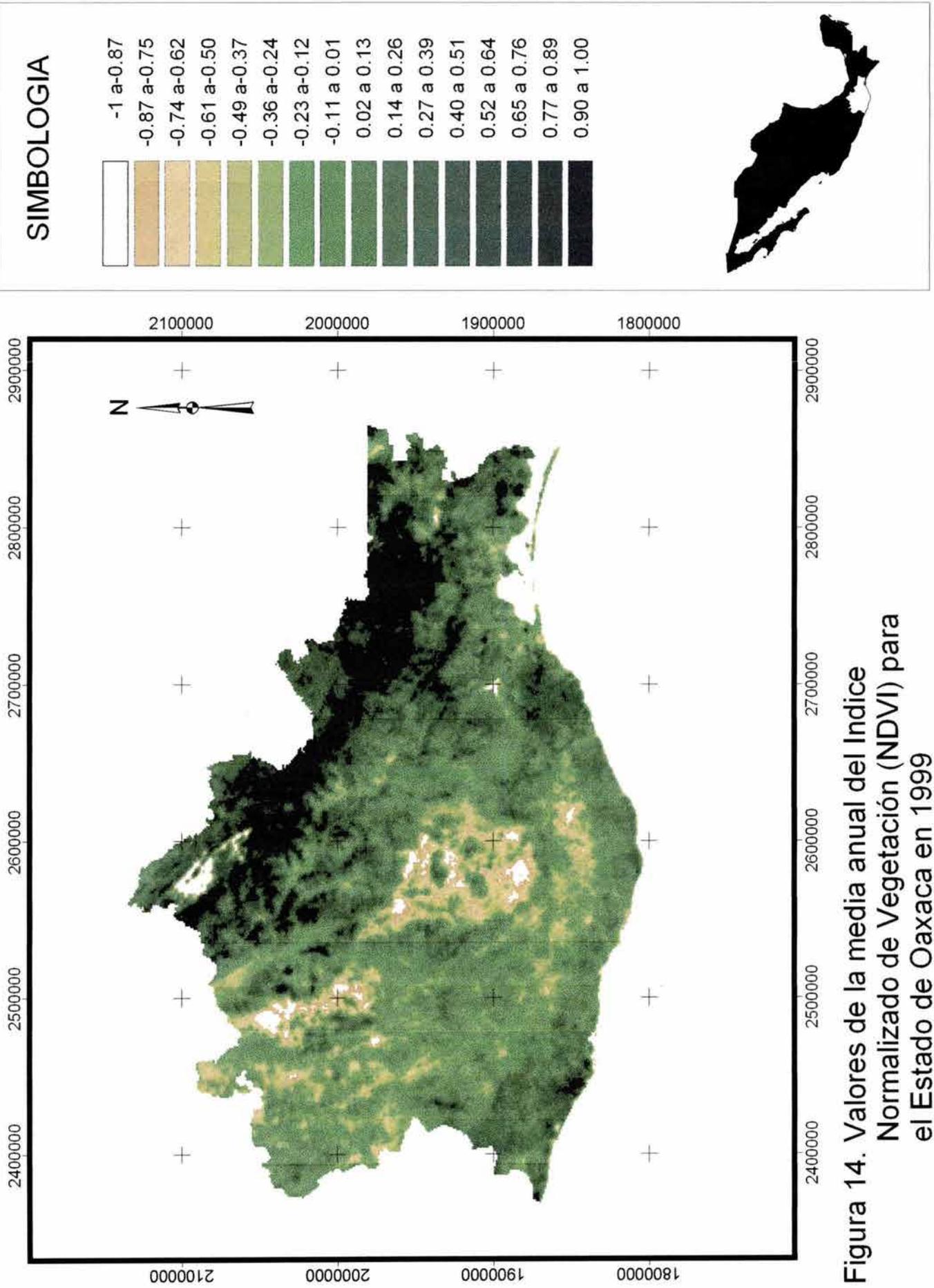


Figura 14. Valores de la media anual del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) para el Estado de Oaxaca en 1999

Elaboró: Ma. Luisa Cuevas Fdz.



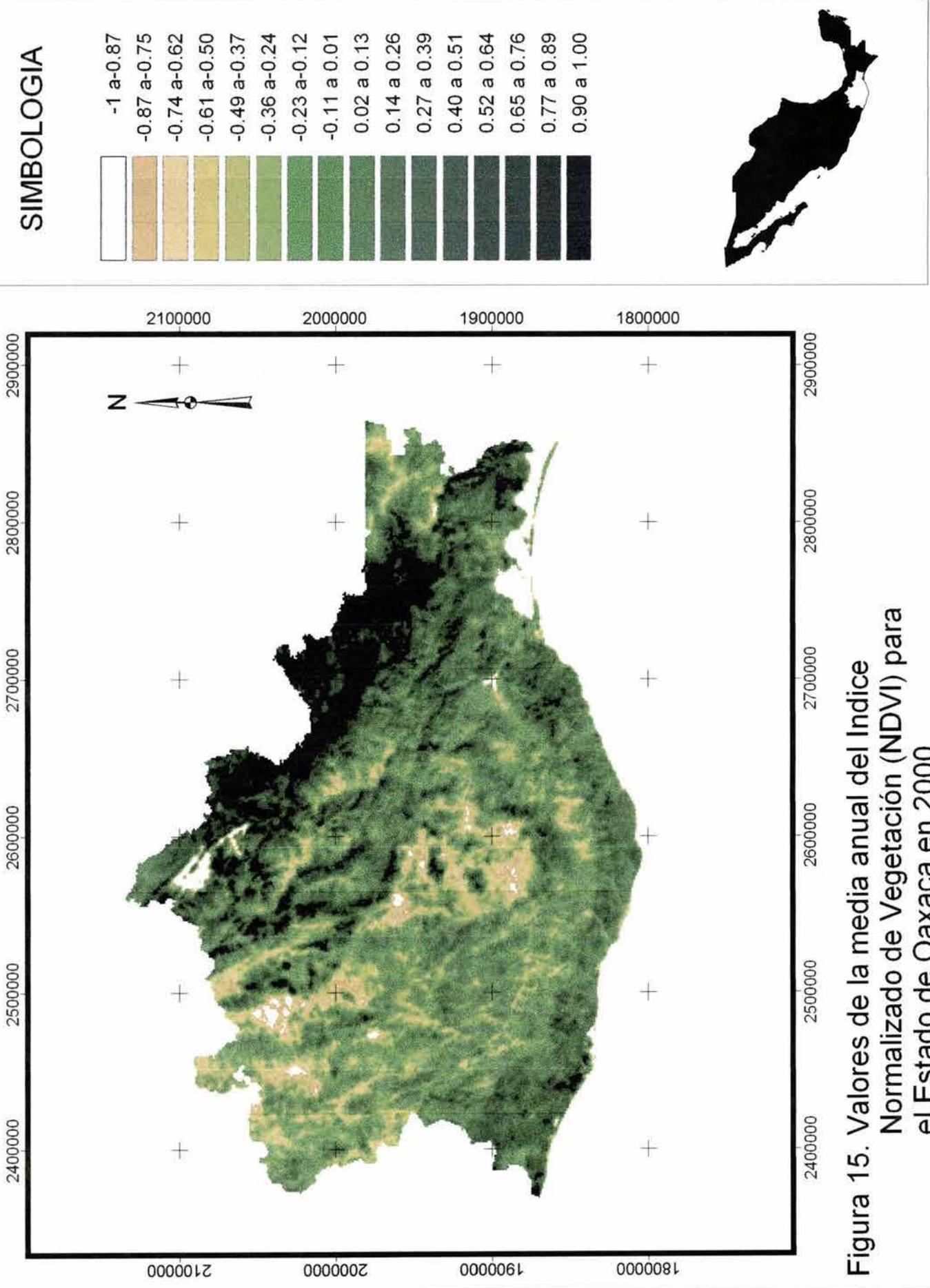


Figura 15. Valores de la media anual del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) para el Estado de Oaxaca en 2000

Elaboró: Ma. Luisa Cuevas Fdz.

60 0 60 120 Kilómetros

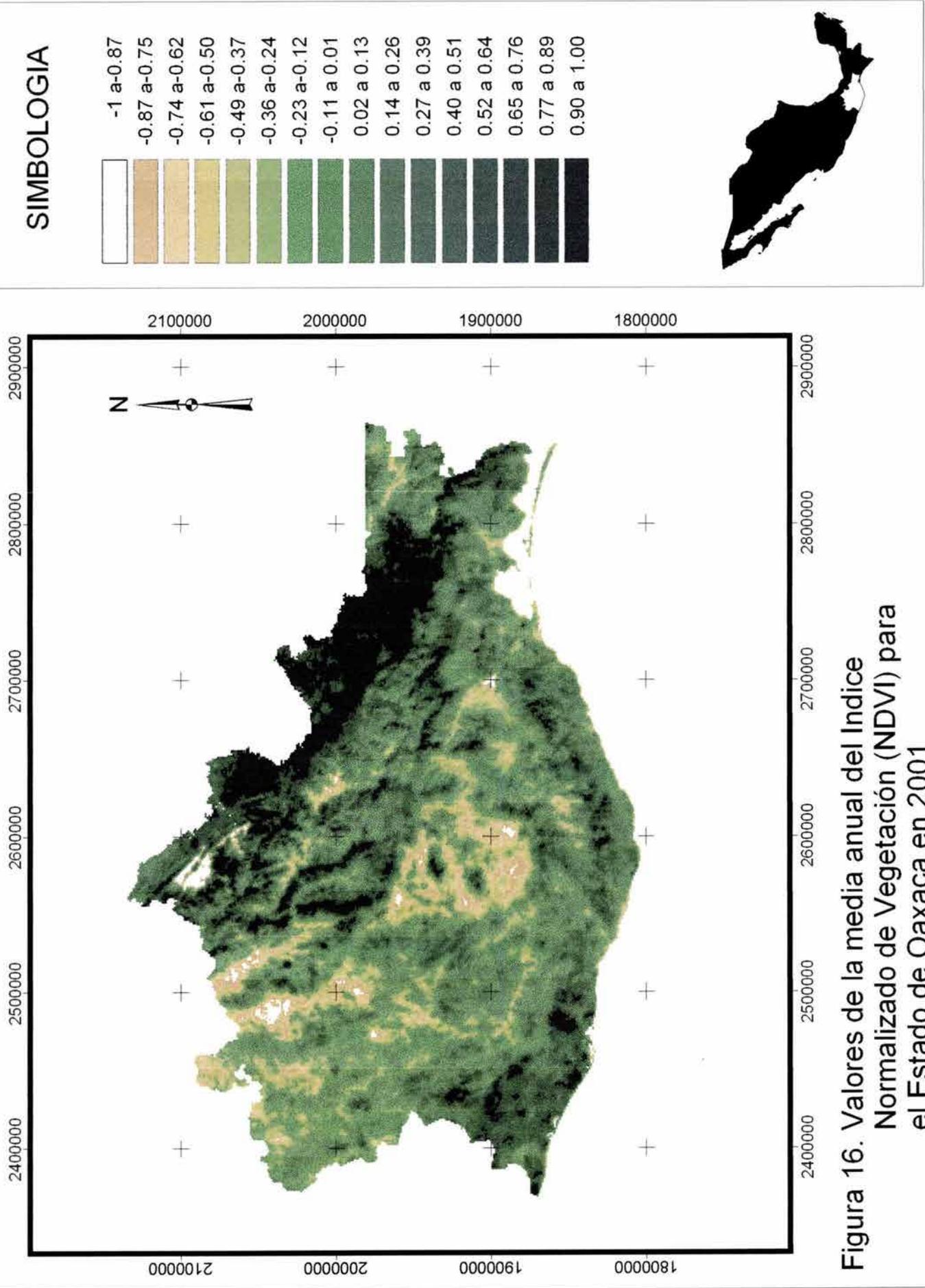


Figura 16. Valores de la media anual del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) para el Estado de Oaxaca en 2001

Elaboró: Ma. Luisa Cuevas Fdz.

60 0 60 120 Kilómetros

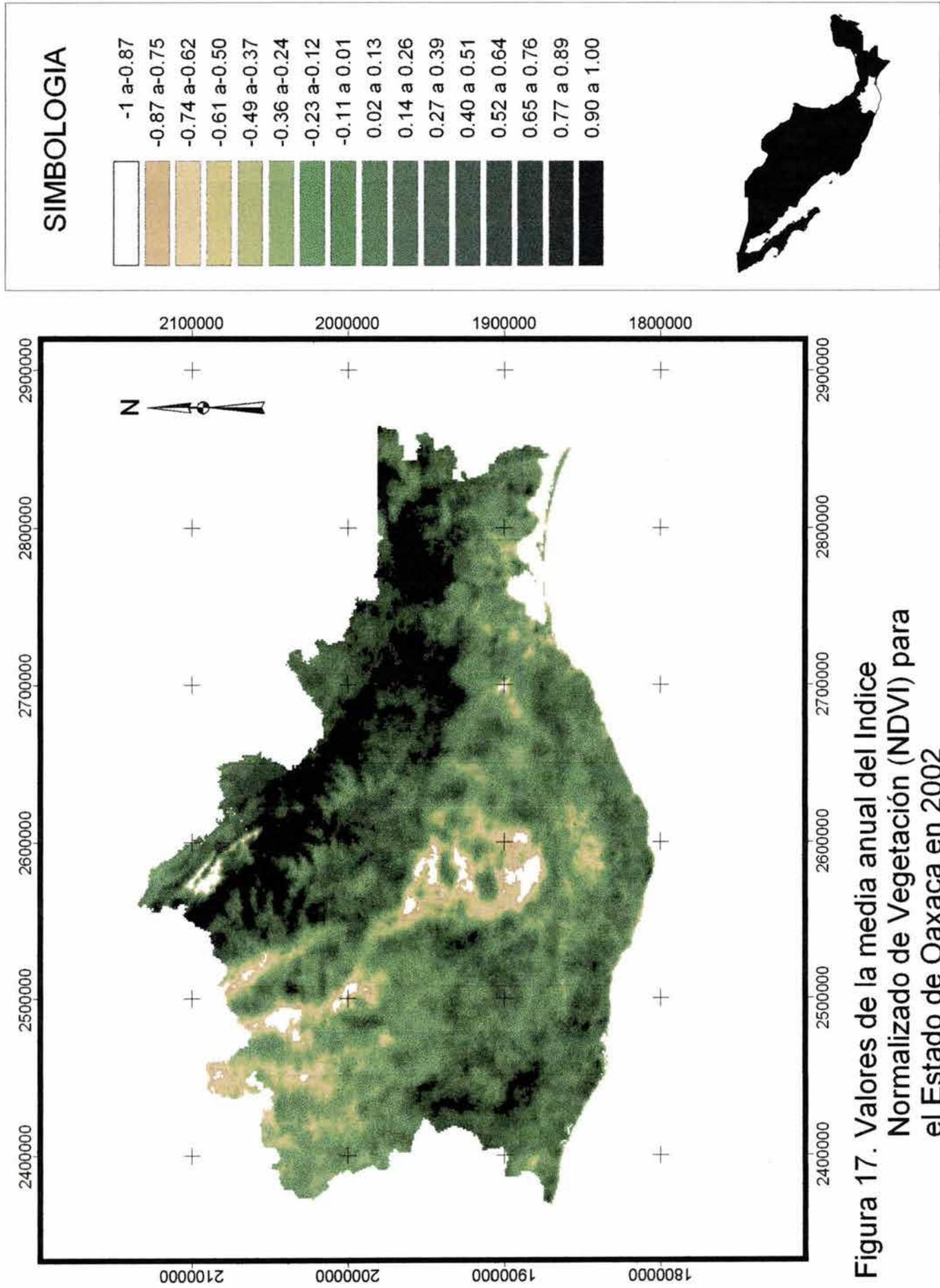


Figura 17. Valores de la media anual del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) para el Estado de Oaxaca en 2002

Elaboró: Ma. Luisa Cuevas Fdz.

60 0 60 120 Kilómetros

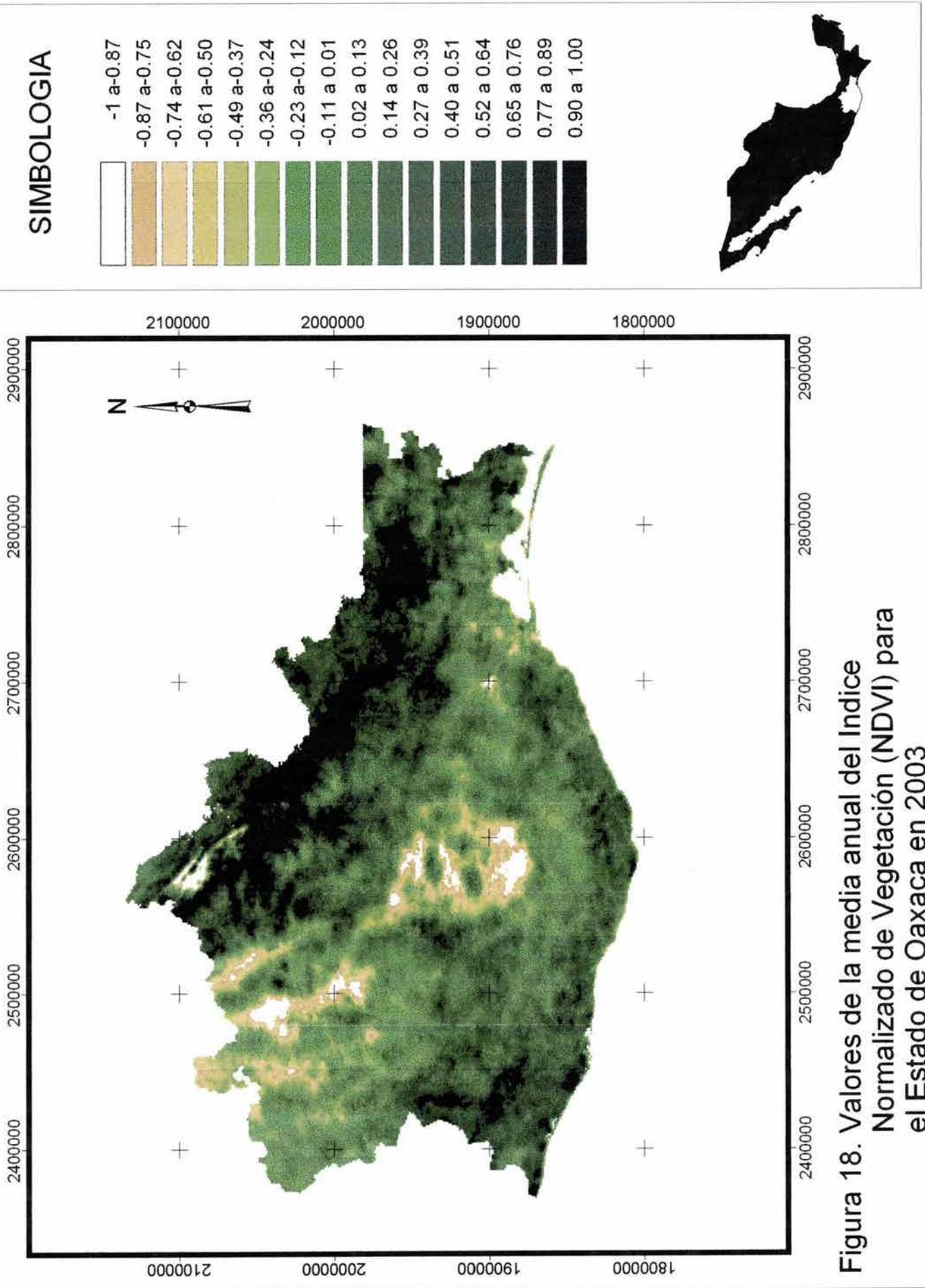


Figura 18. Valores de la media anual del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) para el Estado de Oaxaca en 2003

Elaboró: Ma. Luisa Cuevas Fdz.

60 0 60 120 Kilómetros

3.4. Variabilidad intraanual de los NDVI para los 15 tipos de vegetación estudiados.

3.4.1. Bosques de Encino

El patrón estacional de la productividad primaria fue diferente entre los siete años estudiados (Figura 19a). En 1997 los bosques de encino iniciaron su época de crecimiento en junio como lo sugiere el incremento del valor promedio del NDVI (0.3475 ± 0.01 ; 0.4709 ± 0.01 y 0.4420 ± 0.01) y se mantuvo hasta la última decena de octubre (0.5100 ± 0.01). En contraste, el momento más crítico de la época senescente se presentó de la tercera decena de marzo (0.2185 ± 0.01) a la segunda decena de abril (0.2203 ± 0.01 y 0.2439 ± 0.01). En 1998, el patrón temporal del NDVI fue similar al de 1997. Los valores promedio del NDVI indican que la época de crecimiento se presentó en los meses de julio (0.4019 ± 0.01 ; 0.3873 ± 0.01 y 0.3946 ± 0.01), a noviembre (0.4839 ± 0.01 ; 0.4551 ± 0.01 y 0.4546 ± 0.01), mientras que los meses de abril, mayo y junio se registraron los menores valores del NDVI (0.2701 ± 0.01 ; 0.2740 ± 0.01 ; 0.2696 ± 0.01 ; 0.2472 ± 0.01 ; 0.2673 ± 0.01 ; 0.2547 ± 0.01 ; 0.1647 ± 0.01 ; 0.2867 ± 0.01 y 0.2994 ± 0.01 , respectivamente), sugiriendo la senescencia de estos bosques. Los valores promedio del NDVI en 1999 sugieren que la época de crecimiento fue de julio (0.3318 ± 0.01 ; 0.4332 ± 0.01 y 0.4548 ± 0.01) a la tercera decena de septiembre (0.4215 ± 0.01); con un nuevo repunte en la tercera decena de octubre (0.5007 ± 0.01). En contraste; la época senescente se definió entre enero y junio (0.41 ± 0.01 y 0.2010 ± 0.01 , respectivamente).

Tomando en cuenta que los valores promedio en el 2000 fueron menores a los de los años anteriores, encontramos que la época senescente fue de enero (0.3575 ± 0.01 ; 0.3121 ± 0.01 y 0.2890 ± 0.01) a junio (0.1779 ± 0.01); por lo que la época de crecimiento inició hasta julio (0.4281 ± 0.01 ; 0.3677 ± 0.01 y 0.3258 ± 0.01) y se prolongó a la segunda y tercera decena de agosto (0.4493 ± 0.01 y 0.3569 ± 0.01), con un marcado descenso en diciembre (0.1927 ± 0.01 ; 0.1948 ± 0.01 y 0.1580 ± 0.01). A pesar que el

2001 tuvo los menores valores promedio del NDVI con relación a los siete años estudiados, se puede apreciar que la tendencia de los datos registrados es muy diferente a la de los demás años, así que los valores del NDVI tienen una época de crecimiento ascendente de la tercera decena de junio (0.2734 ± 0.03) a la segunda decena de agosto (0.3681 ± 0.03). En contraste, los valores del NDVI registrados en mayo (-0.0147 ± 0.03 ; 0.0311 ± 0.03 y 0.0817 ± 0.03) y las dos primeras decenas de junio (0.0720 ± 0.03 y 0.1916 ± 0.03) sugieren la época senescente. Durante el 2002, la época de crecimiento va de julio (0.3917 ± 0.01 ; 0.3917 ± 0.01 y 0.4140 ± 0.01) a noviembre (0.4571 ± 0.01 ; 0.4890 ± 0.01 y 0.4507 ± 0.01). En el 2003 los valores promedio del NDVI sugieren que la época de crecimiento va de julio (0.3942 ± 0.01 ; 0.4766 ± 0.01 y 0.4776 ± 0.01), a agosto (0.4653 ± 0.01 ; 0.4330 ± 0.01 y 0.3711 ± 0.01), con un nuevo repunte en noviembre (0.4373 ± 0.01 ; 0.4669 ± 0.01 y 0.4403 ± 0.01) indicando un nuevo periodo de crecimiento. En contraste, la época senescente va de enero (0.38 ± 0.01) a la primera y segunda decena de junio (0.2042 ± 0.01 y 0.2145 ± 0.01).

En la Figura 19b se observa la variabilidad interanual de los valores acumulados del NDVI en los bosques de encino en los siete años estudiados. El valor más alto registrado para los bosques de encino en 1997 fue de 13.11 ± 0.61 ; mientras que el mayor valor acumulado en 1998 no es muy distinto al del año anterior, 12.68 ± 0.59 . El valor acumulado del NDVI alcanzado para 1999 fue ligeramente menor al de los años anteriores 11.96 ± 0.57 . En el 2000 y 2001, el valor acumulado fue menor que los tres años anteriores (9.43 ± 0.47 ; y 6.54 ± 0.29 , respectivamente). En el 2002 y 2003 vuelven a estar en el mismo rango que los años anteriores al 2000, alcanzado un máximo NDVI de 12.69 ± 0.61 en el 2002, y 12.35 ± 0.59 en el 2003.

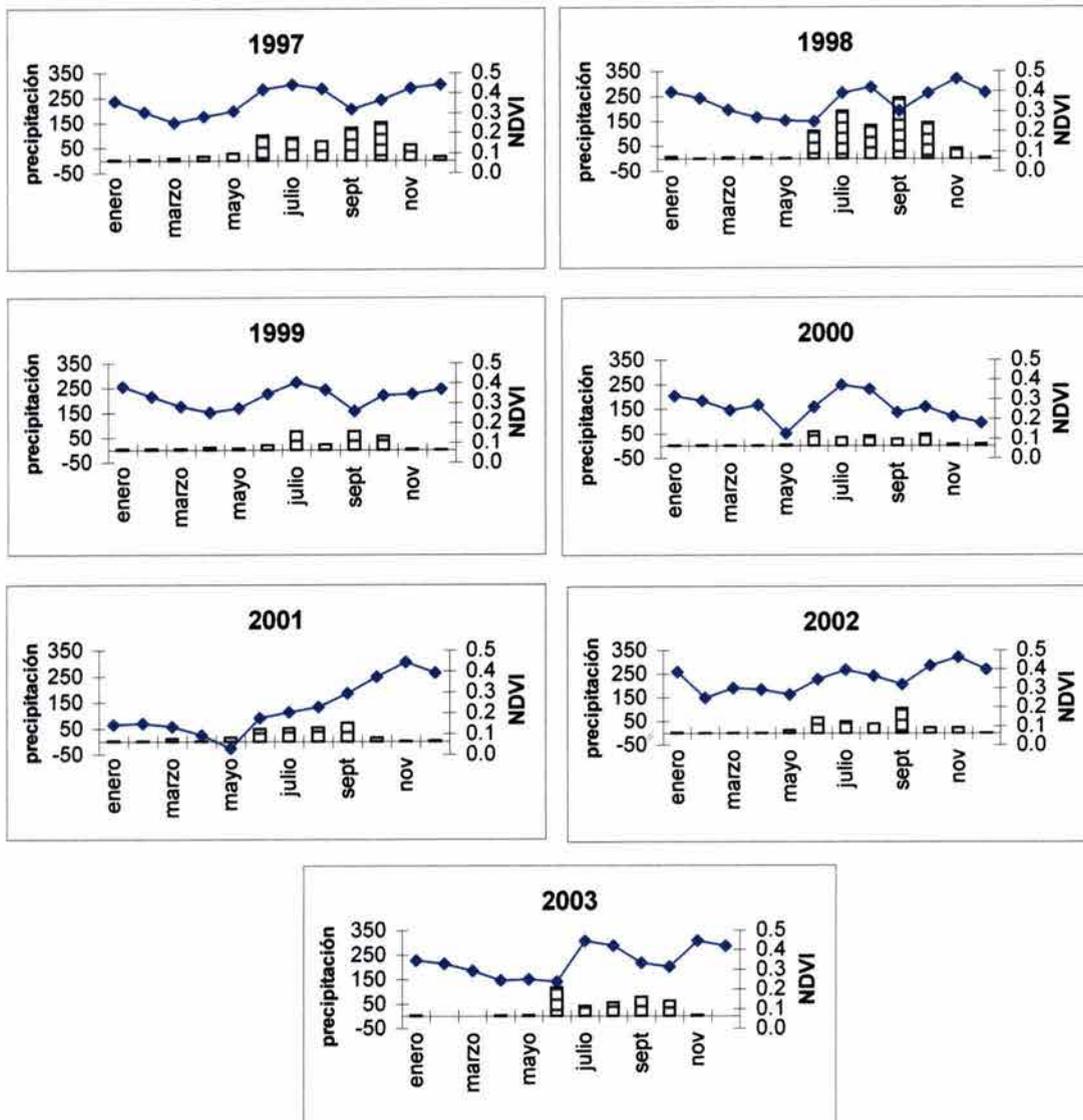


Figura 19a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en los bosques de encino del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados. La línea azul representa los NDVI, mientras que las barras indican la precipitación.

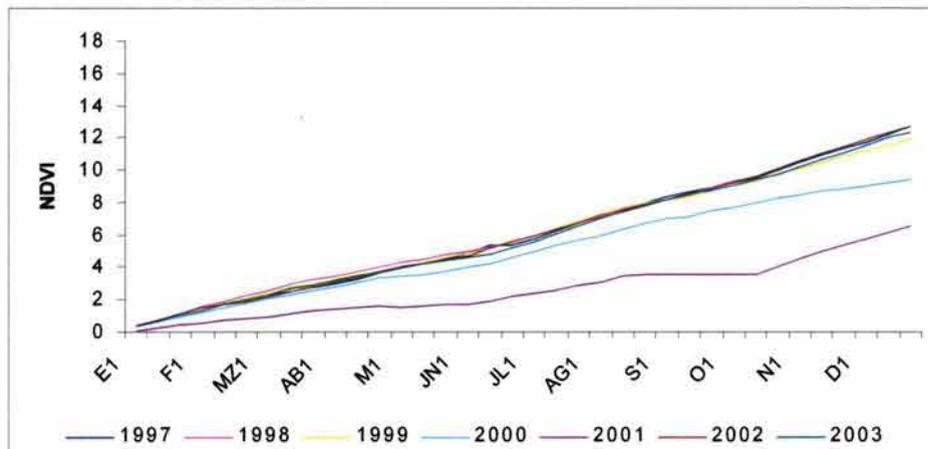


Figura 19b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en los bosques de encino del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados.

3.4.2 Bosque de Encino-Pino

La figura 20a muestra las diferencias en los patrones estacionales de la productividad primaria de los bosques de encino-pino de 1997 al 2003. En 1997 los bosques de encino-pino iniciaron su época de crecimiento en la segunda decena de junio (0.4255 ± 0.01 ; 0.4304 ± 0.01) y se continuó hasta el final de agosto (0.5125 ± 0.01 ; 0.4185 ± 0.01 y 0.5224 ± 0.01), se presenta un corto periodo de recambio de la segunda decena de septiembre a la segunda de octubre (0.2909 ± 0.01 ; 0.3082 ± 0.01 ; 0.2276 ± 0.01 y 0.3311 ± 0.01), y vuelve a presentarse otro periodo de crecimiento a partir de la tercera decena de octubre hasta finales del año. En 1998, los mayores valores promedios sugieren que el periodo de crecimiento del año anterior se continuó hasta enero (0.5065 ± 0.01 ; 0.4388 ± 0.01 y 0.4593 ± 0.01), a partir de marzo se puede apreciar la época de senescencia (0.4125 ± 0.01 ; 0.3667 ± 0.01 y 0.3349 ± 0.01) que se continuó hasta la primera parte de junio (0.1795 ± 0.01). A partir de la segunda decena de junio (0.3166 ± 0.01 y 0.3210 ± 0.01) y hasta agosto (0.4316 ± 0.01 ; 0.4710 ± 0.01 y 0.3923 ± 0.01) es que se presenta el periodo de crecimiento en este año. Asimismo en 1999 se registra la época de senescencia a partir de la tercera decena de febrero (0.3915 ± 0.01) hasta mayo (0.2736 ± 0.01 ; 0.2793 ± 0.01 y 0.3130 ± 0.01), por otro lado los mayores valores promedio del NDVI indican que la época de crecimiento comenzó en la tercera decena de junio (0.4140 ± 0.01), hasta agosto (0.4509 ± 0.01 ; 0.4425 ± 0.01 ; 0.3513 ± 0.01); sin embargo, existe un repunte de la época de crecimiento en la tercera decena de septiembre (0.3740 ± 0.01), y disminuye en la tercera decena de octubre (0.5923 ± 0.01).

De manera particular, en el 2000 los valores registrados indican que durante los cuatro primeros meses se presenta una disminución continua de los mismos, sin embargo a partir de la tercera decena de abril (0.3496 ± 0.01) hasta la primera de junio (0.3123 ± 0.01) podemos apreciar una caída rápida de los valores, lo que se traduciría en un recrudescimiento de la época de senescencia. A partir de junio (0.3123 ± 0.01 ; $0.1798 \pm$

0.01 y 0.3427 ± 0.01) y hasta la primera decena de septiembre (0.2122 ± 0.01) se presenta el periodo de crecimiento más representativo. En el año 2001 los valores promedio indican que la época de crecimiento se presentó en la tercera decena de julio (0.2858 ± 0.03), la primera y segunda decena de agosto (0.3039 ± 0.03 y 0.3593 ± 0.03), disminuyó drásticamente en la tercera decena y repuntó a partir de noviembre (0.5436 ± 0.03 ; 0.5296 ± 0.03 y 0.4420 ± 0.03) y diciembre (0.4971 ± 0.03 ; 0.5022 ± 0.03 y 0.4234 ± 0.03). Con respecto a la época de menor crecimiento, ésta se presenta principalmente en abril (0.1905 ± 0.03 ; 0.1836 ± 0.03 y 0.0999 ± 0.03) y mayo (0.0135 ± 0.03 ; 0.0536 ± 0.03 y 0.1192 ± 0.03). En este año ocurre lo contrario que en el 2000 ya que los valores en el primer semestre son menores y a partir de agosto se aprecia un aumento que permite alcanzar valores promedio, en diciembre, similares a los de 1997, 1998 y 1999.

Para el año 2002, la época de crecimiento se presenta a partir de la segunda decena de junio (0.3515 ± 0.01) hasta agosto (0.5153 ± 0.01 ; 0.3477 ± 0.01 y 0.3628 ± 0.01), y nuevamente de la última decena de septiembre hasta diciembre (0.4954 ± 0.01 ; 0.4538 ± 0.01 y 0.5083 ± 0.01), con relación a la época senescente, ésta va de abril (0.3458 ± 0.01 ; 0.3259 ± 0.01 y 0.3483 ± 0.01) a la primera decena de junio (0.2108 ± 0.01).

De manera similar en el 2003 los valores promedio en mayo (0.3173 ± 0.02 ; 0.2054 ± 0.02 y 0.3188 ± 0.02) y junio (0.1465 ± 0.02 ; 0.2415 ± 0.02 y 0.2569 ± 0.02) indican la época de senescencia más importante, mientras que la época de crecimiento inicia a partir de julio (0.4617 0.4868 y 0.5016) y dura hasta noviembre (0.4843 ± 0.02 ; 0.5202 ± 0.02 y 0.5257 ± 0.02), con una disminución de la segunda decena de septiembre a la segunda de octubre.

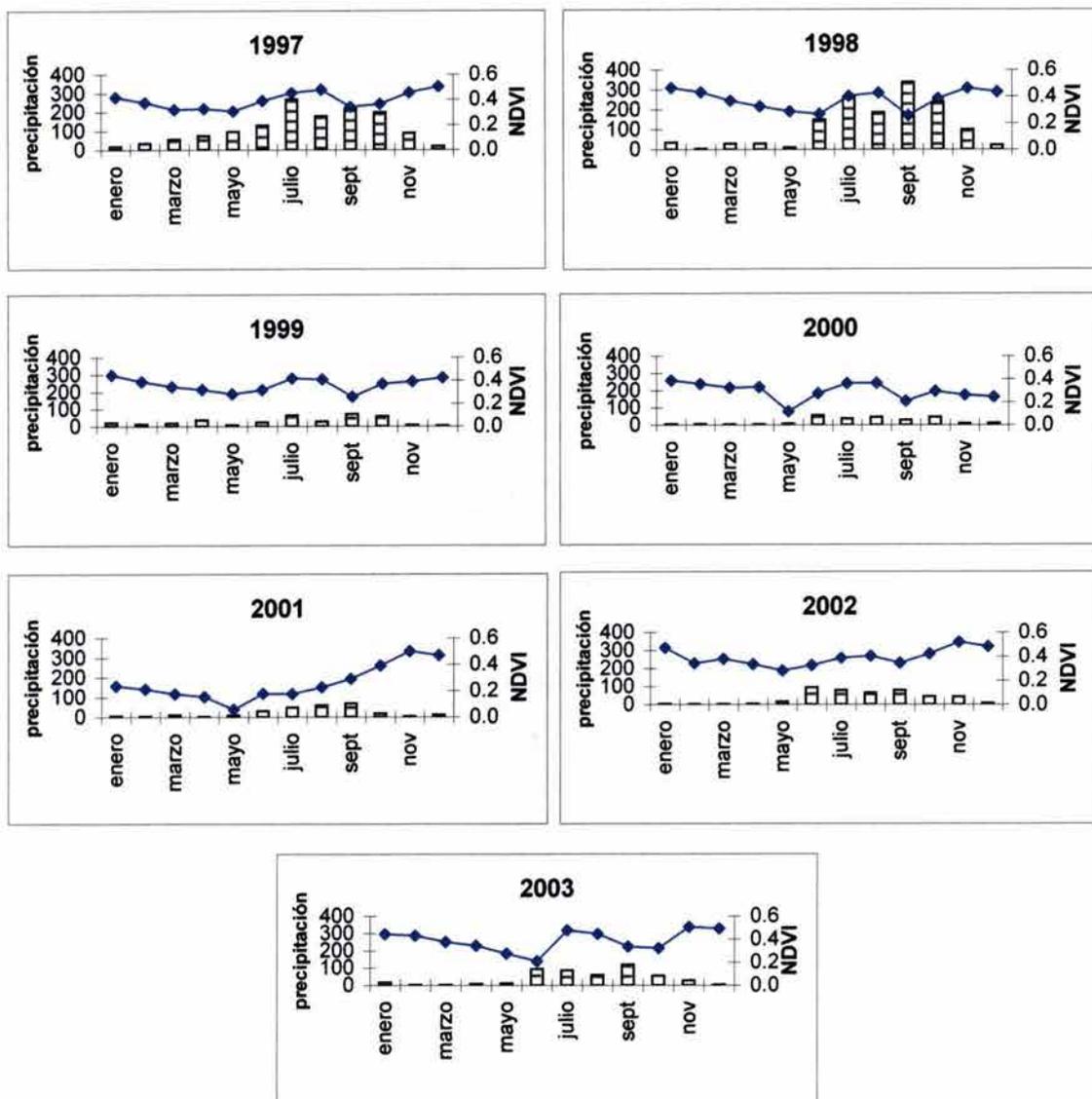


Figura 20a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en los bosques de encino-pino del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados. La línea azul representa los NDVI, las barras indican la precipitación.

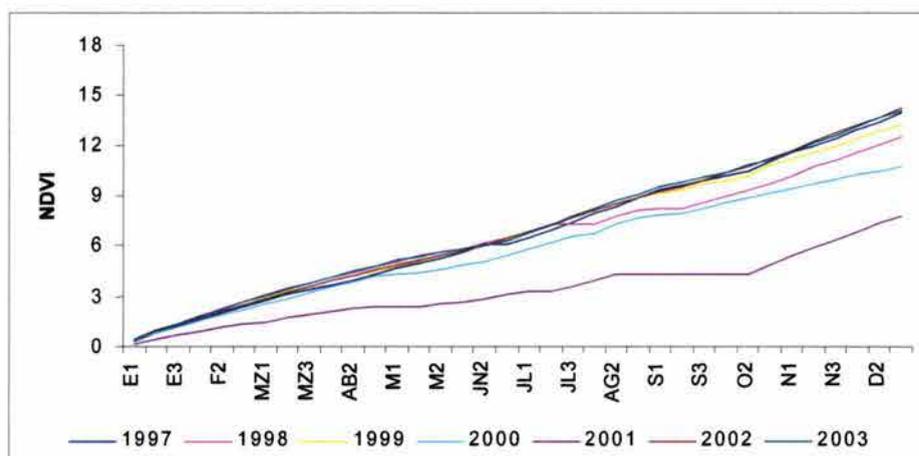


Figura 20b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en los bosques de encino-pino del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados.

Con respecto a la variabilidad interanual de los valores acumulados del NDVI encontramos que en 1997 el valor máximo alcanzado fue de 14.41 ± 0.66 , en 1998 es de 13.67 ± 0.63 , y 13.29 ± 0.62 en 1999. En el 2000 esta disminución resulta más drástica, alcanzando un valor máximo acumulado de 10.74 ± 0.51 , muy por debajo de los resultados obtenidos en los años anteriores. De manera similar en el 2001 el valor máximo acumulado es de 7.82 ± 0.32 , el menor con respecto a los siete años estudiados. Los valores en el 2002 presentan un valor acumulado de 14.25 ± 0.66 al final del año, el mayor con respecto a los siete años estudiados. Finalmente en el 2003 el valor final registrado es de 14.13 ± 0.65 . (Figura 20b)

3.4.3 *Bosque de Pino*

La variabilidad intraanual de los valores promedio en los bosques de pino se muestra en la Figura 21a. En 1997, los bosques de pino iniciaron su época de crecimiento a partir de la segunda decena de junio (0.3849 ± 0.02) hasta agosto (0.4950 ± 0.02 ; 0.3709 ± 0.02 y 0.4330 ± 0.02), con un marcado repunte de la tercera decena de octubre (0.5350 ± 0.02) a diciembre (0.4923 ± 0.02 ; 0.5125 ± 0.02 y 0.5377 ± 0.01). En contraste, el periodo de senescencia se presenta a partir de abril (0.2770 ± 0.02) a la segunda de octubre (0.2615 ± 0.02). En 1998 el patrón estacional es ligeramente diferente a 1997, los valores del NDVI indican que la época de crecimiento de 1997 se prolongó hasta febrero 1998, por lo que el periodo de senescencia se inició a partir de la tercera decena de marzo (0.5040 ± 0.02) y se prolongó hasta junio (0.1813 ± 0.02 ; 0.2587 ± 0.02 y 0.2574 ± 0.02). Asimismo, en junio comienza la época de crecimiento que se continuó hasta agosto (0.3094 ± 0.02 ; 0.3417 ± 0.02 y 0.2771 ± 0.02); sin embargo decrece en septiembre (0.1020 ± 0.02 ; 0.2438 ± 0.02 y 0.1966 ± 0.02) y vuelve a incrementarse a partir de la tercera decena de octubre (0.4015 ± 0.02) hasta diciembre (0.4132 ± 0.02 ; 0.4346 ± 0.02 y 0.4434 ± 0.02). En 1999, la época de crecimiento se presentó entre la segunda decena

de julio (0.3383 ± 0.02) y la primera decena de septiembre (0.1256 ± 0.02), y nuevamente de la tercera decena de octubre (0.4921 ± 0.02) hasta diciembre (0.4535 ± 0.02 ; 0.4185 ± 0.02 y 0.4248 ± 0.02). Por otro lado, a partir de la segunda decena de abril (0.3873 ± 0.02) hasta la primera decena de julio (0.1321 ± 0.02) se presenta la época de más baja productividad.

En el 2000 los valores promedio tienen una mayor oscilación con respecto a los años anteriores. Sin embargo se puede apreciar que de la tercera decena de abril (0.3451 ± 0.02) las condiciones de senescencia se recrudecen hasta la tercera decena de junio (0.2301 ± 0.02) donde se presenta el inicio de la época de crecimiento que continúa hasta la segunda decena de septiembre (0.3274 ± 0.02). Asimismo, los bosques de pino en el 2001 registran valores promedio de NDVI muy por debajo de los registrados en los siete años estudiados. El periodo de senescencia se ubica entre la tercera decena de febrero (0.2364 ± 0.03) y la tercera de julio (0.0839 ± 0.03); en contraste, la época de crecimiento abarca desde la primera decena de agosto (0.1219 ± 0.03) y se continuó hasta diciembre (0.5264 ± 0.03 ; 0.4921 ± 0.03 y 0.3919 ± 0.03).

En el 2002 el periodo de senescencia comenzó hasta abril debido al ascenso de los datos de NDVI de 2001; por lo que la época senescente fue de abril (0.4304 ± 0.02 ; 0.3895 ± 0.02 y 0.3950 ± 0.02) a la primera decena de junio (0.2156 ± 0.02). La época de crecimiento inició en la segunda decena de junio y se extendió hasta agosto (0.4597 ± 0.02 ; 0.2870 ± 0.02 y 0.3027 ± 0.02) y volvió a repuntar en la segunda decena de octubre (0.3254 ± 0.02) hasta diciembre (0.5178 ± 0.02 ; 0.4789 ± 0.02 y 0.5178 ± 0.02). De manera similar en el 2003 el periodo de senescencia se extiende de abril (0.4364 ± 0.02 ; 0.4006 ± 0.02 y 0.3648 ± 0.02) a junio (0.1758 ± 0.02 ; 0.2226 ± 0.02 y 0.1802 ± 0.02) y el de crecimiento de julio (0.3222 ± 0.02 ; 0.3883 ± 0.02 y 0.4748 ± 0.02) hasta la primera decena de septiembre (0.4016 ± 0.02).

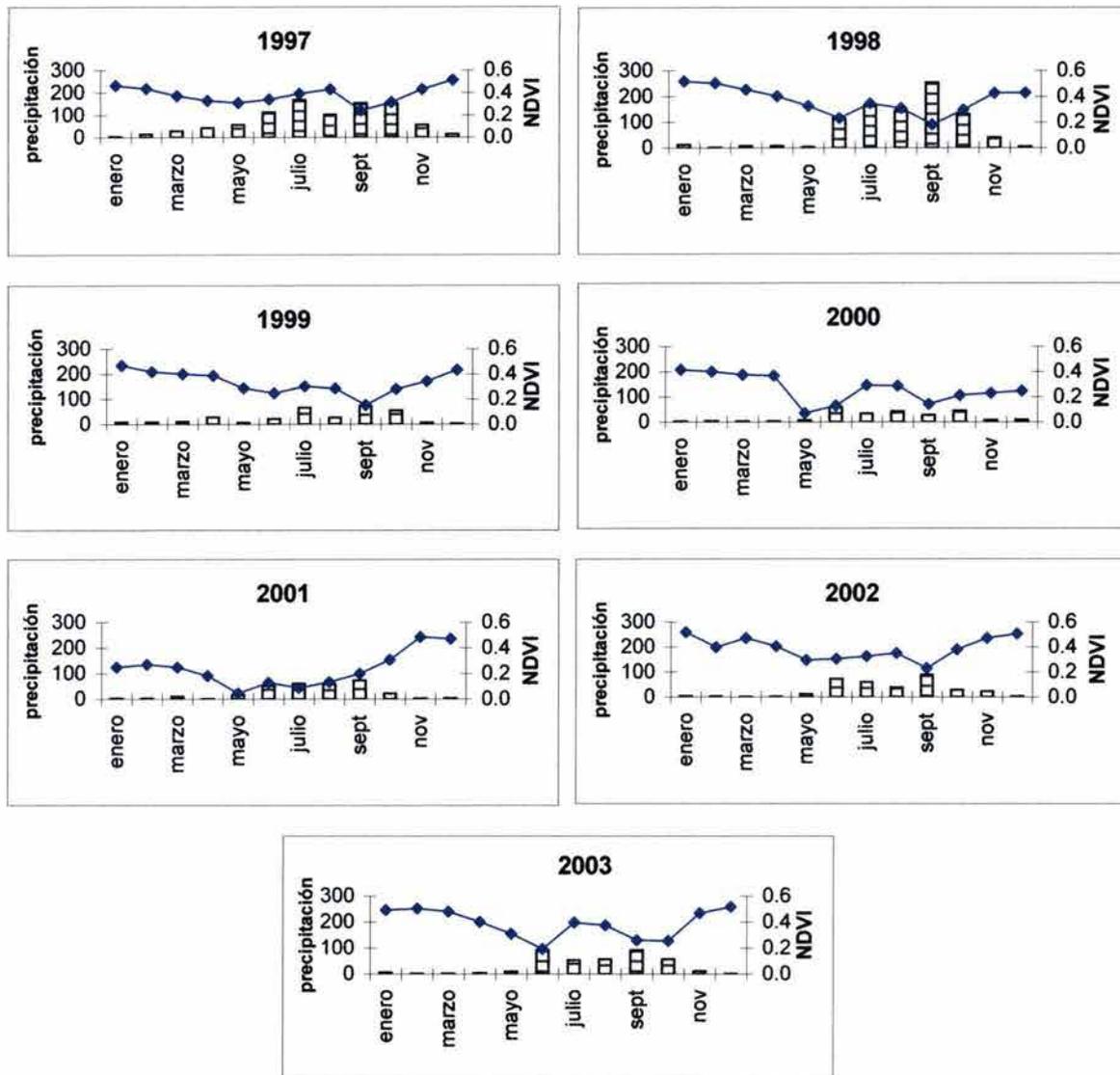


Figura 21a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en los bosques de pino del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados. La línea azul indica los NDVI, mientras que las barras muestran la precipitación registrada.

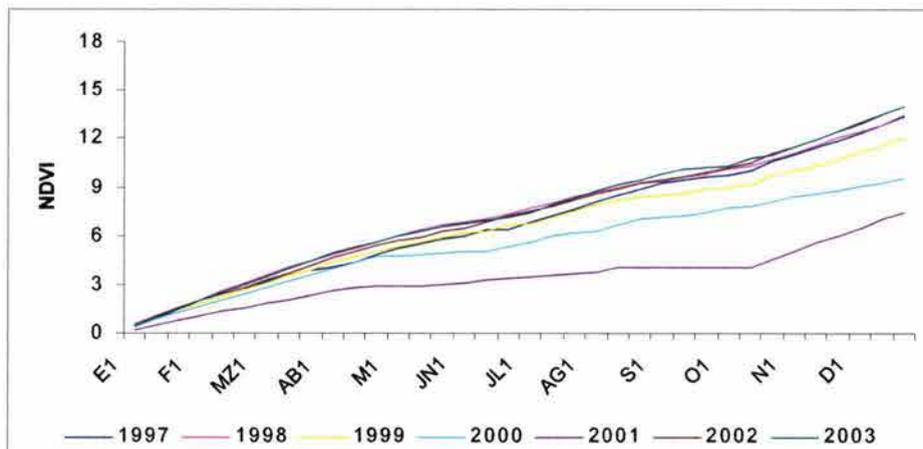


Figura 21b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en los bosques de pino del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados.

La variabilidad de la productividad primaria neta de los bosques de pino se puede evaluar a través de los valores acumulados registrados a lo largo de los siete años. En 1997 el valor máximo fue 13.77 ± 0.60 ; asimismo en 1998 el valor del NDVI acumulado (13.28 ± 0.59) fue similar al de 1997. El valor del NDVI acumulado disminuyó progresivamente en 1999 (12.00 ± 0.53); 2000 (9.51 ± 0.42) y 2001 (7.38 ± 0.29). En contraste en el 2002 el valor acumulado al final 13.95 ± 0.62 , es el mayor de los siete años. Muy cerca de este dato se encuentra el valor máximo acumulado del 2003, 13.93 ± 0.62 . (Figura 21b).

3.4.4 Bosque de Pino-encino

Las diferencias en el comportamiento anual de los valores promedio en los bosques de pino-encino pueden apreciarse en la Figura 22a. En 1997 los bosques de pino-encino registraron el inicio de la época de crecimiento a partir de la segunda decena de junio (0.4166 ± 0.01 y 0.4180 ± 0.01) hasta agosto (0.5166 ± 0.01 ; 0.4142 ± 0.01 ; 0.4839 ± 0.01) y nuevamente se incrementó a partir de la tercera de octubre (0.5463 ± 0.01). Con relación al periodo de menor actividad de crecimiento, esta se presentó de la tercera decena de febrero (0.4381 ± 0.01) hasta finales de mayo (0.3562 ± 0.01 ; 0.2548 ± 0.01 y 0.3413 ± 0.01). En 1998, los valores promedio en enero (0.5328 ± 0.01 ; 0.4514 ± 0.01 y 0.4852 ± 0.01) y febrero (0.4904 ± 0.01 ; 0.4794 ± 0.01 y 0.4658 ± 0.01) demuestran que la época de crecimiento del año anterior se extendió hasta estas fechas, por lo tanto el periodo de senescencia comenzó en marzo (0.3496 ± 0.01 ; 0.3315 ± 0.01 y 0.2671 ± 0.01) y duró hasta la primera decena de junio (0.2261 ± 0.01). En contraste, la época de crecimiento se presentó a partir de la tercera decena de junio (0.3082 ± 0.01) hasta agosto (0.3651 ± 0.01 ; 0.3935 ± 0.01 y 0.3367 ± 0.01) y nuevamente de la segunda decena de septiembre (0.3190 ± 0.01) hasta diciembre (0.4339 ± 0.01 ; 0.4565 ± 0.01 y 0.4353 ± 0.01). De manera similar a 1998, en 1999 el periodo de senescencia se presentó

de la segunda decena de marzo (0.4140 ± 0.02 ; 0.3283 ± 0.02) a la segunda de junio (0.2553 ± 0.02), así la época de crecimiento inició en la tercera decena de junio (0.3638 ± 0.02) hasta la última de agosto (0.2769 ± 0.02) y nuevamente de la segunda decena de octubre (0.2425 ± 0.02) hasta el final del año.

A pesar de que el año 2000 registró valores promedio menores en relación a los siete años estudiados, éstos indican que el periodo de senescencia se presenta desde la tercera decena de febrero (0.3557 ± 0.02) hasta junio (0.1646 ± 0.02 ; 0.0706 ± 0.02 y 0.2908 ± 0.02), mientras que la época de crecimiento inicia a partir de la primera decena de julio (0.3753 ± 0.02) hasta la tercera de agosto (0.3344 ± 0.02), a partir de la cual se da un descenso en los valores promedio. En el 2001, presenta los menores valores promedio en relación a los siete años estudiados, de cualquier manera se puede apreciar que de la segunda decena de julio (0.0578 ± 0.03) hasta noviembre (0.5289 ± 0.03 ; 0.5094 ± 0.03 y 0.4545 ± 0.03) y diciembre (0.5007 ± 0.03 ; 0.5090 ± 0.03 y 0.4421 ± 0.03) se presentó la épocas de crecimiento.

En el 2002 el periodo de crecimiento se presentó de la segunda decena de junio (0.3575 ± 0.01) a la tercera de agosto (0.3495 ± 0.01) y de la segunda de octubre (0.3816 ± 0.01) hasta diciembre (0.4939 ± 0.01 ; 0.4969 0.4939 ± 0.01 y 0.5355 0.4939 ± 0.01), entre tanto la época de senescencia va de la primera decena de abril (0.3976 ± 0.01) a la primera decena de junio (0.2021 ± 0.01). Cabe destacar que en este año los valores registrados a principio y finales de año fueron similar, lo que no es común en los otros años. Finalmente los valores promedio en el 2003 indican que de la primera decena de julio a la tercera de agosto (0.4294 ± 0.02 ; 0.4457 ± 0.02 ; 0.4867 ± 0.02 ; 0.4510 ± 0.02 ; 0.4486 ± 0.02 y 0.3625 ± 0.02) y de la segunda decena de octubre (0.4661 ± 0.02) a la segunda de diciembre (0.5410 ± 0.02) se presentó la época de crecimiento, mientras que el periodo senescente abarcó de la primera decena de abril (0.4164 ± 0.02) a junio (0.1746 ± 0.02 ; 0.2433 ± 0.02 y 0.2236 ± 0.02).

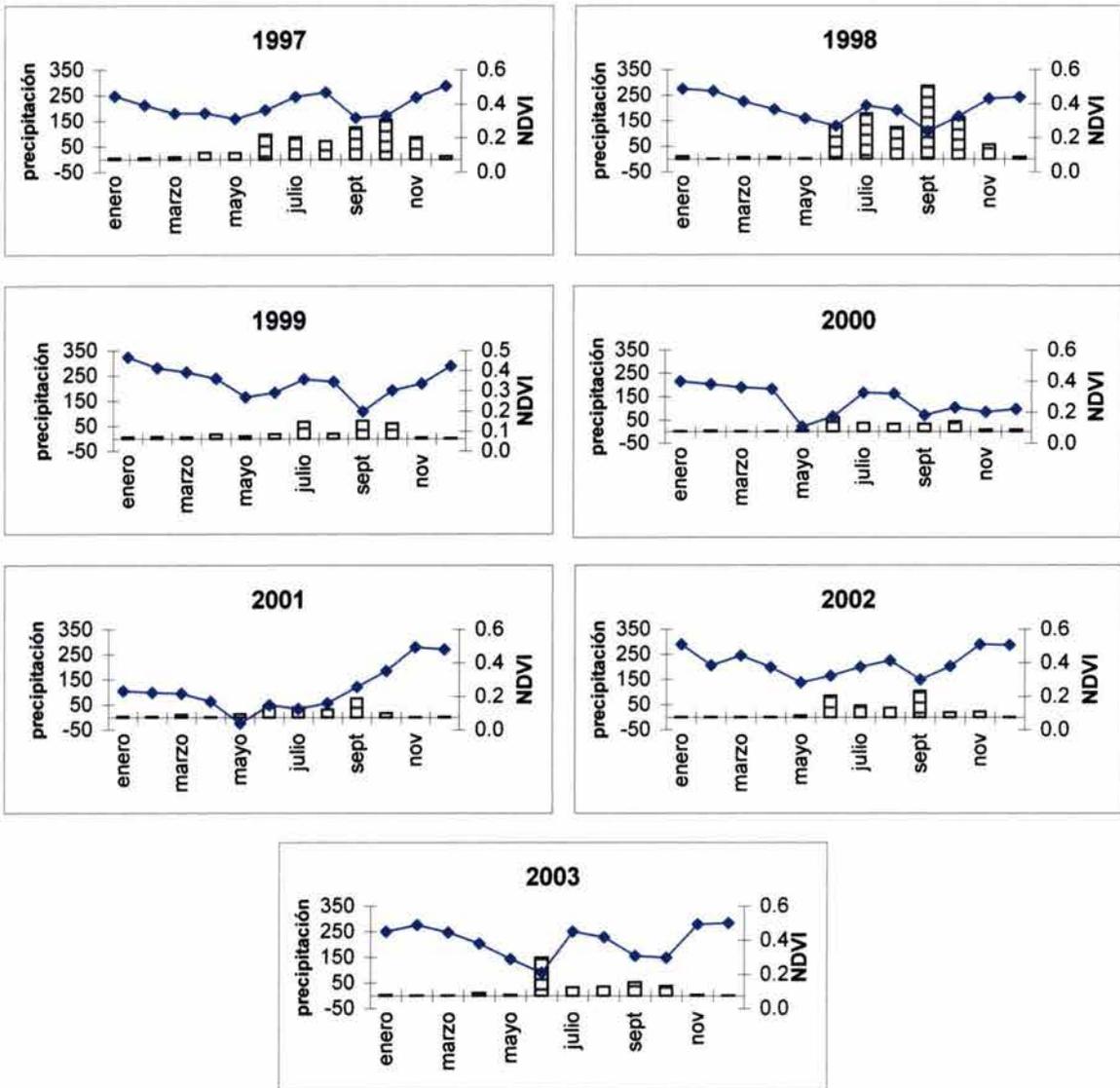


Figura 22a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en los bosques de pino-encino del Estado de Oaxaca estudiados en los siete años. La línea azul representa los NDVI, mientras que las barras indican la precipitación.

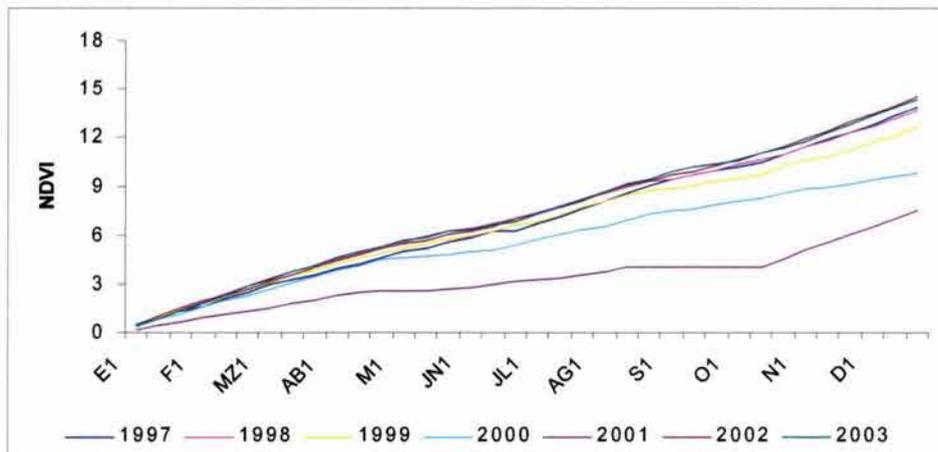


Figura 22b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en los bosques de pino-encino del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados.

Con respecto a los valores acumulados del NDVI, la Figura 22b muestra la variabilidad encontrada en los siete años estudiados. En 1997 el valor más alto fue de 14.28 ± 0.64 ; seguido del de 1998 (13.63 ± 0.62), y 1999 (12.57 ± 0.57). En el 2000 y 2001 el valor máximo acumulado disminuye con respecto al de los años anteriores (9.85 ± 0.46 y 7.47 ± 0.30 , respectivamente). Sin embargo para el 2002 esta condición cambia debido a que los valores promedio aumentan lo que se refleja en los valores acumulados, el máximo alcanzado para este año es de 14.49 ± 0.66 , el mayor con respecto a los siete años. Finalmente en el 2003 se registró un valor acumulado final de 14.31 ± 0.65 .

3.4.5 Bosque de táscate

En la Figura 23a se presentan los patrones estacionales de la productividad primaria. Los bosques de táscate registraron en 1997 el inicio de la época de crecimiento en la segunda y tercera decena de junio (0.4418 ± 0.01 y 0.4129 ± 0.01) y continuó hasta la primera decena de septiembre (0.3437 ± 0.01), así como en la tercera decena de octubre y la primera de noviembre (0.4197 ± 0.01 y 0.4194 ± 0.01). En contraste, la época senescente se presentó de enero (0.2719 ± 0.01 ; 0.2546 ± 0.01 y 0.3011) a la tercera decena de mayo (0.2504 ± 0.01). En 1998 los valores promedio indican que la época de crecimiento ocurrió de julio (0.3660 ± 0.01 ; 0.3879 ± 0.01 y 0.3769 ± 0.01) a agosto (0.4218 ± 0.01 ; 0.4424 ± 0.01 y 0.4011 ± 0.01) y de octubre (0.4013 ± 0.01 ; 0.2464 ± 0.01 y 0.4463 ± 0.01) a noviembre (0.4530 ± 0.01 ; 0.4057 ± 0.01 y 0.3940 ± 0.01), con relación al periodo de senescencia, ésta se presentó principalmente en abril (0.2304 ± 0.01 ; 0.2056 ± 0.01 y 0.2068 ± 0.01), mayo (0.1868 ± 0.01 ; 0.2205 ± 0.01 y 0.2292 ± 0.01) y junio (0.1185 ± 0.01 ; 0.2956 ± 0.01 y 0.2954 ± 0.01). Para 1999 el periodo senescente se registró de la segunda decena de marzo (0.2399 ± 0.01) a la tercera de mayo (0.2801 ± 0.01), mientras que el de crecimiento inicio en la primera decena de junio (0.2865 ± 0.01), siguió en julio (0.4369 ± 0.01 ; 0.4202 ± 0.01 y 0.4252 ± 0.01) y agosto (0.4061 ± 0.01 ; 0.4439 ± 0.01 y

0.3992 ± 0.01) y repuntó de la segunda decena de septiembre (0.3125 ± 0.01) a la primera de noviembre (0.3523 ± 0.01).

De manera similar en el 2000, los valores promedio indican que el periodo de crecimiento inició en la primera decena de junio (0.2916 ± 0.01), y finalizó en agosto (0.4029 ± 0.01 y 0.3147 ± 0.01). La época de senescencia se presentó de la segunda decena de enero (0.2815 ± 0.01) a mayo (0.0255 ± 0.01; 0.0989 ± 0.01 y 0.1928 ± 0.01). A partir de octubre se presenta un descenso en los datos lo que ocasiona que los valores al final del año se encuentren por debajo de los registrados para las mismas fechas en otros años. Para el 2001, el periodo de senescencia se presenta principalmente en mayo (-0.0402 ± 0.02; 0.0181 ± 0.02 y 0.0742 ± 0.02), mientras que el inicio de la época de crecimiento se estableció de la tercera decena de junio (0.3132 ± 0.02), y continuó hasta la primera y segunda de agosto (0.3502 ± 0.02 y 0.3829 ± 0.02), donde disminuyen los valores para luego aumentar alcanzando valores altos en las tres decenas de noviembre (0.4313 ± 0.02; 0.3906 ± 0.02 y 0.3059 ± 0.02).

En el año 2002 los valores promedio indican que la mayor parte de la época de crecimiento se concentró en el mes de julio y la primera decena de agosto (0.3957 ± 0.02; 0.3712 ± 0.02; 0.4351 ± 0.02 y 0.4772 ± 0.02), por otra parte el periodo de senescencia ocurrió de la primera decena de febrero (0.2864 ± 0.02) a la primera decena de junio (0.1901 ± 0.02). Un descenso abrupto en los valores promedio se localiza en la segunda decena de agosto y la segunda de septiembre, aunque finalmente vuelve a aumentar rápidamente. En el 2003 se registraron mayores valores promedio del NDVI en las dos últimas decenas de julio (0.4821 ± 0.01 y 0.4661 ± 0.01) y las dos primeras de agosto (0.4885 ± 0.01 y 0.4229 ± 0.01), lo que indica el periodo de mayor crecimiento; mientras que la época más crítica se presentó en las tres decenas de mayo (0.1687 ± 0.01; 0.2159 ± 0.01 y 0.1996 ± 0.01).

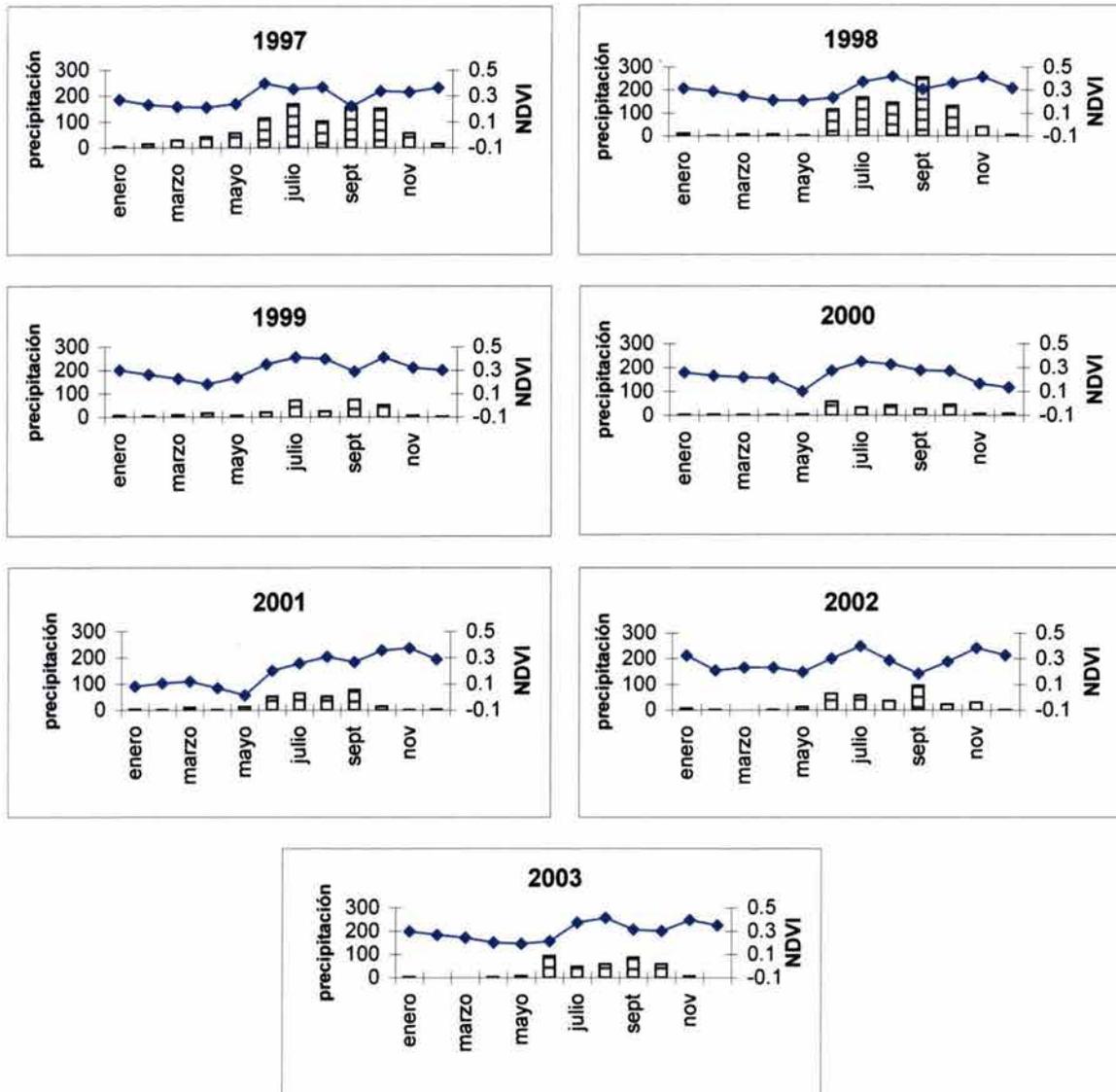


Figura 23a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en los bosques de táscate del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados. La línea azul representan los NDVI, las barras muestran la precipitación.

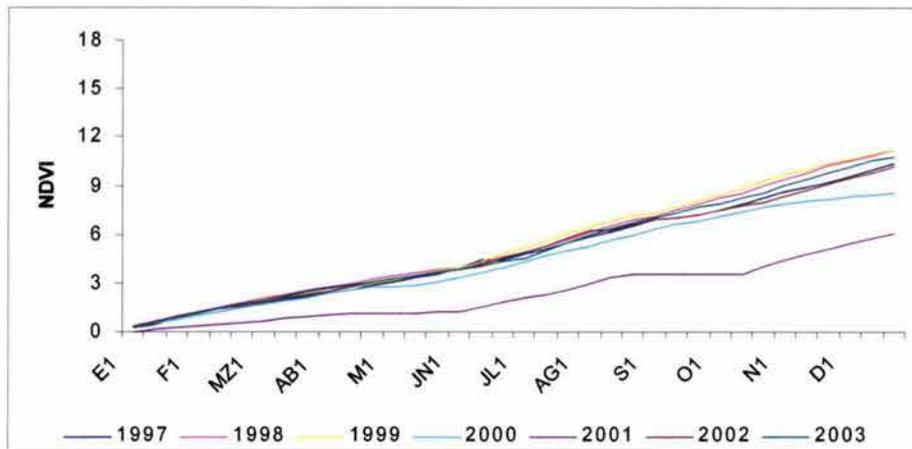


Figura 23b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en los bosques de táscate del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados.

Los valores acumulados del NDVI en los bosques de táscate presentan diferencias a lo largo de los siete años (Figura 23b). En 1997 el valor acumulado final es de 10.80 ± 0.51 . En 1998 este valor crece, llegando a 11.22 ± 0.54 ; en 1999 existió un aumento con respecto a los años anteriores (11.26 ± 0.56). El valor acumulado final del año 2000 presenta un descenso con respecto al de los años anteriores, 8.61 ± 0.44 . Asimismo en el 2001 se presenta el menor valor acumulado de los siete años estudiados 6.02 ± 0.29 . Sin embargo esta condición cambia en el 2002 donde el valor total es de 10.18 ± 0.49 . En el último año estudiado, 2003, el valor acumulado total es de 10.83 ± 0.52 .

3.4.6 Bosque mesófilo

La Figura 24a muestra la variabilidad en los patrones estacionales de la productividad primaria a lo largo del periodo estudiado. Los bosques mesófilos en 1997 registraron valores promedio mayores en enero (0.5309 ± 0.02 ; 0.4732 ± 0.02 y 0.5275 ± 0.02), la segunda decena de febrero y la primera de marzo (0.5567 ± 0.02 y 0.5195 ± 0.02), lo que nos indica que la época de crecimiento del año anterior se prolongó hasta el primer trimestres de éste año. Desde la segunda decena de marzo (0.2825 ± 0.02) se presenta la época senescente que sigue hasta la primera decena de junio (0.2855 ± 0.02), una vez pasada esta fecha se empieza un ligero incremento en los valores lo que indica el inicio de la época de crecimiento la cual dura hasta la primera decena de septiembre (0.4058 ± 0.02) y vuelve a presentarse de la tercera decena de octubre (0.5990 ± 0.02) hasta el final del año.

En 1998 la época de crecimiento del año anterior se extendió hasta enero (0.5886 ± 0.02 ; 0.4804 ± 0.02 y 0.5275 ± 0.02). Cabe señalar que no existió una clara época de crecimiento sin embargo se podría considerar que ocurrió entre la tercera decena de junio (0.2853 ± 0.02) y continuó hasta la tercera de agosto (0.2755 ± 0.02); vale la pena resaltar que los valores del NDVI repuntaron en la primera decena de noviembre (0.3518 ± 0.02).

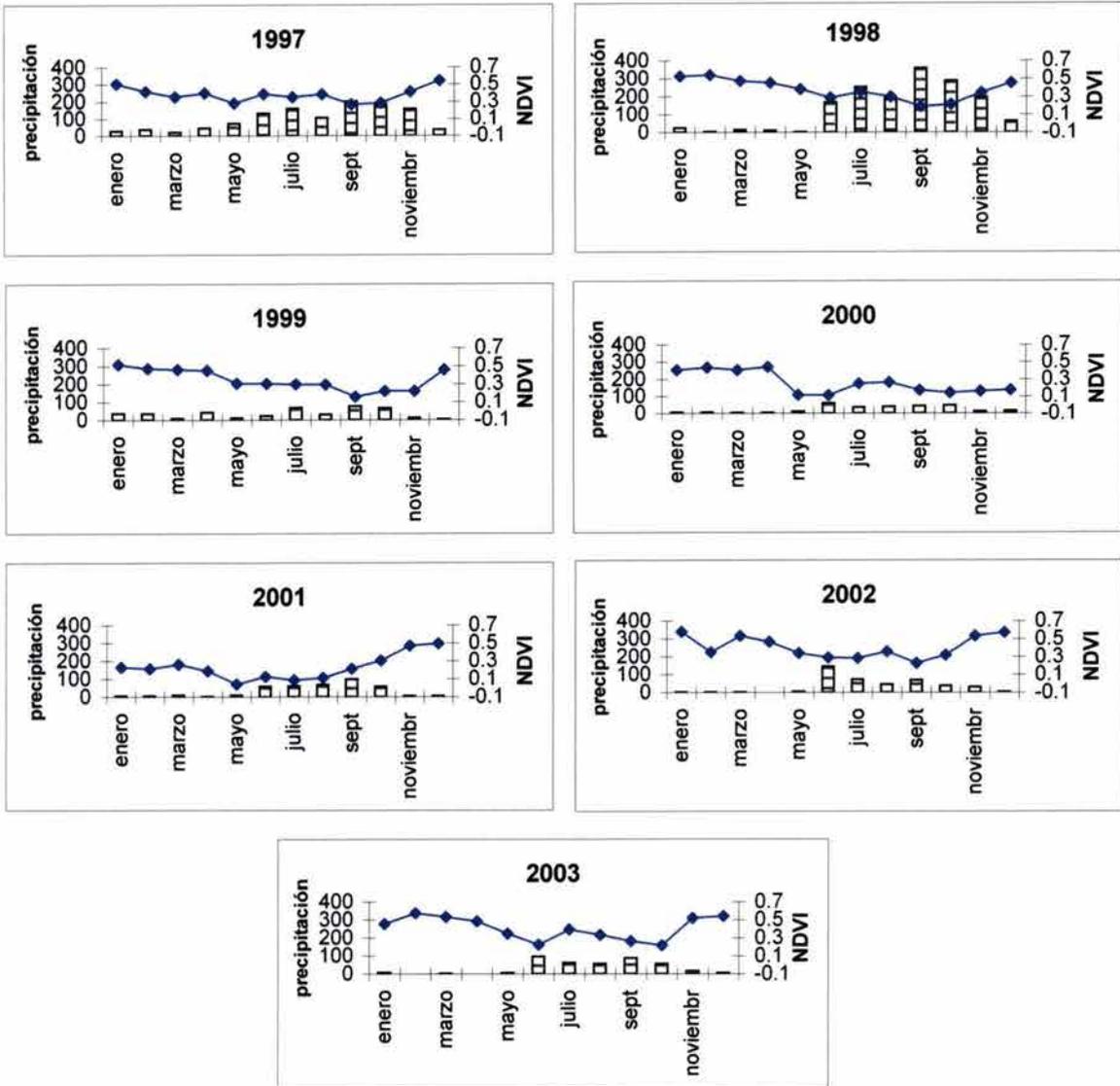


Figura 24a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en los bosques mesófilos del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados. La línea azul representa los NDVI, mientras que las barras indican la precipitación.

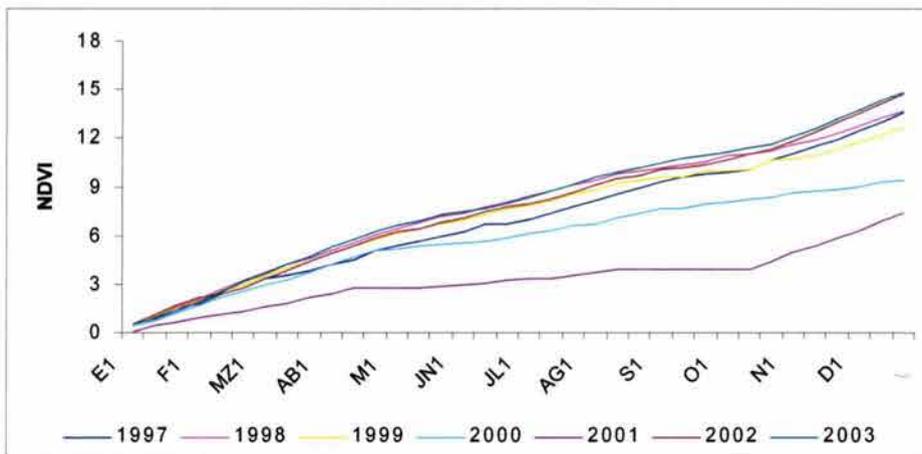


Figura 24b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en los bosques mesófilos del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados.

En 1999 existió un marcado descenso de los valores del NDVI de enero a la primera decena de julio; a partir de la segunda decena de julio (0.3068 ± 0.02) podemos apreciar un incremento en los valores promedio lo que indicaría el inicio de la época de crecimiento, la cual se extiende hasta la tercera decena de agosto (0.2530 ± 0.02) y nuevamente a partir de la tercera decena de octubre (0.4961 ± 0.02) hasta diciembre.

En el año 2000, la época de crecimiento se observa a partir de julio (0.2950 ± 0.02) hasta la primera decena de septiembre (0.2537 ± 0.02). Para 2001 los valores reportados en mayo (-0.0012 ± 0.03 ; 0.0530 ± 0.03 y 0.0949 ± 0.03) y julio (0.0692 ± 0.03 ; 0.0346 ± 0.03 y 0.1766 ± 0.03) nos indican que la época senescente se concentró entre estos meses, asimismo la época de crecimiento se presentó a partir de la tercera decena de octubre (0.5329 ± 0.03) hasta diciembre (0.4822 ± 0.03 ; 0.5567 ± 0.03 y 0.4616 ± 0.03). En este año encontramos los valores promedio más bajos con relación a los siete años estudiados, sin embargo a partir de noviembre los valores vuelven a encontrarse dentro del rango de los demás años, lo que no sucede en el 2000.

En el año 2002 de la segunda y tercera decena de mayo (0.2215 ± 0.02 y 0.3971 ± 0.02) y hasta junio (0.3063 ± 0.02) se presenta el periodo de senescencia. Asimismo, los datos del NDVI nos indican que a partir de la primera decena de julio (0.2537 ± 0.02) comenzó la época de crecimiento, la cual se continuó hasta la primera decena de septiembre (0.3505 ± 0.02), con un repunte a partir de la primera decena de octubre (0.3033 ± 0.02) hasta las tres decenas de noviembre y diciembre (0.4622 ± 0.02 ; 0.5854 ± 0.02 ; 0.5656 ± 0.02 ; 0.5457 ± 0.02 ; 0.5719 ± 0.02 y 0.6131 ± 0.02 , respectivamente). Es importante resaltar que en febrero se presenta un descenso en los valores mucho mayor al de los otros años, sin embargo en agosto el mayor pico se presenta precisamente en el 2002. Para 2003 el inicio de la época de crecimiento también podría fijarse a partir de la primera decena de julio (0.3982 ± 0.02) y se continúa con valores mucho más altos hasta noviembre y diciembre (0.4497 ± 0.02 ; 0.5339 ± 0.02 ; 0.5868 ± 0.02 ; 0.5235 ± 0.02 ;

0.6094 ± 0.02 y 0.5062 ± 0.02, respectivamente). Con relación a la época de senescencia, va de mayo (0.4587 ± 0.02) a junio (0.2047 ± 0.02; 0.2485 ± 0.02 y 0.2325 ± 0.02).

Los bosques mesófilos presentan valores acumulados del NDVI, como estimación de la productividad primaria neta, en 1997 de 13.98 ± 0.61, en 1998 (13.69 ± 0.62), en 1999 (12.72 ± 0.57), en el 2000 (9.44 ± 43) y 2001 (7.40 ± 0.29). Sin embargo en el 2002 observamos un aumento 14.72 ± 0.65. Lo mismo en el 2003 año en el que se presenta el mayo valor acumulado 14.85 ± 67. (Figura 24b).

3.4.7 Chaparral

En el chaparral en 1997 la época de crecimiento va de junio (0.3912 ± 0.01; 0.4334 ± 0.01 y 0.3939 ± 0.01) hasta la tercera decena de agosto (0.3985 ± 0.01 y 0.4240 ± 0.01), así como de la tercera decena de octubre (0.4254 ± 0.01) al final del año. Los valores registrados a partir de la tercera decena de abril (0.3988 ± 0.01) hasta la tercera decena de mayo (0.1711 ± 0.01) nos indican el periodo de menor crecimiento. En 1998 el periodo de senescencia se puede considerar desde marzo (0.2910 ± 0.01; 0.2626 ± 0.01 y 0.2603 ± 0.01) hasta junio (0.1015 ± 0.01; 0.2452 ± 0.01 y 0.2469 ± 0.01), mientras que el periodo de crecimiento se concentra en los meses de julio (0.2654 ± 0.01; 0.2777 ± 0.02 y 0.2716 ± 0.02); agosto (0.3834 ± 0.01; 0.3866 ± 0.01 y 0.3802 ± 0.01) y noviembre (0.4554 ± 0.01; 0.4053 ± 0.01 y 0.4308 ± 0.01). Diferente a lo encontrado el año anterior, para 1999 la época de senescencia comienza a partir de la tercera decena de febrero (0.3030 ± 0.01) y se extiende hasta la primera decena de mayo (0.2090 ± 0.01), el valor de la segunda decena de mayo (0.3586 ± 0.01) nos indica el inicio de la época de crecimiento la cual tiene una auge de la segunda decena de junio a la segunda de julio (0.3592 ± 0.01; 0.4145 ± 0.01, 0.3748 ± 0.01 y 0.4083).

Teniendo en cuenta lo bajo de los valores, con respecto a los demás años, en el 2000 la época de crecimiento se presenta en la tercera decena de junio (0.3189 ± 0.01)

hasta la tercera de agosto (0.3561 ± 0.01), los valores de mayo (0.0817 ± 0.01 ; 0.1780 ± 0.01 y 0.1368 ± 0.01) nos indican que la época de senescencia se presentó marcadamente en ésta fecha y continuó hasta la segunda decena de junio (0.2223 ± 0.01). Para el 2001, se puede observar que la época de senescencia se presentó a partir de la tercera decena de abril (-0.0113 ± 0.02), abarca todo mayo (-0.0197 ± 0.02 ; 0.0369 ± 0.02 y 0.1414 ± 0.02) hasta la segunda decena de junio (0.2108 ± 0.02), el valor de la primera decena de julio (0.2949 ± 0.02) sugieren el inicio de la época de crecimiento la cual se prolongó hasta noviembre (0.3981 ± 0.02 ; 0.4186 ± 0.02 y 0.3542 ± 0.02). De manera similar en el 2002 el periodo de senescencia se encuentra marcado a partir de la tercera decena de abril (0.2838 ± 0.01) y dura hasta la última de junio (0.2234 ± 0.01). Sin embargo en este año existe una reducida época de crecimiento a partir de julio (0.3107 ± 0.01) que va incrementando ligeramente hasta diciembre (0.3638 ± 0.01 ; 0.3319 ± 0.01 y 0.3612 ± 0.01). Los valores promedio en el 2003 siguen la tendencia de 1997, 1998 y 1999, empezando su época de crecimiento en la segunda decena de julio a la segunda de agosto (0.4378 ± 0.01 ; 0.4067 ± 0.01 ; 0.4201 ± 0.01 y 0.3578 ± 0.01) y repuntando en noviembre (0.3384 ± 0.01 ; 0.4234 ± 0.01 y 0.3627 ± 0.01).

La relación entre años del comportamiento anual de los valores promedio se ejemplifica en la Figura 25a.

Con respecto a la estimación de la productividad primaria neta y su variabilidad a lo largo de los siete años estudiados, se observa que el chaparral presenta en 1997 un valor de 11.59 ± 0.54 , mientras que en 1998 el valor total decrece alcanzando únicamente 11.02 ± 0.51 . En 1999 se presenta el valor más alto de los valores del NDVI registrados para el chaparral, 11.82 ± 0.57 . Sin embargo en el 2000 vuelve a disminuir registrando un valor de 9.45 ± 0.46 . Asimismo en el 2001 se registra el menor valor, 6.62 ± 0.30 . Ya en el 2002 se registra un aumento alcanzando un total de 10.95 ± 0.51 . Finalmente, el 2003 registra un valor de 10.75 ± 0.51 . (Figura 25b).

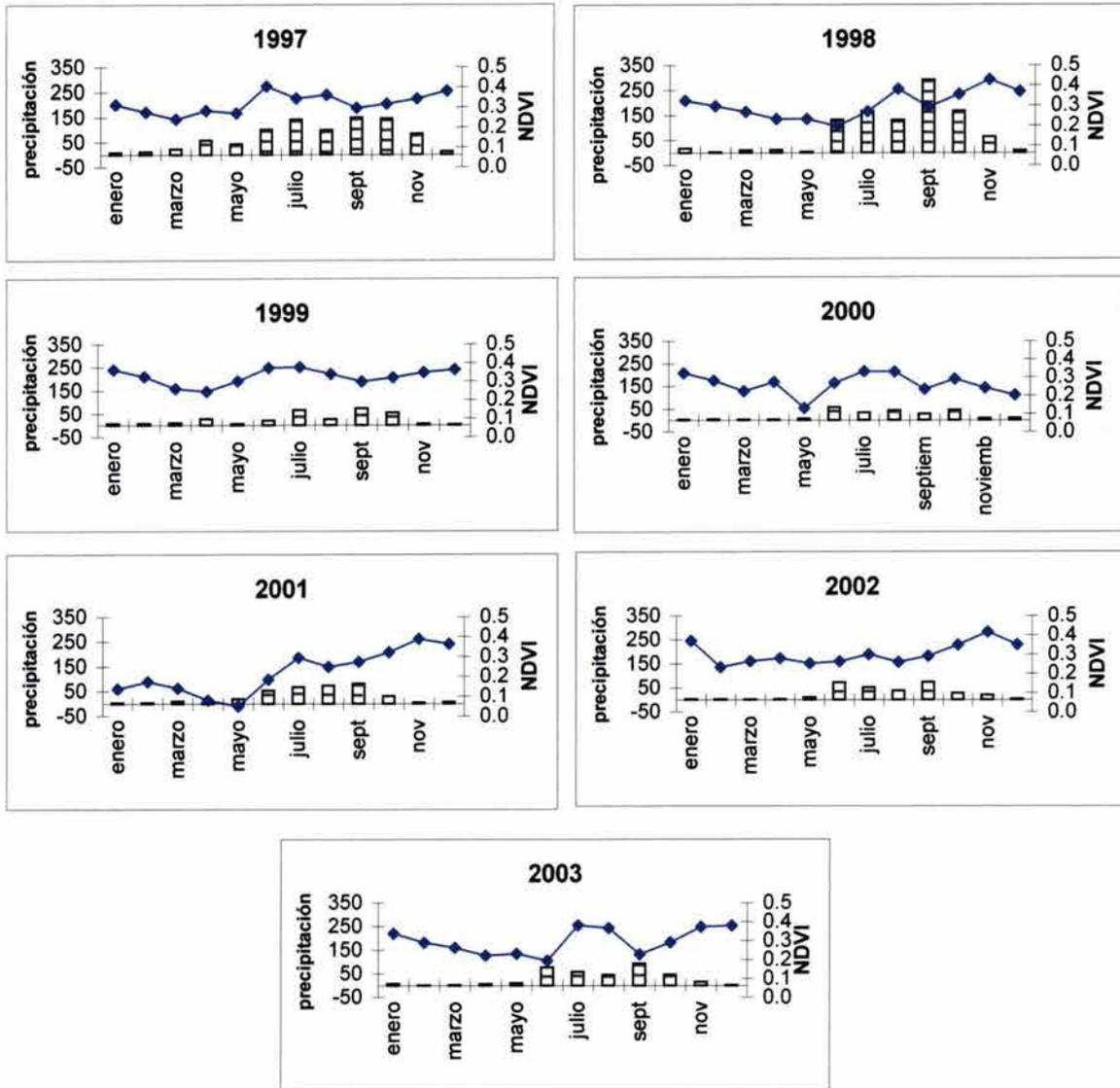


Figura 25a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en los chaparrales del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados. La línea azul representa los NDVI, mientras que las barras muestran la precipitación.

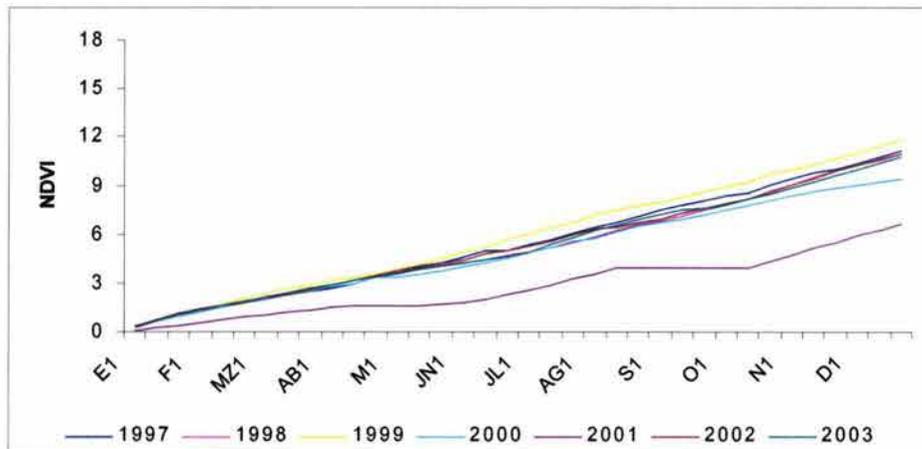


Figura 25b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en los chaparrales del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados.

3.4.8 Matorral

Las diferencias en los patrones estacionales del matorral a lo largo del periodo estudiado se pueden observar en la Figura 26a. Analizando los datos del NDVI de los siete años podemos observar que los matorrales son marcadamente estacionales; por ejemplo durante los siete años, la senescencia se presentó de enero a la primera decena de junio. Sin embargo cabe señalar que en dicho periodo existió una marcada diferencia entre años en los valores del NDVI; es así que los menores valores del NDVI ocurrieron en 2001, 2002 y 2003 con respecto a los otros años.

De manera similar las épocas de crecimiento ocurrieron de junio a diciembre, pero la forma de las curvas de crecimiento fue diferente entre los siete años. Por ejemplo, en 1997 a partir de la segunda decena de mayo se da inicio al periodo de crecimiento el cuál se extiende hasta la segunda y tercera decena de octubre (0.3550 ± 0.01 y 0.3613 ± 0.01). En 1998 los valores nos indican que la época de crecimiento del matorral se extendió desde julio hasta noviembre (0.4373 ± 0.02 ; 0.4002 ± 0.02 y 0.3624 ± 0.02); mientras que en 1999 el inicio del periodo de crecimiento alcanza su máximo en agosto (0.4063 ± 0.02 ; 0.3714 ± 0.02 y 0.3894 ± 0.02), la segunda y tercera decena de septiembre (0.3701 ± 0.02 y 0.4117 ± 0.02) y octubre (0.3698 ± 0.02 ; 0.3746 ± 0.02 y 0.4394 ± 0.02). Los matorrales en el 2000 inician la época de crecimiento a partir de junio, la cuál se extiende hasta la segunda decena de octubre (0.2740 ± 0.02) donde nuevamente los valores empiezan a decrecer; cabe señalar que los valores del último trimestre del año son los menores con relación a los demás años estudiados.

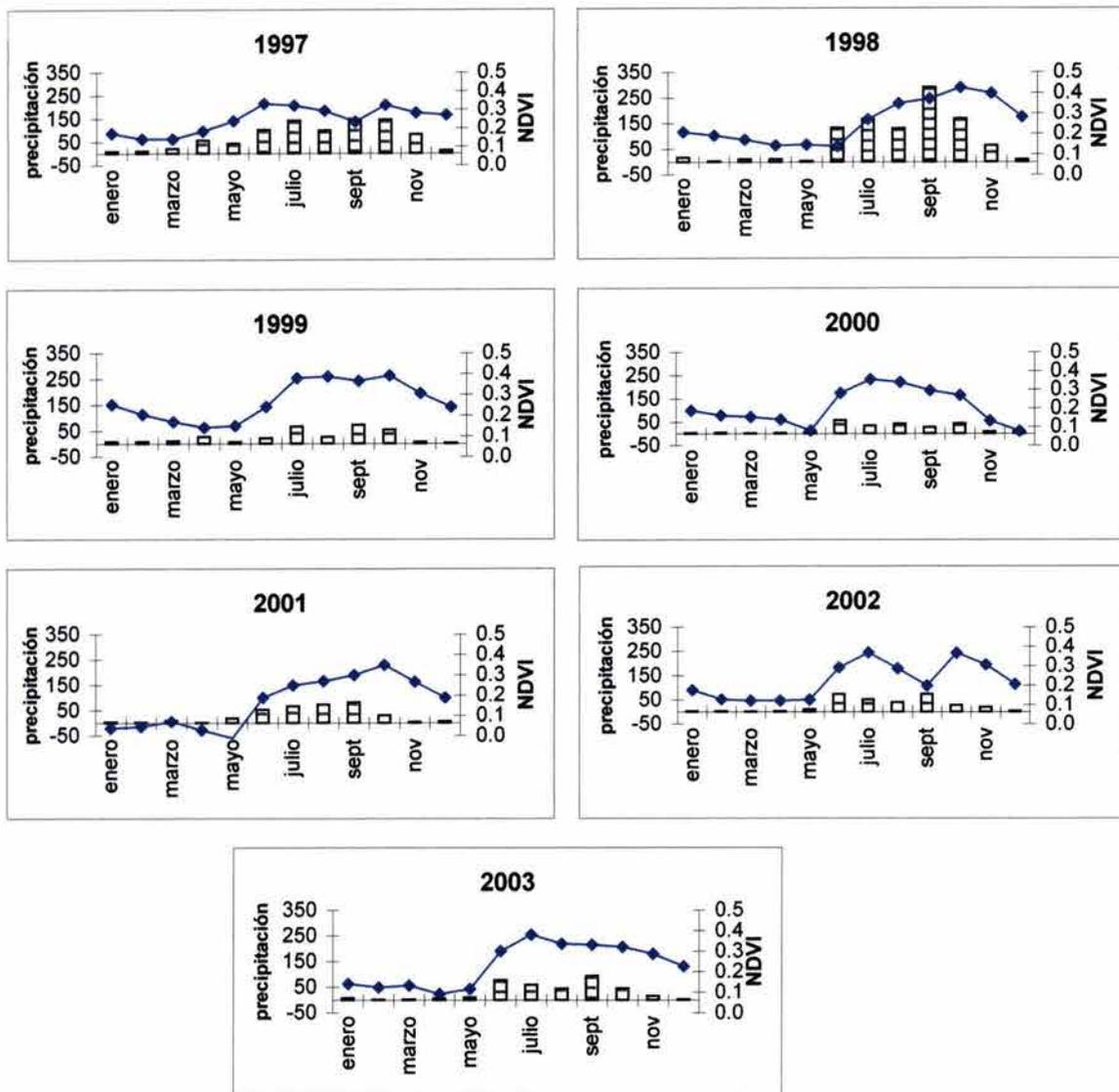


Figura 26a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en los matorrales del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados. La línea azul indica los NDVI, mientras que los barras muestran la precipitación.

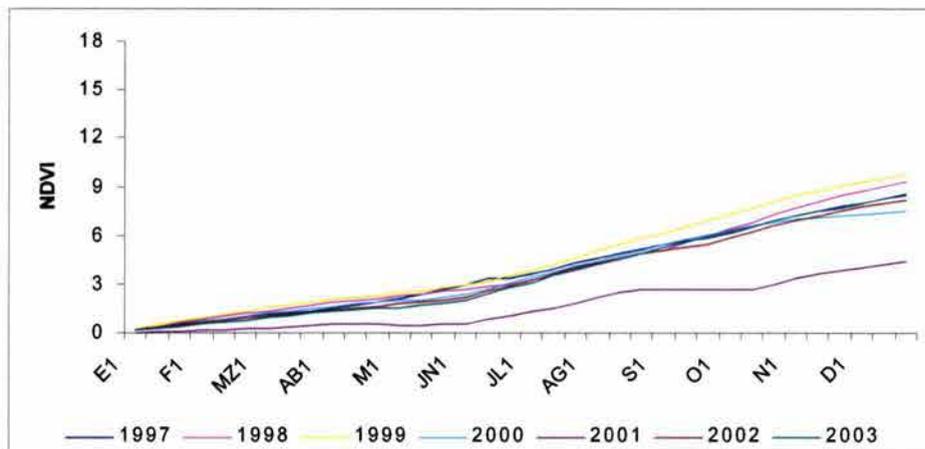


Figura 26b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en los matorrales del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados.

Para 2001 pasando la segunda decena de junio (0.2254 ± 0.02) los valores empiezan a crecer rápidamente lo que sugiere el inicio de la época de crecimiento hasta las dos primeras decenas de noviembre (0.3235 ± 0.02 y 0.2684 ± 0.02). Aquí el efecto es contrario al del año anterior ya que mientras a principio de año se registran los menores valores de los siete años estudiados, a partir del segundo semestre estos crecen, alcanzando valores similares a los reportados para las mismas fechas en los demás años.

En el 2002, el inicio de la actividad vegetal y por lo tanto de la épocas de crecimiento se puede fijar a partir de junio (0.1746 ± 0.02 ; 0.3564 ± 0.02 y 0.3496 ± 0.02) y continúa hasta octubre (0.4047 ± 0.02 ; 0.3691 ± 0.02 y 0.3334 ± 0.02), donde nuevamente empiezan a descender los valores. Finalmente, en el 2003, una vez iniciado junio los valores empiezan a denotar el inicio de la época de crecimiento la cuál alcanza su máximo en la segunda y tercera decena de julio (0.4337 ± 0.02 y 0.3917 ± 0.02), y se extiende hasta la primeras decena de noviembre (0.3181 ± 0.02).

Los cambios en los valores acumulados del NDVI, presentan una correspondencia con aquellas fechas donde el valor promedio fue mayor, Figura 26b. Los matorrales en 1997 presentan un valor acumulado total de 8.88 ± 0.44 . En 1998 el valor que se registró fue mayor al del año anterior, 9.34 ± 0.46 . De manera similar en 1999 se registró un aumento con respecto al de los años anteriores, llegando a 9.70 ± 0.50 . No sucede así en el 2000, año en el que el valor es de 7.48 ± 0.41 . Asimismo, en el 2001, el valor acumulado vuelve a decrecer alcanzando un máximo de 4.40 ± 0.23 . Sin embargo hacia el 2002 vuelve a crecer, 8.16 ± 0.43 . Finalmente en el 2003 el valor es de 8.44 ± 0.45 .

3.4.9 Selva alta y mediana perenne

Las selvas altas y medianas perennes por su misma condición de siempre verdes presentan a lo largo de casi todo el año valores promedio de NDVI similares, lo que esta indicando una constante productividad primaria neta, Figura 27a. Es importante señalar

que este tipo de vegetación fue la que mayores valores del NDVI presentó durante los siete años. De cualquier manera encontramos que en 1997, los valores del NDVI comienzan a aumentar hasta que durante la segunda decena de junio se alcanza el mayor valor promedio (0.6028 ± 0.02), la época de crecimiento continua hasta la tercera decena de agosto, a partir de esta fecha los valores son altos pero presentan mucha oscilación. Por otro lado en 1998, los valores nos muestran que la época de crecimiento se extendió hasta enero y febrero (0.5897 ± 0.02 ; 0.4306 ± 0.02 ; 0.4942 ± 0.02 ; 0.5532 ± 0.02 ; 0.5289 ± 0.02 y 0.5288 ± 0.02 , respectivamente), además existe un incremento del NDVI de julio a la primera decena de octubre (0.4768 ± 0.02 a 0.4314 ± 0.02), con un repunte en noviembre (0.3862 ± 0.02 ; 0.3348 ± 0.02 y 0.2928 ± 0.02) y diciembre (0.4964 ± 0.02 ; 0.4401 ± 0.02 y 0.3684 ± 0.02). De manera similar al año anterior, en 1999 los NDVI se mantienen casi constantes hasta la primera decena de septiembre (0.4008 ± 0.02) y después de algunas oscilaciones vuelve a repuntar en la segunda decena de noviembre (0.3078 ± 0.02) y diciembre (0.4875 ± 0.02 ; 0.4422 ± 0.02 y 0.4917 ± 0.02). Una vez más en el 2000, los valores en enero (0.4515 ± 0.02 ; 0.3431 ± 0.02 y 0.4265 ± 0.02), y febrero (0.4524 ± 0.02 ; 0.5341 ± 0.02 y 0.3559 ± 0.02) indican que la época de crecimiento se extendió hasta el primer trimestre del año. A pesar de encontrarse en éste año los menores valores promedio en relación a los siete años estudiados, la época de crecimiento se puede delimitar de la tercera decena de junio a septiembre (0.4135 ± 0.02 ; 0.3931 ± 0.02), ya que los valores registrados en noviembre (0.2675 ± 0.02 ; 0.1717 ± 0.02 y 0.0450 ± 0.02) y diciembre (0.1440 ± 0.02 ; 0.1903 ± 0.02 y 0.1118 ± 0.02) van decreciendo. De hecho los valores registrados en el último trimestre del año son los menores con respecto a los demás años. Para 2001 encontramos el inicio de la época de crecimiento en junio, alcanzando su máxima expresión en la tercera decena de julio (0.3488 ± 0.02), después de un descenso en los valores hay un repunte en noviembre (0.4510 ± 0.03 ; 0.4675 ± 0.03 y 0.5556 ± 0.03) y diciembre (0.4853 ± 0.03 ; 0.5305 ± 0.03 y

0.5445 ± 0.03). Con relación a la época de senescencia, ésta se puede fijar a partir de febrero, alcanzando su punto más crítico en la tercera decena de abril (0.0531 ± 0.03) y durante mayo (0.0198 ± 0.03; 0.1933 ± 0.03 y 0.1834 ± 0.03).

Asimismo en 2002 la época de menor actividad se inició en marzo (0.5731 ± 0.01; 0.5186 ± 0.01 y 0.5492 ± 0.01) y continuó hasta mayo (0.4510 ± 0.01; 0.3654 ± 0.01 y 0.4486 ± 0.01), los valores a partir de la segunda decena de junio indican que la época de crecimiento se extendió de esta fecha hasta finales del año, con un descenso en septiembre y octubre (0.5505 ± 0.01; 0.6243 ± 0.01). Muy similar a los años anteriores en el 2003 el periodo de senescencia se inició en la última decena de marzo y se extendió hasta junio (0.4571 ± 0.02; 0.3504 ± 0.02, respectivamente); los valores promedio en julio (0.5182 ± 0.02; 0.4810 ± 0.02 y 0.4741 ± 0.02) sugieren el inicio de la época de crecimiento que dura hasta principios de septiembre y repunta en noviembre alcanzando su máxima expresión en diciembre (0.5585 ± 0.02; 0.6169 ± 0.02 y 0.5370 ± 0.02).

Con respecto a los valores acumulados, las selvas altas y medianas perennes también presentan los mayores datos con relación a los demás tipos de vegetación, esto debido, como ya se ha mencionado, a que los datos promedio mantienen valores muy altos de manera constante, sin embargo entre los siete años estudiados también se puede apreciar una clara variabilidad en los valores acumulados del NDVI Figura 27b. Por ejemplo en 1997 encontramos que el valor acumulado total es de 16.95 ± 0.79, para 1998 este valor disminuye (15.07 ± 0.72). En 1999 el valor del NDVI a lo largo del año es mayor con respecto al año anterior (15.85 ± 0.76). Un comportamiento contrario se encuentra en el 2000, el valor acumulado del NDVI disminuye (11.48 ± 0.57); en el 2001 encontramos el menor valor acumulado con respecto a los siete años estudiados (8.61 ± 0.37). Para 2002 se percibe un incremento en los valores promedio que se refleja en los valores acumulados, registrando como total un valor de 17.47 ± 0.43. Finalmente en el 2003 el valor total es de 16.96 ± 0.81.

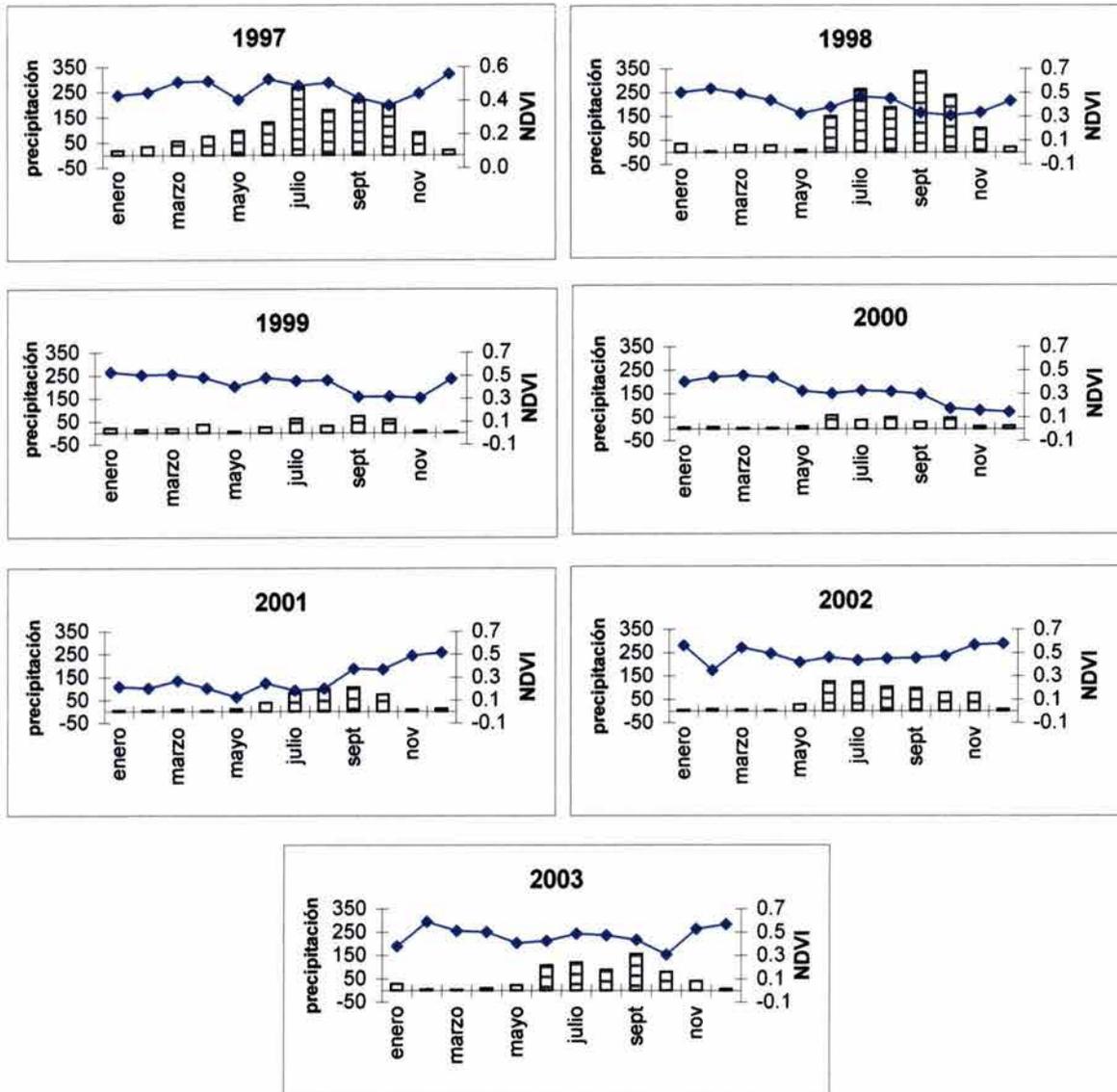


Figura 27a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en las selvas altas y medianas perennes del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados. La línea azul representa a los NDVI, las barras indican la precipitación.

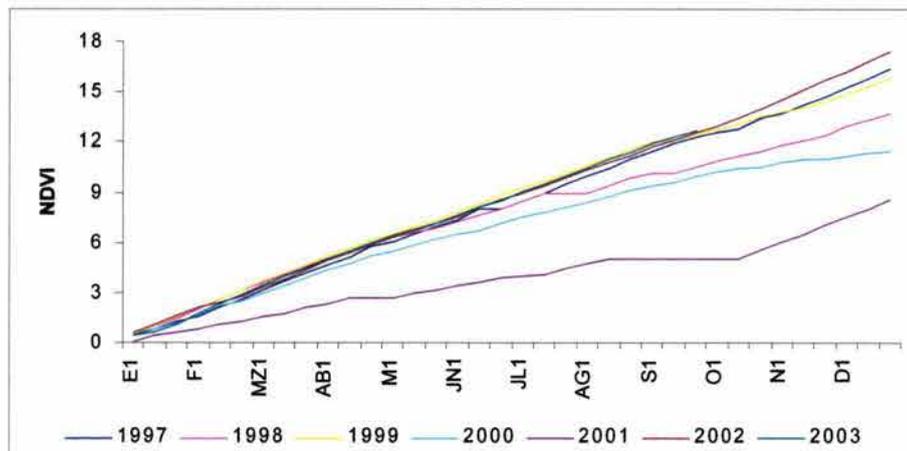


Figura 27b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en las selvas altas y medianas perennes del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados.

3.4.10 Selva alta y mediana subperenne

Las Figura 28a presenta las diferencias entre los patrones estacionales de productividad primaria de los siete años estudiados. En 1997 los valores de marzo a la primera decena de junio (0.4575 ± 0.02 ; 0.2295 ± 0.02), sugieren el periodo de senescencia, de manera similar los valores promedio en las tres decenas de agosto (0.6182 ± 0.02 ; 0.5977 ± 0.02 ; 0.6065 ± 0.02) indican el periodo máximo de crecimiento, por lo que se puede asumir que dicho periodo abarca de la segunda decena de junio hasta la segunda decena de septiembre (0.3906 ± 0.02 y 0.3505 ± 0.02), sin embargo se observa un repunte en la segunda decena de octubre que se intensifica hasta diciembre (0.5569 ± 0.02 ; 0.5521 ± 0.02 y 0.5595 ± 0.02 , respectivamente). En 1998 los valores promedio indican que la época de crecimiento siguió hasta enero y las dos primeras decenas de febrero (0.5852 ± 0.02 ; 0.5071 ± 0.02 ; 0.5272 ± 0.02 ; 0.4876 ± 0.02 y 0.5035 ± 0.02); de tal manera, la época de senescencia abarcó de marzo a la primera decena de junio (0.4808 ± 0.02 y 0.1583 ± 0.02 , respectivamente) y la época de crecimiento se concentró de la segunda decena de junio a diciembre (0.3070 ± 0.02 y 0.5155 ± 0.02). De manera similar en 1999 el periodo de crecimiento se extendió hasta enero (0.5239 ± 0.02 ; 0.5248 ± 0.02 y 0.5063 ± 0.02). La disminución paulatina de los valores a partir de febrero y hasta la segunda decena de junio (0.4346 ± 0.02 y 0.1667 ± 0.02), nos indica el periodo senescente, una vez pasada esa fecha los valores comienzan a aumentar por lo que se puede asumir que a partir de la tercera decena de junio (0.4348 ± 0.02) y hasta la primera de septiembre (0.2226 ± 0.02) se concentra el periodo de crecimiento, con una segunda etapa en octubre y diciembre.

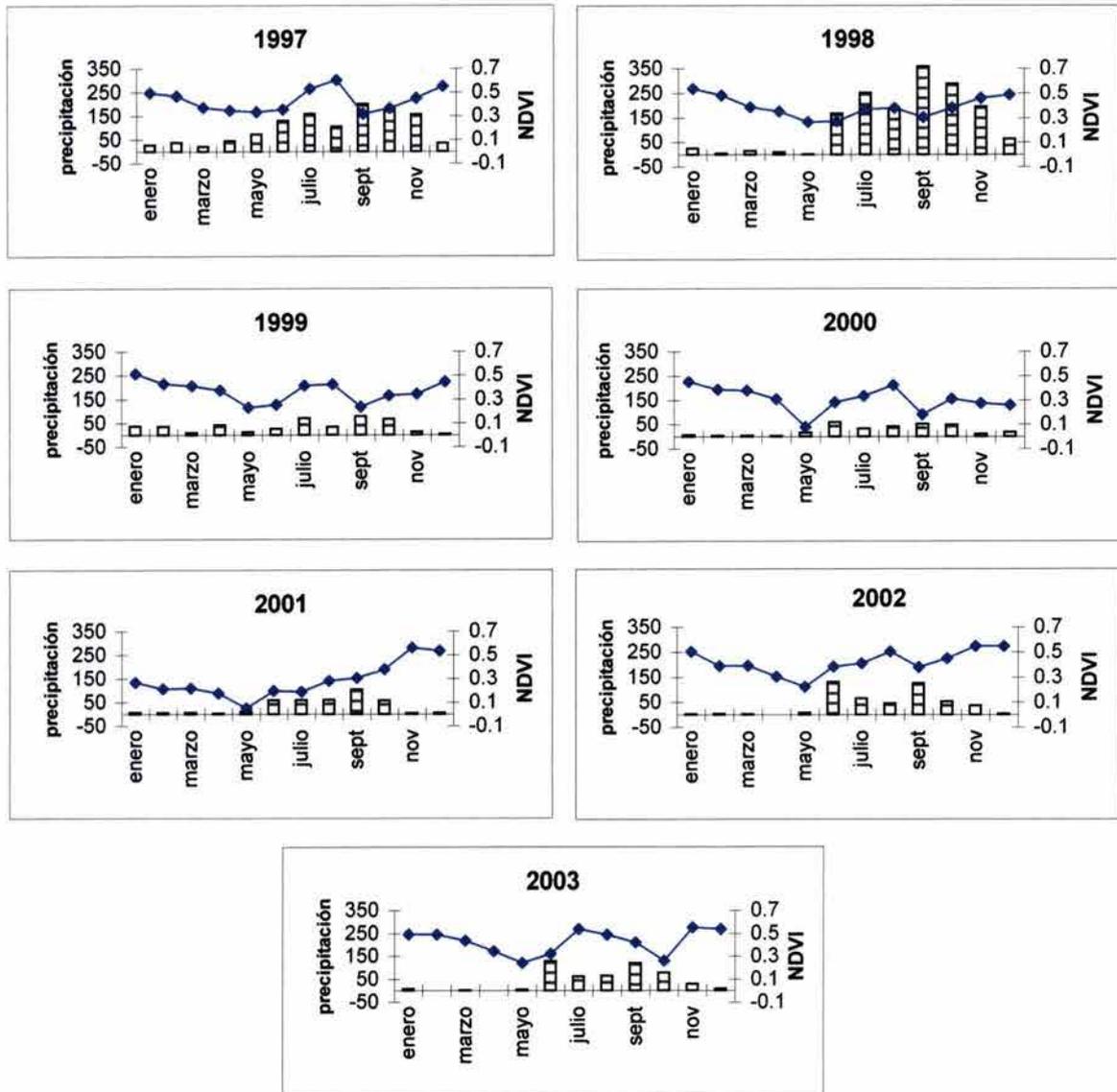


Figura 28a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en las selvas altas y medianas subperennes del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados. La línea azul representa los NDVI, mientras que las barras indican la precipitación.

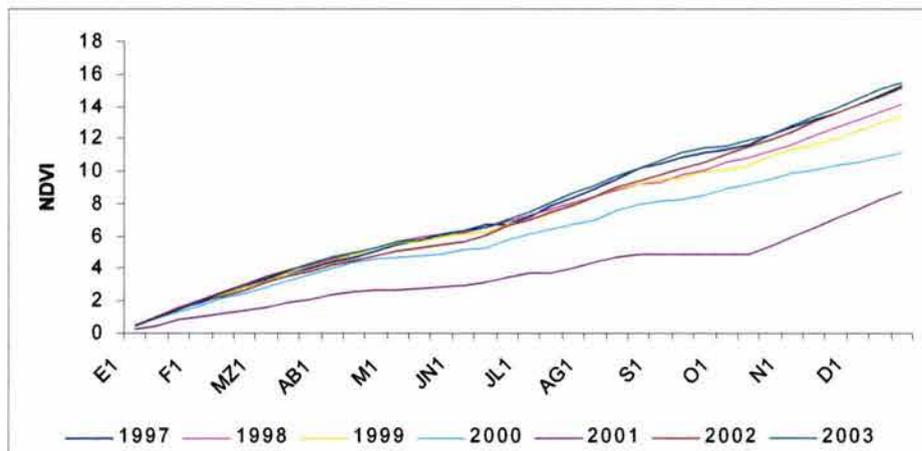


Figura 28b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en las selvas altas y medianas subperennes del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados.

Para el 2000 los mayores valores se encuentran en la tercera decena de junio, la primera de julio (0.4074 ± 0.02 y 0.4029 ± 0.02 , respectivamente) y la segunda y tercera decena de agosto (0.5162 ± 0.02 y 0.4530 ± 0.02); lo que estaría indicando un periodo de crecimiento delimitado de junio a agosto; asimismo los valores de mayo (0.0909 ± 0.02 ; 0.0538 ± 0.02 y 0.1030 ± 0.02) indican el momento más crítico del periodo de senescencia, el cual abraza de marzo a los primeros días de junio. De manera similar al año anterior, en el 2001 los valores promedio en mayo (-0.0013 ± 0.03 ; 0.0840 ± 0.03 y 0.0825 ± 0.03) muestran el periodo más crítico de senescencia, mientras que el inicio de la época de crecimiento puede marcarse en la segunda decena de junio (0.2390 ± 0.03) y continúa hasta diciembre (0.5879 ± 0.03 ; 0.5655 ± 0.03 y 0.4654 ± 0.03).

Hacia el 2002 el periodo de senescencia se concentró en la segunda y tercera decena de abril (0.2494 ± 0.02 y 0.2884 ± 0.02) y las tres de mayo (0.2599 ± 0.02 ; 0.1827 ± 0.02 y 0.2357 ± 0.02), sin embargo se inició desde las primeras fechas de febrero (0.4765 ± 0.02). De manera similar a los otros años la segunda decena de junio (0.3646 ± 0.02) marca el inicio de la época de crecimiento la cual dura hasta diciembre (0.5762 ± 0.02), con un descenso en los valores en septiembre. Finalmente en el 2003 los valores promedio fueron mayores en julio (0.4786 ± 0.02 ; 0.5478 ± 0.02 y 0.5962 ± 0.02), agosto (0.5069 ± 0.02 ; 0.5041 ± 0.02 y 0.4722 ± 0.02) y diciembre (0.6027 ± 0.02 ; 0.5812 ± 0.02 y 0.4417 ± 0.02), lo que indica que nuevamente el periodo de crecimiento se extendió a lo largo del segundo semestre del año; con relación a la época senescente los valores sugieren que duró de febrero a junio, con un recrudescimiento en mayo (0.2983 ± 0.02 ; 0.1446 ± 0.02 y 0.2932 ± 0.02).

Con respecto a los valores acumulados del NDVI en las selvas altas y medianas subperennes, también encontramos variabilidad a lo largo de los siete años estudiados, Figura 28b. El valor total en 1997 registrado para este tipo de selvas fue de 15.74 ± 0.71 , un ligero descenso con respecto al valor del año anterior se presenta en 1998 ya que al

final registra un valor de 14.14 ± 0.63 ; también en 1999 se registra un valor al de los años anteriores, 13.41 ± 0.61 , esta tendencia continúa en el 2000, 11.15 ± 0.52 . El menor valor acumulado total que se registró en los siete años es el del 2001, 8.73 ± 0.36 . Sin embargo en el 2002 sucede lo contrario debido a que los valores promedio aumentan lo que se refleja en el valor acumulado total, 15.25 ± 0.70 . Por último en el 2003 el valor acumulado de NDVI sigue aumentando registrando un valor mayor al del año anterior, 15.53 ± 0.72 ,

3.4.11 *Selva baja caducifolia*

Las selvas bajas caducifolias presentan patrones estacionales de productividad primaria con algunas diferencias a lo largo de los siete años estudiados que valen la pena resaltar. De manera general, la época senescente de los siete años de estudio se presentó de enero a mayo (Figura 29a). Sin embargo, existen marcadas diferencias en los patrones estacionales de los NDVI entre años. Por ejemplo, en 1997 la época de crecimiento comienza a partir de julio (0.5131 ± 0.02 ; 0.5268 ± 0.02 ; 0.4599 ± 0.02), continuando hasta agosto (0.5118 ± 0.02 ; 0.4601 ± 0.02 ; 0.4748 ± 0.02), y repuntando en diciembre (0.4667 ± 0.02 ; 0.4657 ± 0.02 ; 0.4576 ± 0.02). En 1998 los valores promedio del NDVI fueron mayores en las tres decenas de julio y agosto (0.4536 ± 0.02 ; 0.5088 ± 0.02 ; 0.4812 ± 0.02 ; 0.5324 ± 0.02 ; 0.5556 ± 0.02 ; 0.5092 ± 0.02 , respectivamente), delimitando la época de crecimiento. Para 1999 los valores promedio del NDVI en las selvas bajas caducifolias muestran un comportamiento similar al del año anterior, siendo en julio y agosto (0.5219 ± 0.02 ; 0.5451 ± 0.02 ; 0.5697 ± 0.02 ; 0.5345 ± 0.02 ; 0.5492 ± 0.02 y 0.5144 ± 0.02 , respectivamente) los meses de la época de crecimiento con los valores más altos, al igual que la tercera decena de octubre (0.5840 ± 0.02) donde se registró el valor más alto en relación a los siete años estudiados.

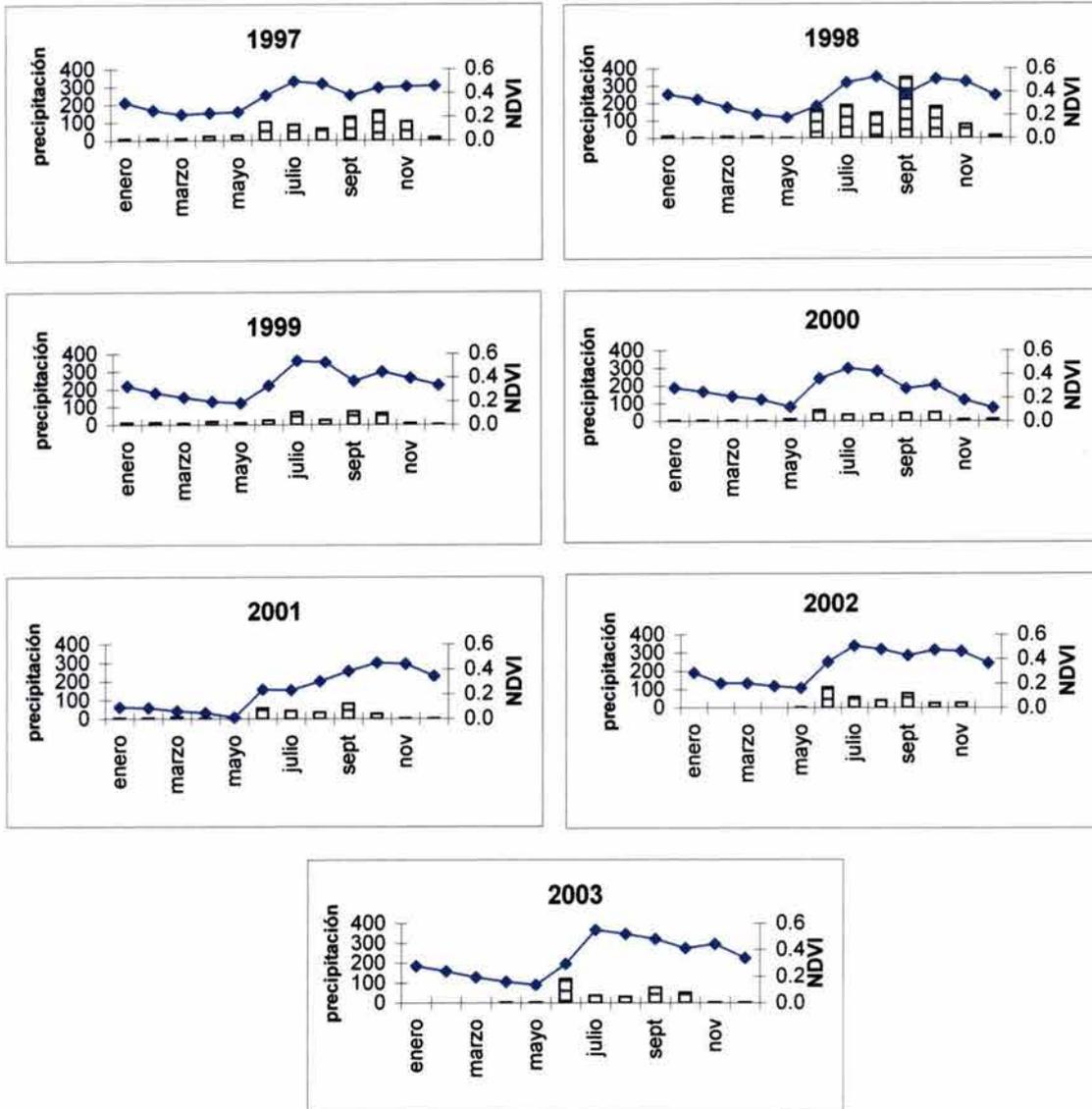


Figura 29a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en las selvas bajas caducifolias del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados. La línea azul representa los NDVI, las barras muestran la precipitación.

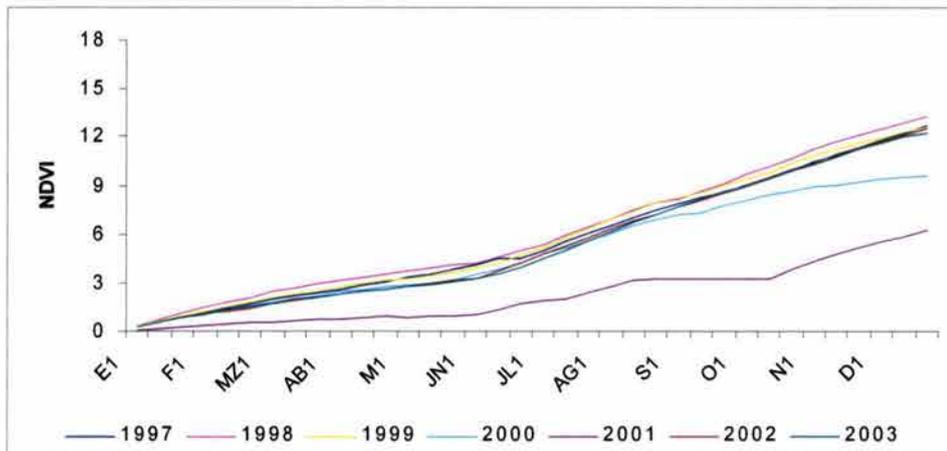


Figura 29b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en las selvas bajas caducifolias del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados.

En el 2000, la época de crecimiento inició en junio (0.3314 ± 0.02) y se extendió hasta la segunda decena de octubre (0.2624 ± 0.02), a partir de ésta fecha los valores comienzan un marcado descenso hasta diciembre. Los valores promedio registrados para 2001 son menores en relación a los otros años estudiados; de cualquier manera se observa que siguen la misma tendencia. En 2001 la época de crecimiento inició en junio, alcanzando valores máximos en la tercera decena de julio (0.3958 ± 0.03), y finalizó en noviembre. En el año 2002 los valores promedio en julio (0.5139 ± 0.02 ; 0.5097 ± 0.02 y 0.5120 ± 0.02), agosto (0.5447 ± 0.02 ; 0.4454 ± 0.02 y 0.4577 ± 0.02) y las dos primeras decenas de octubre (0.5348 ± 0.02 y 0.4773 ± 0.02) indican el periodo más intenso de actividad durante la época de crecimiento, mientras que en el 2003 la época de crecimiento inicia en la segunda decena de junio (0.3260 ± 0.02), continúa hasta la segunda decena de octubre (0.5130 ± 0.02).

En estrecha relación con los valores promedio, los valores acumulados del NDVI en las selvas bajas caducifolias presentan un variabilidad interanual que se observa en la Figura 29b. En 1997 el valor total registrado es de 13.19 ± 0.62 , en 1998 se presenta un ligero aumento llegando a 13.29 ± 0.65 . En 1999 los valores acumulados del NDVI en las selvas bajas caducifolias disminuye, 12.64 ± 0.64 , los valores siguen decreciendo alcanzando en el 2000, un total de 9.59 ± 0.51 , lo mismo en el 2001 cuyo valor final es de 6.22 ± 30 . Hacia el 2002 los valores promedio aumentan obteniendo así un valor acumulado de 12.49 ± 64 . Este valor vuelve a decrecen ligeramente en el 2003, donde se registra un valor final de 12.25 ± 0.63 .

3.4.12 Selva baja subcaducifolia

Las diferencias en los patrones estacionales de la productividad primaria en las selvas bajas subcaducifolias se pueden observar en la Figura 30a. De manera general, la época senescente de los siete años de estudio se presentó de diciembre a mayo. En

1997, la época de crecimiento inició de la segunda decena de junio a la primera decena de septiembre (0.4409 ± 0.02 y 5669 ± 0.02 ; respectivamente); alcanzando su máximo en agosto (0.5669 ± 0.02 ; 0.5302 ± 0.02 y 0.5617 ± 0.02). Para 1998 los valores promedio en julio (0.4436 ± 0.02 ; 0.5013 ± 0.02 y 0.4724 ± 0.02), la segunda y tercera decena de septiembre (0.4672 ± 0.02 y 0.4173 ± 0.02) y la primera y tercera decena de octubre (0.5171 ± 0.02 y 0.5197 ± 0.02) indican la extensión de la época de crecimiento. De manera similar en 1999 la época de crecimiento inició en la primera decena de junio (0.3806 ± 0.02) hasta la primera de septiembre (0.3018 ± 0.02), para luego estabilizarse en octubre (0.4278 ± 0.02 y 0.4619 ± 0.02) y volver a disminuir a partir de noviembre.

En el año 2000, la primera y segunda decena de julio (0.4514 ± 0.02 y 0.4278 ± 0.02) marcan el inicio de la época de crecimiento, la cual se extiende hasta la tercera decena de septiembre (0.4409 ± 0.02) con algunas oscilaciones. En 2001 la época de crecimiento se presenta de la segunda decena de junio (0.3097 ± 0.03) a la segunda de agosto (0.2073 ± 0.03), no así en el 2002 donde la época de crecimiento inició de la segunda decena de mayo (0.3097 ± 0.02) hasta la segunda decena de agosto (0.4777 ± 0.02), después de varias oscilaciones vuelven a aumentar los datos en la segunda decena de septiembre y continúa así hasta noviembre (0.3753 ± 0.02 y 0.4121 ± 0.02 , respectivamente). De manera similar en el 2003 las selvas bajas subcaducifolias registraron de la segunda decena de julio a la segunda de agosto (0.5590 ± 0.02 ; 0.5853 ± 0.02 ; 0.4541 ± 0.02 y 0.6352 ± 0.02) los mayores valores promedio, lo que indica el periodo más importante de crecimiento, el cuál dura hasta los primeros días de septiembre.

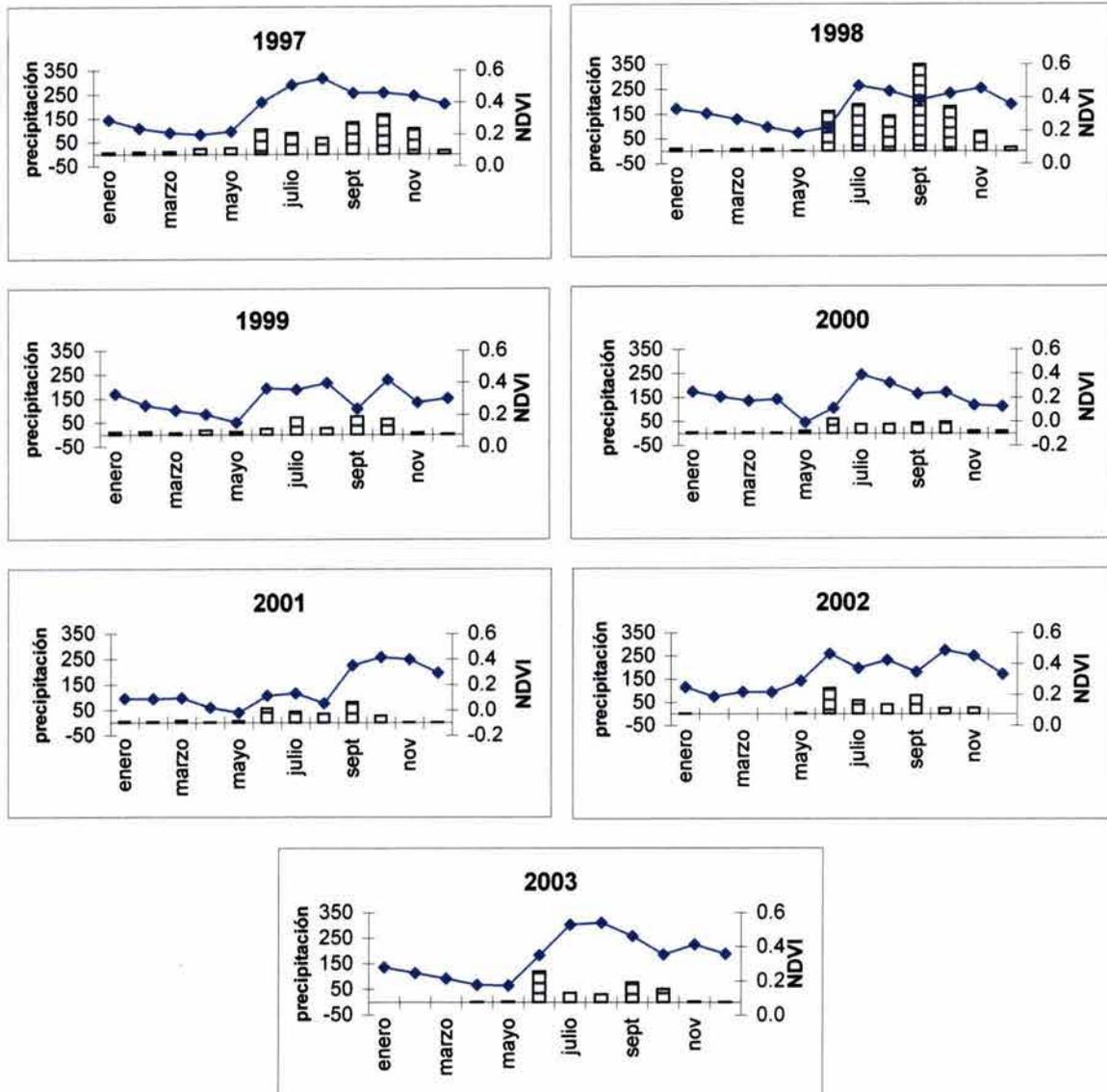


Figura 30a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en las selvas bajas subcaducifolias del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados. La línea azul indica los NDVI, las barras indican la precipitación.

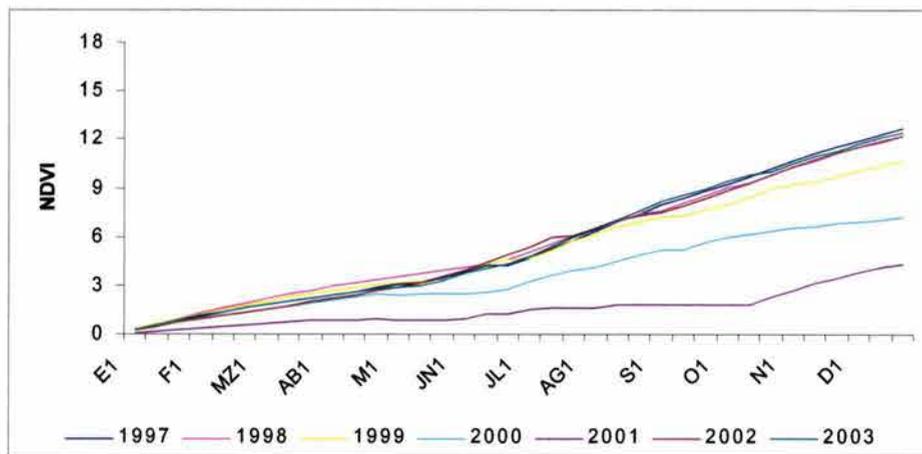


Figura 30b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en las selvas bajas subcaducifolias del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados.

La variación de los valores promedio se refleja en el comportamiento de los valores acumulados del NDVI, los cuales también presentan diferencias entre los años estudiados Figura 30b. En 1997 este valor registra un total de 13.20 ± 0.65 , para 1998 se presenta una disminución del mismo, 12.26 ± 0.60 , en 1999 el valor acumulado sigue disminuyendo, alcanzando un total de 10.67 ± 0.52 . En el año 2000 se registró un valor final de 7.18 ± 0.36 . Siguiendo con el patrón de los años anteriores, encontramos que en el 2001 el valor total disminuyó hasta 4.36 ± 0.18 . En el 2002 la tendencia cambia logrando que el valor acumulado sea de 12.19 ± 0.63 ; finalmente en el 2003 los valores siguen siendo mayores lo que se refleja en el valor acumulado total que es de 12.38 ± 0.64 .

3.4.13 Selva mediana

Las selvas medianas presentaron patrones estacionales de productividad primaria similares a lo largo de los siete años estudiados (Figura 31a). De manera general, la época senescente de los siete años de estudio se presentó de diciembre a mayo a pesar de las diferencias específicas de cada año. Las selvas medianas en 1997 presentan los mayores valores promedio del NDVI de julio (0.5825 ± 0.02 ; 0.6345 ± 0.02 y 0.5830 ± 0.02), a agosto (0.6515 ± 0.02 ; 0.6407 ± 0.02 y 0.6297 ± 0.02) y nuevamente en diciembre (0.5341 ± 0.02 ; 0.5691 ± 0.02 y 0.5552 ± 0.02) sugiriendo la época de crecimiento. En 1998 los valores promedio de enero (0.5538 ± 0.02 ; 0.4703 ± 0.02 y 0.4929 ± 0.02) indican que el periodo de crecimiento de 1997 se extendió hasta este año, pero a partir de la tercera decena de junio (0.4290 ± 0.02) se inició la época de crecimiento de 1998, la cual se extendió hasta agosto (0.4640 ± 0.02) y repunta en la segunda decena de septiembre (0.5164 ± 0.02). En 1999, los valores promedio son mayores en las tres decenas de julio y agosto (0.4215 ± 0.02 ; 0.5573 ± 0.02 ; 0.5861 ± 0.02 ; 0.5008 ± 0.02 ; 0.5932 ± 0.02 y 0.4653 ± 0.02 , respectivamente) y las dos últimas decenas de octubre

(0.4160 ± 0.02 y 0.5773 ± 0.02), lo que apunta a que la época de crecimiento se concentró en estos meses.

Vale la pena resaltar que los valores a partir del segundo semestre del año 2000 van decreciendo hasta llegar a ser los menores con respecto a los otros años. El periodo de crecimiento se registró de junio a agosto (0.3267 ± 0.02 y 0.4913 ± 0.02), con un repunte en la primera decena de octubre (0.4889 ± 0.02); en el 2001 los datos del NDVI en las dos primeras decenas de agosto (0.4156 ± 0.03 y 0.3705 ± 0.03), la tercera de octubre (0.5746 ± 0.03) y las dos primeras decenas de noviembre (0.5975 ± 0.03 y 0.5928 ± 0.03) muestran el comportamiento de la época de crecimiento.

En el 2002 la época de crecimiento de las selvas medianas abarca de junio a agosto, con valores máximos en la segunda decena de julio y hasta la primera de agosto (0.5932 ± 0.03 ; 0.5489 ± 0.03 y 0.6208 ± 0.03 , respectivamente), así como en la tercera decena de septiembre (0.6301 ± 0.03) y octubre (0.5788 ± 0.03 ; 0.5275 ± 0.03 y 0.5709 ± 0.03). En el 2003, la época de crecimiento abarcó de la segunda decena de junio (0.3425 ± 0.03) a la segunda de septiembre (0.5655 ± 0.03) registrándose valores mayores en julio (0.5446 ± 0.03 ; 0.5983 ± 0.03 y 0.6370 ± 0.03) y agosto (0.6347 ± 0.03 ; 0.6365 ± 0.03 y 0.5787 ± 0.03).

Con respecto a los valores acumulados del NDVI (Figura 31b), podemos apreciar que en 1997, el valor acumulado es de 15.72 ± 0.74 , en 1998 este valor decrece ligeramente, 14.74 ± 0.69 . De igual modo en 1999 se registra un valor acumulado menor con respecto al de los otros años, 13.00 ± 0.63 . En el 2000 el valor acumulado total es de 10.57 ± 0.52 . El menor valor acumulado se presenta en el 2001, 7.66 ± 0.34 . Sin embargo en el 2002 los valores promedio vuelven a aumentar registrando un valor acumulado de 14.80 ± 0.74 , y finalmente en el 2003 el valor total es de 14.95 ± 0.74 .

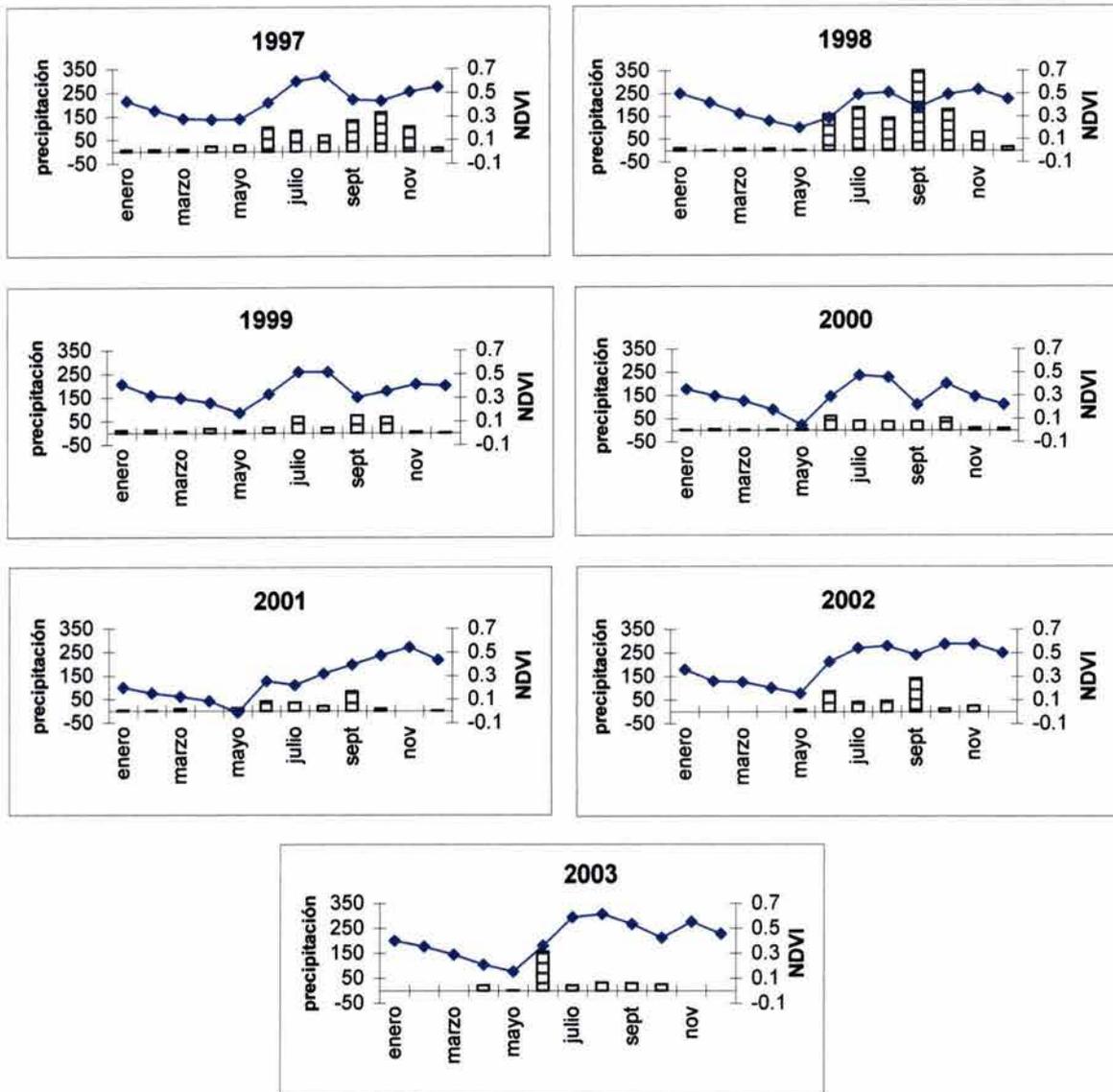


Figura 31a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en las selvas medianas del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados. La línea azul representa los NDVI, las barras muestran la precipitación.

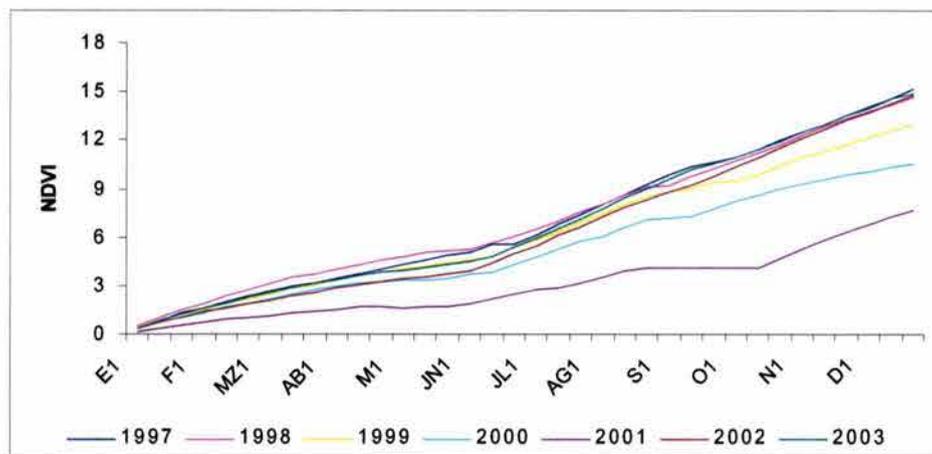


Figura 31b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en las selvas medianas del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados.

3.4.14 Cultivos

La Figura 32a muestra la variabilidad de los patrones estacionales de la productividad primaria de los cultivos. Éste tipo de vegetación, en 1997, presentan su época de senescencia de enero (0.3740 ± 0.01) a la segunda decena de mayo (0.2772 ± 0.01); mientras que la época de crecimiento abarca de la tercera decena de mayo (0.3118 ± 0.01) a la última decena de octubre (0.5080 ± 0.01). De manera similar al año anterior, en 1998 los valores muestran que el periodo senescente se extendió de febrero a la segunda decena de junio (0.3918 ± 0.01 y 0.2584 ± 0.01); después de ésta fecha la época de crecimiento se concentra de la tercera decena de junio (0.3106 ± 0.01) a la primera decena de octubre (0.4820 ± 0.01).

En 1999 los meses de julio y agosto tuvieron valores promedio mayores (0.4131 ± 0.01 ; 0.4363 ± 0.01 ; 0.4751 ± 0.01 ; 0.4588 ± 0.01 ; 0.4499 ± 0.01 , 0.4279 ± 0.01 , respectivamente) lo que indica el máximo periodo de la época de crecimiento; en la tercera decena de octubre se presenta un repunte importante no solo a nivel anual también interanual ya que representa el valor más alto alcanzado por los cultivos en los siete años de estudio (0.5040 ± 0.01). De igual manera, los valores registrados en mayo (0.2453 ± 0.01 ; 0.2323 ± 0.01 y 0.2170 ± 0.01) nos indican el periodo el momento más crítico de la época senescente.

Los valores promedio registrados en el año 2000 decrecen rápidamente a partir de octubre, presentando los menores valores promedio de los siete años estudiados. Sin embargo como parte del comportamiento de los valores en este año, éstos son mayores de julio (0.3902 ± 0.01 ; 0.3327 ± 0.01 y 0.3504 ± 0.01) a la primera y tercera decena de septiembre (0.3364 ± 0.01 y 0.4103 ± 0.01), lo que sugiere la extensión del periodo de crecimiento. Con relación a la época de senescencia, ésta se puede delimitar de la tercera decena de febrero a la segunda de junio (0.2912 ± 0.01 y 0.2376 ± 0.01).

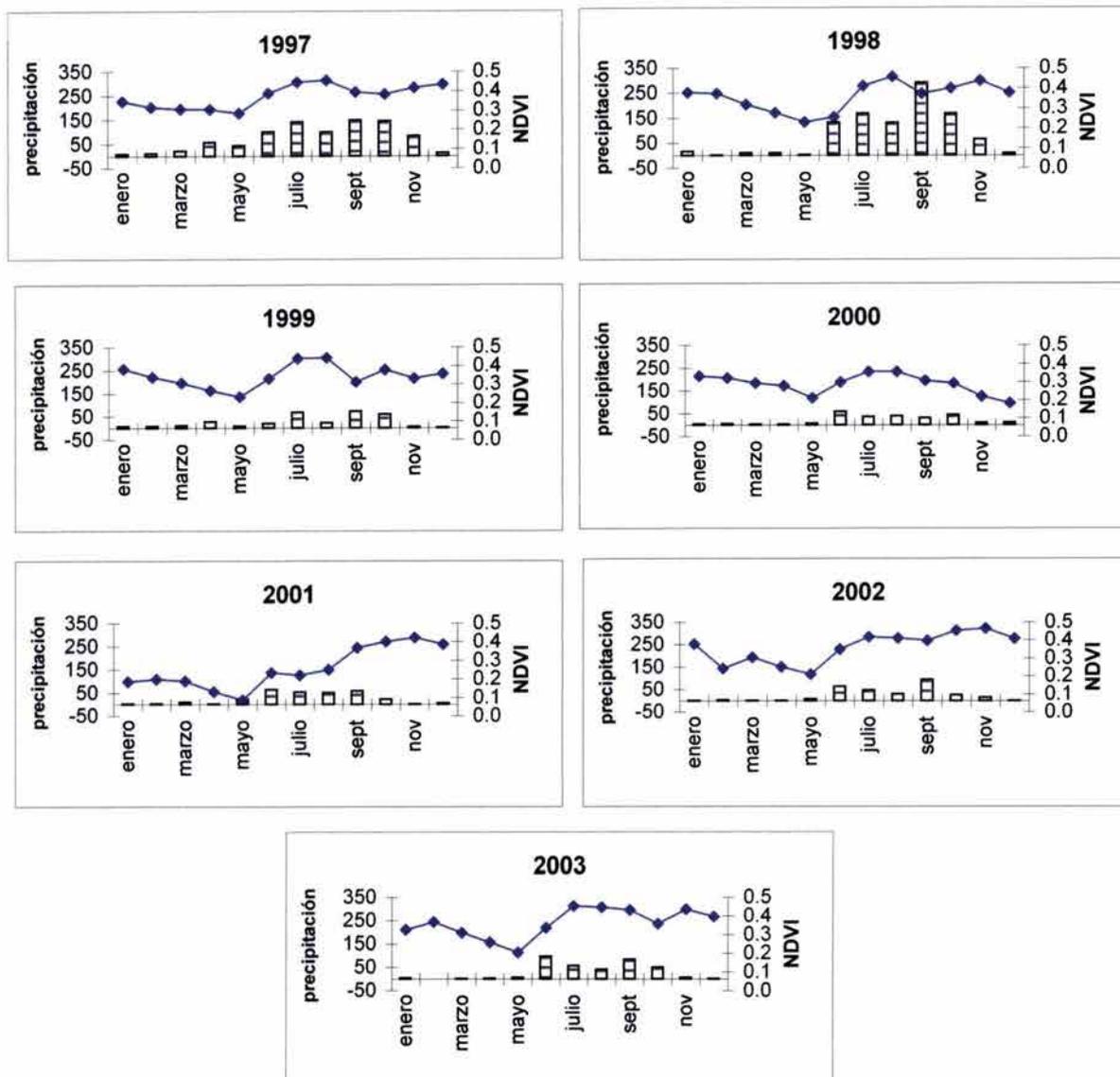


Figura 32a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en los cultivos del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados. La línea azul representa los NDVI, mientras que las barras indican la precipitación.

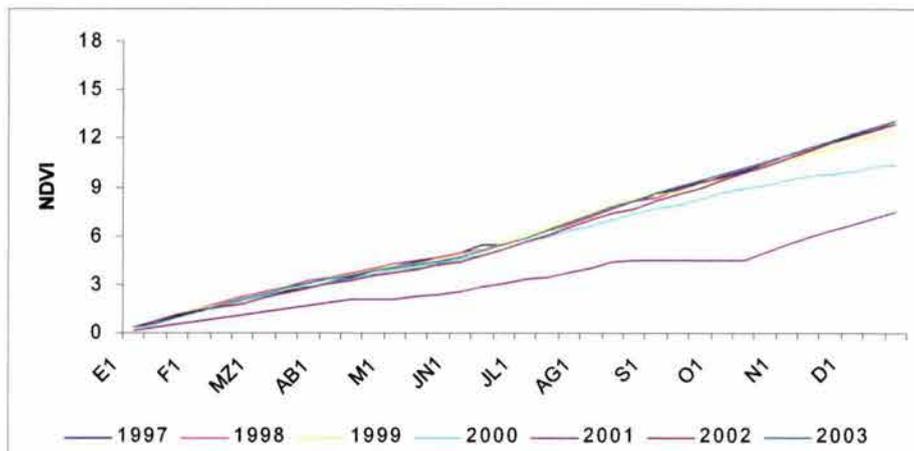


Figura 32b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en los cultivos del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados.

Los valores promedio del NDVI para 2001 indican que de enero (0.1461 ± 0.02) hasta mayo (0.1286 ± 0.02) abarca la época senescente, mientras que la época de crecimiento inicia en la primera decena de junio (0.2193 ± 0.02) continúa hasta la segunda decena de agosto (0.3413 ± 0.02).

En el 2002 la época de senescencia, también se presenta de enero a mayo (0.4168 ± 0.01 y 0.2356 ± 0.01 , respectivamente); mientras que de junio (0.2397 ± 0.01) a la primera decena de septiembre (0.4410 ± 0.01) se presentó la época de crecimiento. Para 2003 en los cultivos, se registraron valores promedio mayores en julio (0.4490 ± 0.01 ; 0.4570 ± 0.01 y 0.4613 ± 0.01), agosto (0.4702 ± 0.01 ; 0.4615 ± 0.01 y 0.4145 ± 0.01) y noviembre (0.4200 ± 0.01 ; 0.4374 ± 0.01 y 0.4548 ± 0.01), lo que indica los periodos más importantes dentro de la época de crecimiento; en comparación, los valores de abril (0.2889 ± 0.01 ; 0.2616 ± 0.01 y 0.2343 ± 0.01) y mayo (0.2170 ± 0.01 ; 0.1877 ± 0.01 y 0.2188 ± 0.01) muestran la temporada más crítica durante la época senescente de los cultivos.

Los valores acumulados del NDVI presentan un valor total en 1997 de 13.51 ± 0.63 , éste valor disminuyó en 1998 12.93 ± 0.62 lo mismo que en 1999 12.46 ± 0.60 . Para el 2000 el valor acumulado total decrece aún más registrando un valor de 10.41 ± 0.52 , para 2001 el valor total es de 7.48 ± 0.33 el menor con respecto a los siete años estudiados. Esta tendencia se revierte en el 2002 donde los valores vuelven a crecer, registrando un valor de 12.94 ± 0.63 , en el último año, 2003, el valor acumulado sigue creciendo alcanzando un total de 10.06 ± 0.64 . La Figura 32b muestra claramente la variabilidad de los valores acumulados de los cultivos en los siete años estudiados.

3.4.15 pastizales inducidos.

Los pastizales inducidos presentan de manera general de enero a mayo su periodo de senescencia, sin embargo existen ciertas particularidades que valen la pena resaltar en cada año. En 1997 este tipo de vegetación inició su época de crecimiento a partir de la tercera decena de mayo (0.2470 ± 0.01) y se mantuvo hasta la segunda de noviembre (0.3494 ± 0.01 y 0.3146 ± 0.01); con relación al periodo de senescencia se presentaron en abril (0.1832 ± 0.01 ; 0.1949 ± 0.01 y 0.2789 ± 0.01) los valores más bajos.

Asimismo en 1998 los valores registran que el periodo de crecimiento tiene un patrón bimodal, la primera abarcó de la segunda decena de junio (0.2234 ± 0.01) a la última de agosto (0.3645 ± 0.01); y la segunda de mediados de septiembre a la tercera decena de noviembre (0.3731 ± 0.01 y 0.3547 ± 0.01). En el año 1999 los valores promedio fueron mayores en la segunda y tercera decena de julio (0.3731 ± 0.01 y 0.4061 ± 0.01), y la primera de agosto (0.3915 ± 0.01) indicando el periodo de mayor crecimiento, no obstante la última decena de octubre (0.4534 ± 0.01) registró el valor más alto obtenido por los pastizales en los siete años de estudio. En contraste los menores valores registrados se presentaron a partir de la segunda decena de abril hasta la segunda de mayo (0.1801 ± 0.01 ; 0.1741 ± 0.01 ; 0.1719 ± 0.01 ; 0.1915 ± 0.01).

Cabe destacar que en el 2000 los valores del último trimestre del año son los menores con relación a las mismas fechas en los otros años. Los valores promedio de éste año permiten estimar que la época de crecimiento se localiza de junio a la primera decena de septiembre (0.1833 ± 0.01 y 0.2273 ± 0.01). Para el 2001 los valores promedio en la tercera decena de julio y las dos primeras de agosto (0.2280 ± 0.02 ; 0.2516 ± 0.02 y 0.2901 ± 0.02) están dentro del periodo de crecimiento el cual inicia en la primera decena de junio (0.0746 ± 0.02) hasta la segunda de noviembre (0.3652 ± 0.02); en mayo los valores representan el periodo más crítico de senescencia (-0.0120 ± 0.02 ; 0.0205 ± 0.02 y 0.0438 ± 0.02). El inicio de la época de crecimiento del 2002 va de junio a la primera

decena de octubre (0.4002 ± 0.01 ; 0.3700 ± 0.01 y 0.3398 ± 0.01); por otro lado abril (0.2043 ± 0.01 ; 0.1727 ± 0.01 y 0.2083 ± 0.01) y mayo (0.1865 ± 0.01 ; 0.1715 ± 0.01 y 0.2076 ± 0.01) registraron los menores valores, alcanzados durante la época de senescencia. Los pastizales inducidos en el 2003 registraron valores promedio que sugieren una época de senescencia de enero a la segunda decena de junio (0.2517 ± 0.01 y 0.2184 ± 0.01) y una época de crecimiento de la tercera decena de junio (0.2807 ± 0.01) a la segunda decena de septiembre (0.3350 ± 0.01).

Esta variabilidad en el comportamiento de los valores promedio en los pastizales inducidos está representada en la Figura 33a.

De igual manera los valores acumulados presentan cambios a lo largo de 1997 y 2003, Figura 33b. En 1997 el valor registrado es de 10.54 ± 0.50 , mientras que en 1998 este valor disminuyó ligeramente, 10.27 ± 0.49 . En 1999 el valor total registrado es de 9.81 ± 0.49 . Los valores promedio en el 2000 disminuyeron y esto se refleja en el valor acumulado total registrado, 7.46 ± 0.38 . Lo mismo sucedió en el 2001, 5.14 ± 0.23 . Contrario lo ocurrido en los años anteriores, en el 2002 se registra un incremento en los valores acumulado lo que permite que se alcance un total de 10.20 ± 0.50 . Esto continúa hasta el 2003 donde se presenta un valor total de 10.21 ± 0.51 .

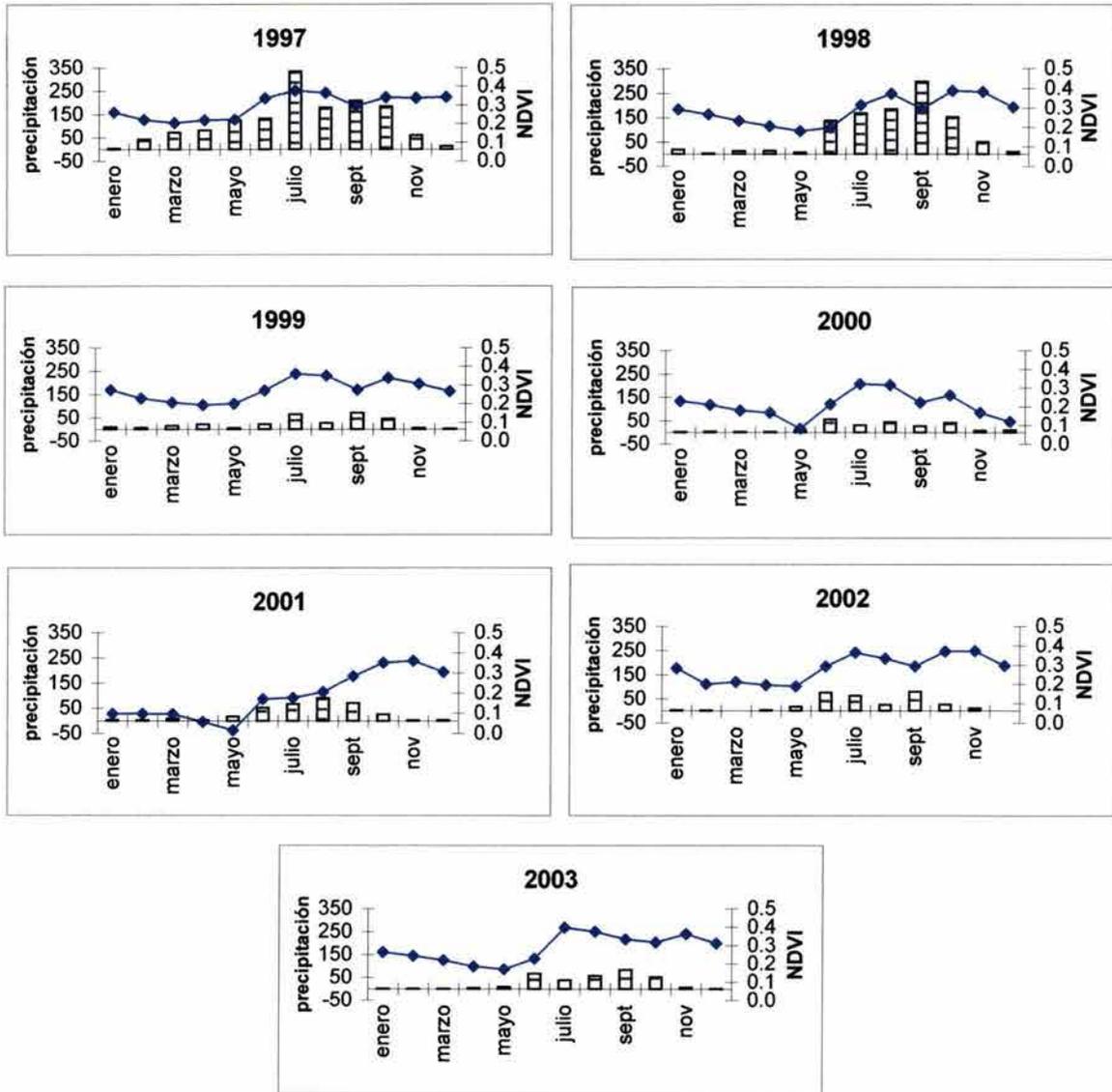


Figura 33a. Variabilidad intraanual de los valores promedio en los pastizales inducidos del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados. La línea azul indica los NDVI, las barras muestran la precipitación.

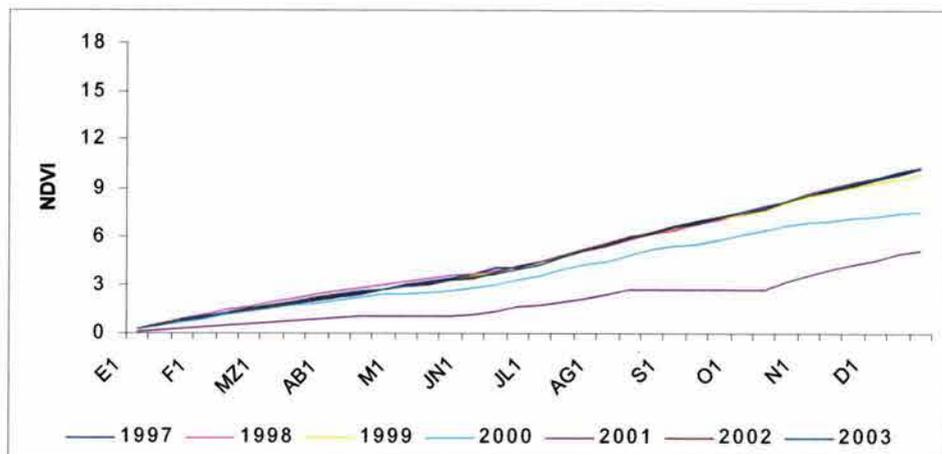


Figura 33b. Variabilidad interanual de los valores acumulados en los pastizales inducidos del Estado de Oaxaca en los siete años estudiados.

3.5 Relación NDVI-precipitación.

3.5.1 Patrones de precipitación de los seis tipos de vegetación analizados mediante un análisis espectral.

La precipitación, como elemento climático indispensable en el crecimiento y subsistencia de la vegetación, presenta patrones temporales y espaciales determinados. Analizando los valores decenales de precipitación, obtenidos a partir del sitio de la NOAA-NCEP, de los cultivos, matorrales, pastizales, bosques de pino-encino, selvas bajas caducifolias y selvas altas y medianas perennes, se pueden hacer las siguientes consideraciones sobre la variabilidad presentada a lo largo y durante los siete años estudiados.

De manera general, en los seis tipos de vegetación estudiados se encontró que 1998 es el año más húmedo, con un promedio de precipitación para los seis tipos de vegetación de 1095.1 mm, mientras que el 2000 es el más seco con un promedio de precipitación de 252.5 mm.

La precipitación media de los siete años estudiados fue mayor en las selvas altas y medianas perennes (737.1 mm), en contraste el tipo de vegetación que reportó menor precipitación fueron los bosques de pino-encino (443.4 mm). Los cultivos presentan una precipitación media para ese mismo periodo de 481.4 mm, con una cantidad similar, los matorrales reportaron una precipitación media de 492.9 mm; los pastizales presentan un valor de precipitación media de 566.9 mm, mientras que las selvas bajas reportaron un valor de 489.8 mm.

De manera particular, en los cultivos la época de lluvias en 1997 abarcó de la primera decena de mayo a la segunda decena de octubre (674 mm), presentándose una canícula a finales de julio y principios de agosto. En 1998 el periodo de lluvias se recorrió tres decenas iniciando en los primeros días de junio, presentando una canícula a mediados de agosto y terminando el periodo de lluvias a finales de octubre (889.7 mm).

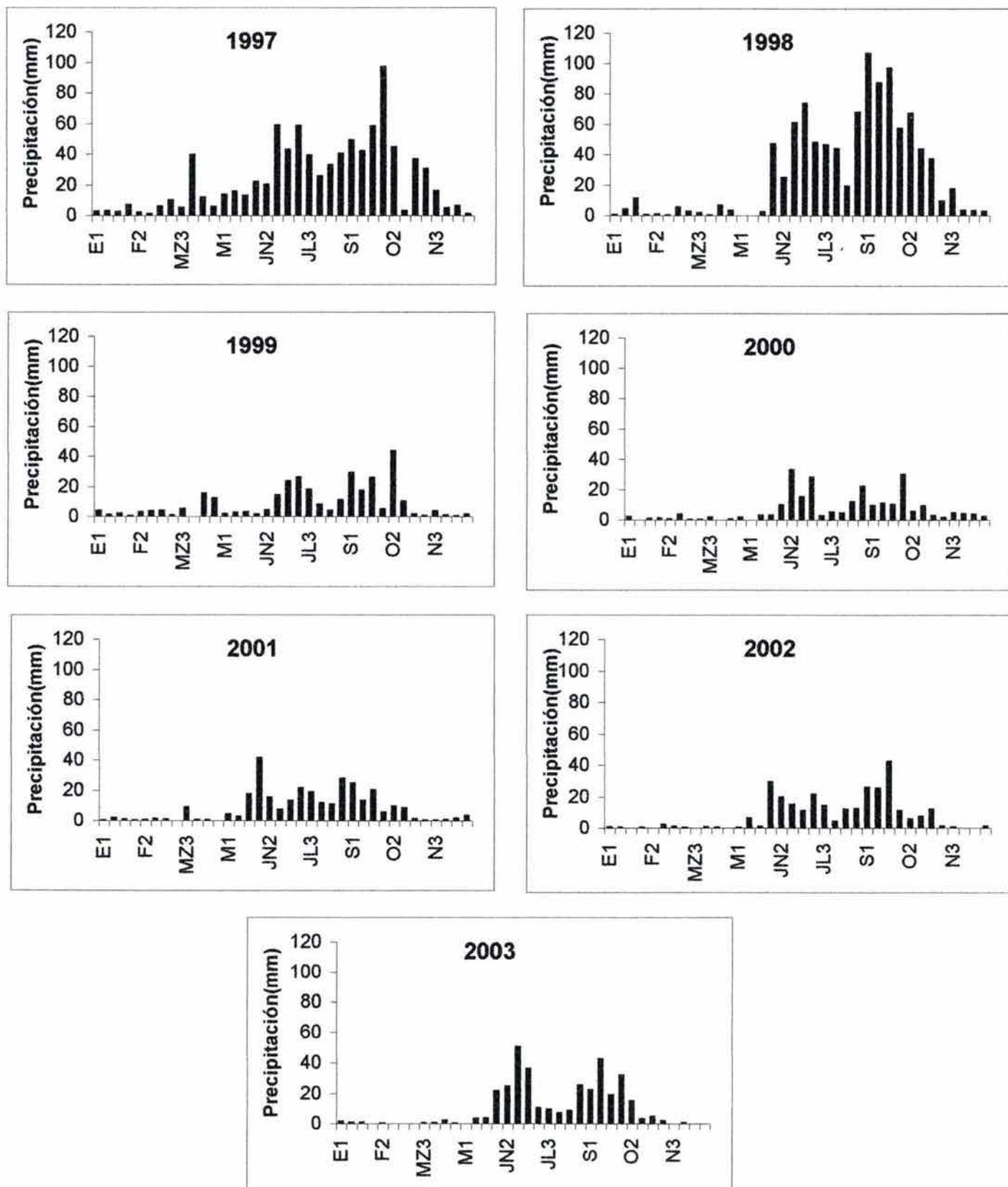


Figura 34. Precipitación media anual en zona de cultivos para los siete años estudiados .

De manera similar en 1999 la época de lluvias inició a partir de la tercera decena de junio y finalizó en la tercera decena de octubre (242.4 mm), durante agosto se presenta la canícula. Los datos en el año 2000 muestran que a partir de la primera decena de junio y hasta la tercera decena de octubre (208.3 mm) se presentó la época de lluvias, mientras que la canícula se registró a partir de la segunda decena de julio y hasta los primeros días de agosto. Muy similar a 1997, en el 2001 la época de lluvias abarcó de los últimos días de mayo a los últimos de octubre (267.7 mm). Para el 2002 los valores vuelven a recorrerse iniciando en la primera decena de junio la época de lluvias y extendiéndose hasta la primera de noviembre (271.8 mm), la canícula en este año se presentó a finales de julio, principios de agosto. Por último, el 2003 presenta de junio a la mitad de octubre su época de mayor precipitación (324.9 mm), con un periodo de finales de julio a mediados de agosto definido como canícula (Figura 34).

Dentro de la variabilidad estacional de la precipitación en los matorrales encontramos que en 1997, la época de lluvias (674.1 mm) inició en mayo y culminó a mediados de octubre, presentando canícula en agosto. En 1998 es a principios de junio y hasta principios de noviembre que se extiende el periodo de mayor precipitación (793.7 mm), mientras que la canícula se registró durante agosto. Con mayor retraso, en 1999, la época de mayor precipitación inició a finales de junio y se prolongó hasta la última decena de octubre (234.0 mm), mientras que la canícula se presentó en agosto. Ajustándose nuevamente en el 2000, el inicio de la época de lluvias se presenta a mediados de mayo, la canícula durante mediados de julio y el final se extiende hasta los primeros días de noviembre (218.2 mm). De manera muy similar en mayo del 2001 se percibe un claro incremento en la cantidad de lluvia registrada que se extiende hasta la última fecha de octubre (321.0 mm), la canícula queda marcada durante agosto.

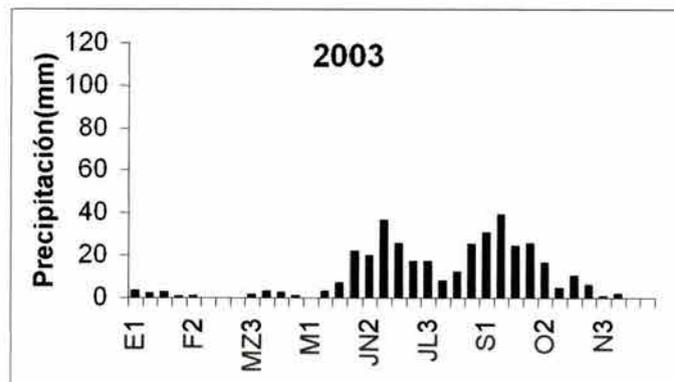
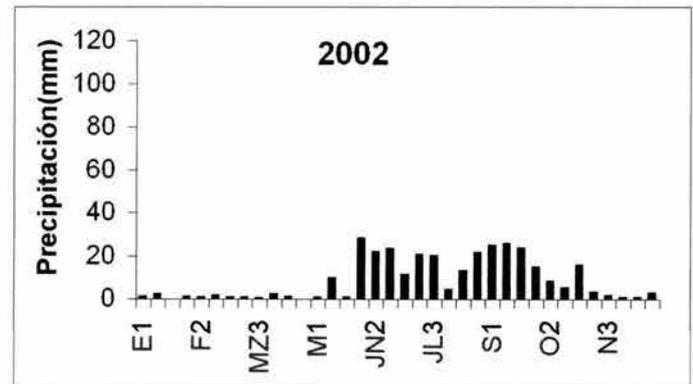
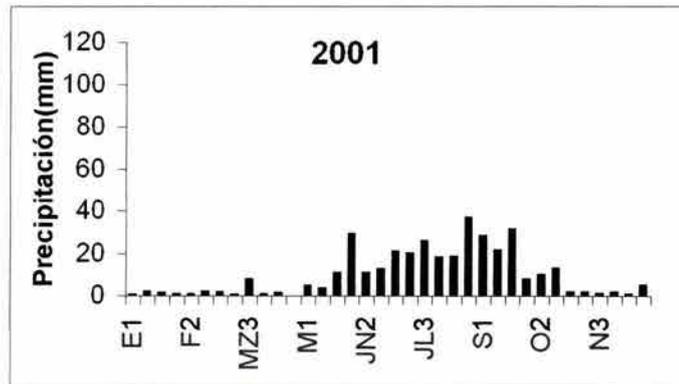
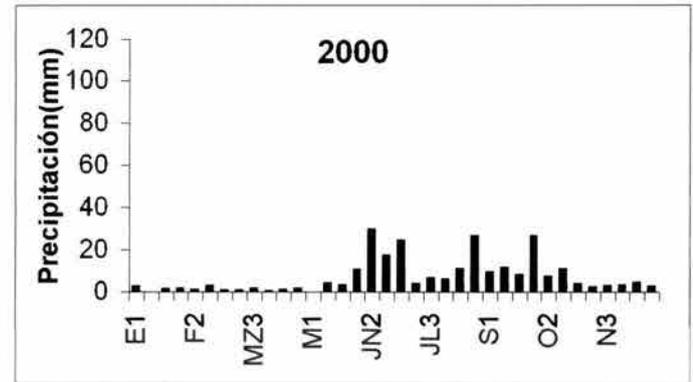
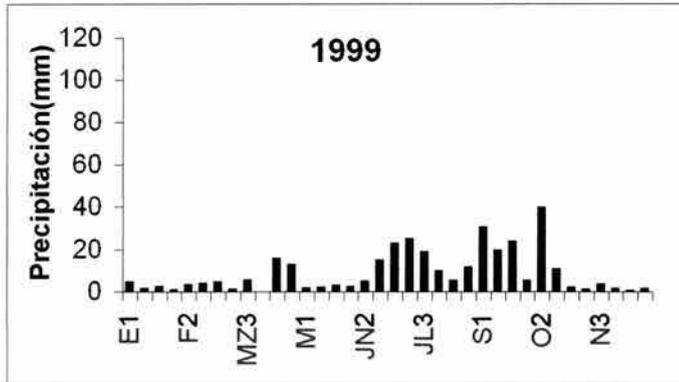
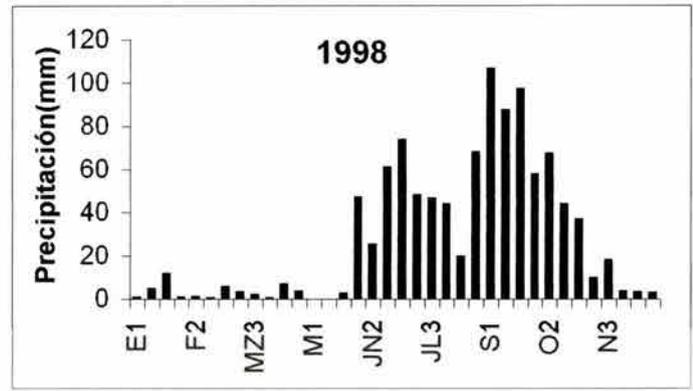
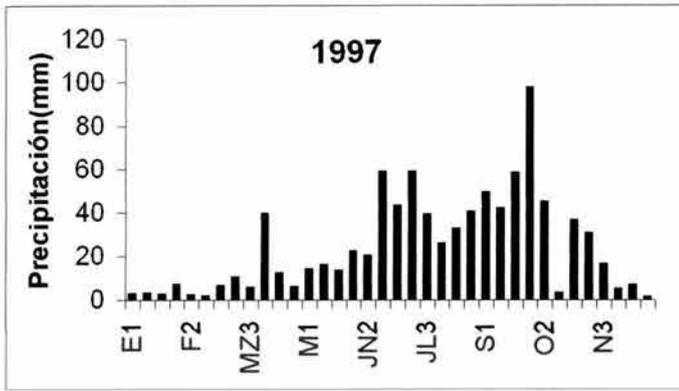


Figura 35. Precipitación media anual en zona de matorrales para los siete años estudiados .

En el 2002 vuelve a registrarse un retraso en la época de lluvias de los matorrales (280.2 mm), iniciando en los primeros días de junio, presentando canícula en agosto y finalizando en los primeros días de noviembre. Finalmente en el año 2003 los valores vuelven a mostrar un inicio de la época de lluvias en mayo, canícula en agosto y el final de dicha época se presenta a partir de la segunda decena de octubre (323.2 mm) (Figura 35).

Con respecto a los pastizales, la variabilidad en la precipitación indica que en 1997 la época de lluvias (987.6 mm), inició a finales de junio, una vez más la canícula se presenta en agosto y finalmente en mediados de octubre los niveles de precipitación vuelven a descender. En 1998 fue durante los primeros días de junio que inicia la época de lluvia y se extiende hasta la primera decena de noviembre (962.0 mm). Continuando con el retraso del año anterior, en 1999 la temporada de lluvias inicia a finales de junio y se extiende hasta los últimos días de octubre (220.2 mm), la canícula se presenta en agosto. En el 2000, vuelve a ser durante mayo que inicia la época de lluvias la cual se prolonga hasta octubre (204.8 mm). En el 2001 dicho periodo inicia en los primeros días de junio y finaliza a mediados de octubre (302.5 mm). De igual manera en el 2002 la época de mayor precipitación abarca de junio a los primeros días de noviembre, con una marcada canícula en agosto (276.5 mm). Para 2003 este mismo patrón se repite, registrando un aumento considerable de lluvia a partir de junio y un marcado descenso en la segunda decena de octubre (294.0 mm), la canícula se presenta en agosto (Figura 36).

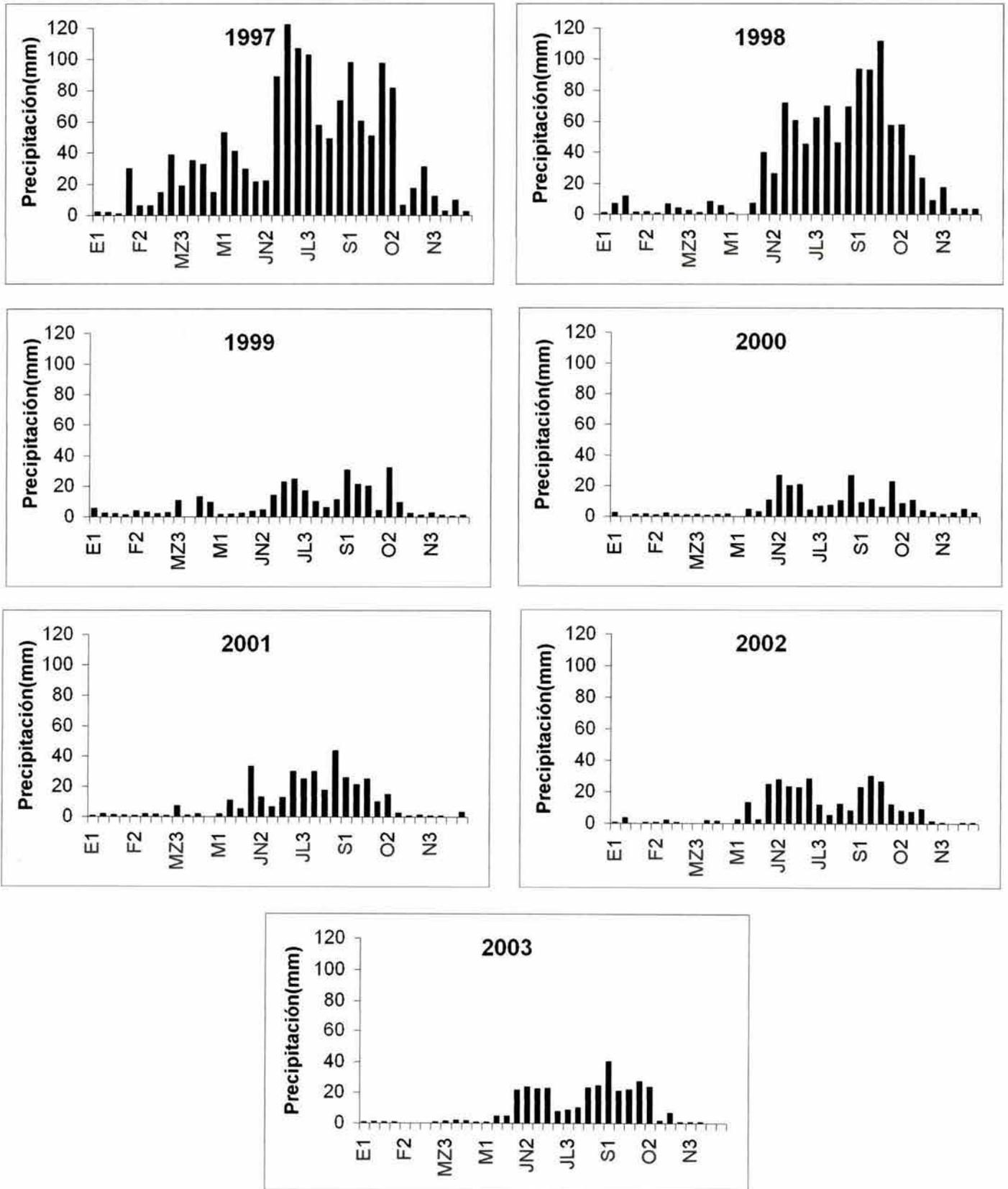


Figura 36. Precipitación media anual en zona de pastizales para los siete años estudiados .

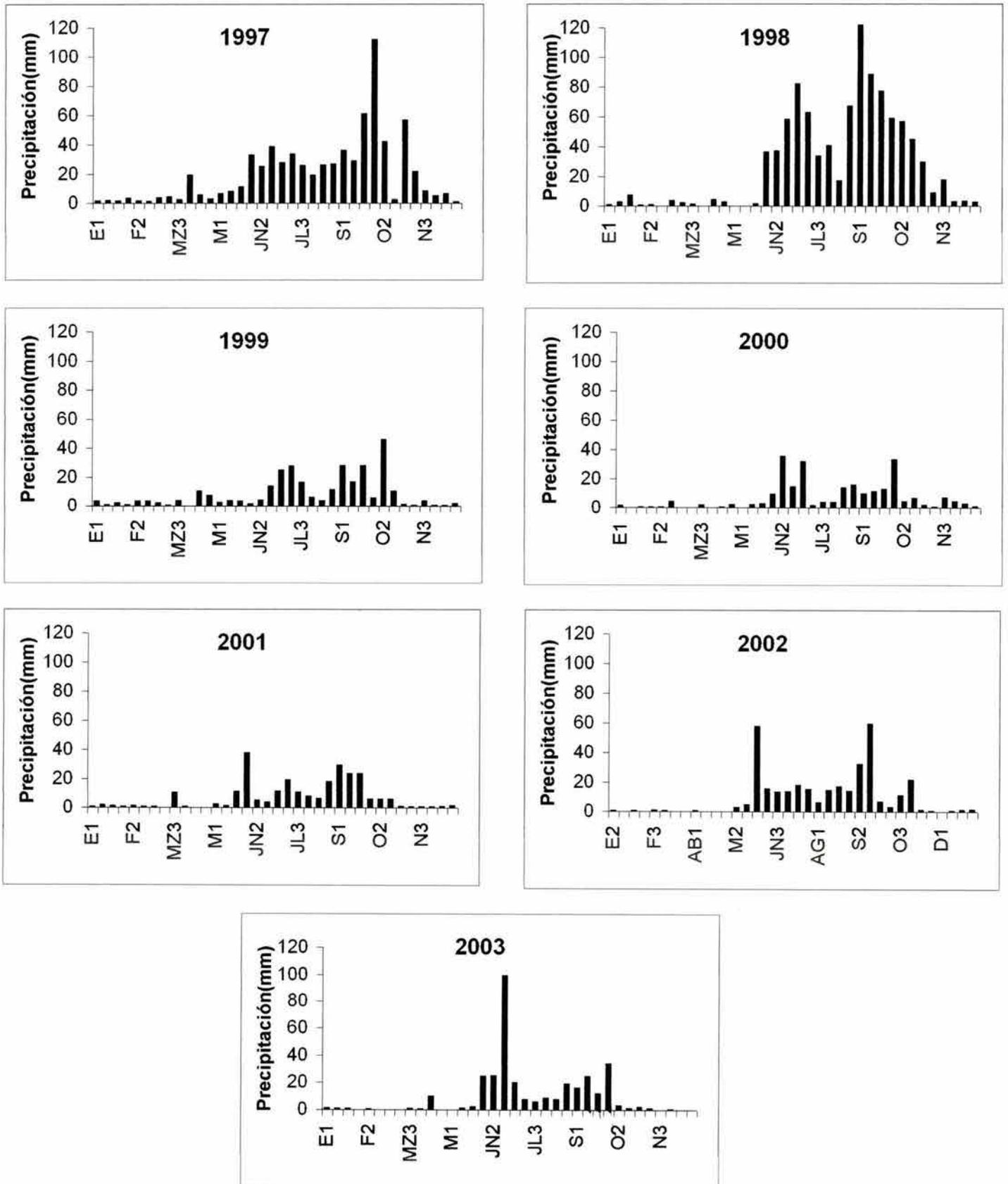


Figura 37. Precipitación media anual en zona de bosques de pino-encino para los siete años estudiados.

La precipitación en la zona de los bosques de pino-encino para 1997 indica una época de lluvia de mayo a la segunda parte de octubre (558.3 mm), así como canícula en los primeros días de agosto. A pesar de haber sido el año más húmedo, el periodo de lluvias en 1998 presenta retraso de un mes con respecto al año anterior, es así que el periodo de mayor precipitación se presentó de junio hasta los primeros días de noviembre (910.3 mm), la canícula también presenta retraso de unos días, presentándose a mediados de agosto.

En 1999 se presentaron lluvias importantes desde abril, sin embargo la época de mayor precipitación se concentró de la segunda decena de junio hasta la última de octubre (238.5 mm), la canícula se mantuvo en la mitad de agosto. Volviendo a presentarse en mayo del 2000 el periodo más intenso de lluvias, éstas duran hasta finales de octubre (212.3 mm), mientras que la canícula se observa en julio. La precipitación en 2001 presentan un ligero desfase con respecto al año anterior, iniciando el periodo de lluvias en la tercera decena de mayo hasta la última de octubre (221.5 mm). En el 2002 el periodo de mayor precipitación quedó comprendido de la segunda decena de mayo a la primera de noviembre (323.2 mm), con una canícula muy clara en agosto. Por último en 2003, el periodo de lluvias (301.7 mm) se presentó de junio a los primeros días de octubre, siendo éste el periodo de lluvias más corto de los siete años, la canícula se presentó en julio (Figura 37).

Con respecto a la precipitación registrada en las selvas bajas caducifolias, encontramos que en 1997 el periodo más importante y continuo de lluvias se presenta a partir de la tercera decena de mayo hasta la segunda decena de octubre (564.6 mm), con canícula en los primeros días de agosto. Para 1998 ésta temporada muestra sus inicios en junio y su fin en los primeros días de noviembre (1056.8 mm) así como canícula a mediados de agosto.

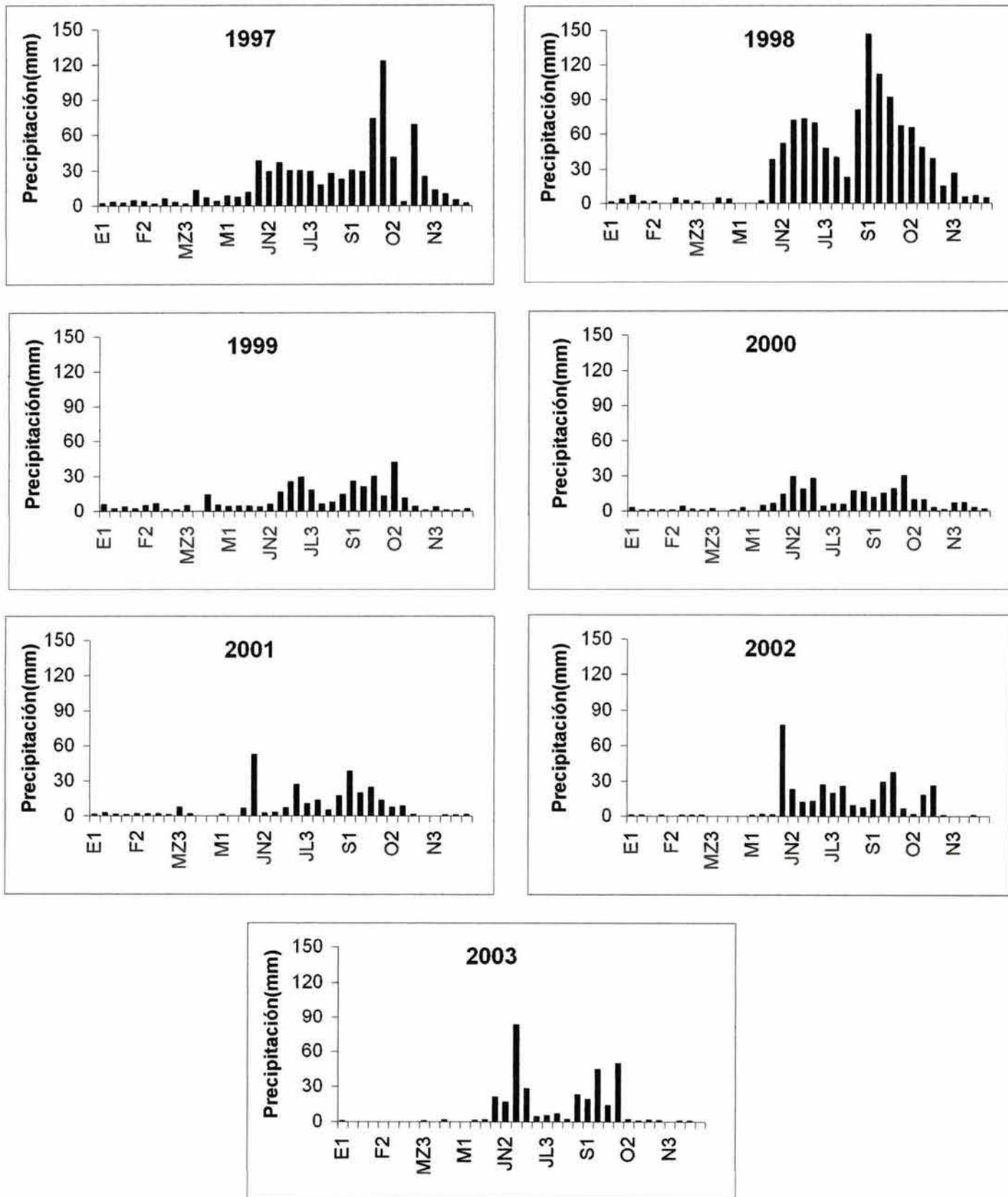


Figura 38. Precipitación media anual en zona de selvas bajas caducifolias para los siete años estudiados.

En 1999 la precipitación muestra un incremento a partir de la segunda decena de abril aunque vuelve a disminuir, alzándose una vez más en la segunda decena de junio hasta finales de octubre (259.0 mm), el momento de canícula se presenta en los primeros días de agosto. De la segunda decena de mayo hasta la última de octubre es que abarca el periodo de lluvias en el año 2000 (238.4 mm), la canícula se presenta a mediados y finales de julio. En el siguiente año, 2001, la primera decena de junio registró un rápido incremento en los niveles de precipitación, que se continuó hasta el final de octubre (242.9 mm). Lo mismo sucedió en el 2002, con la particularidad de que en este año el periodo más importante de lluvias quedó englobado de la primera decena de junio a la primera de noviembre (338.9 mm). El último año estudiado, 2003, muestra una época de lluvias definida de la primera decena de junio a la primera de octubre (312.9 mm), con canícula a mediados de julio (Figura 38).

Por último, el patrón de precipitación de las selvas altas y medianas perennes en 1997, muestran un marcado periodo de abundantes lluvias a partir de la tercera decena de junio, que se prolonga hasta la segunda decena de octubre (939.7 mm), con una canícula a mediados de agosto. Cabe señalar que las lluvias en este tipo de vegetación se presentan a lo largo de todo el año, sin embargo eso no evita que se pueda delimitar un marcado periodo de lluvias. Así, en 1998, este periodo se presentó de junio a los primeros días de noviembre (1224.4 mm) y a mediados de agosto se observa la canícula. En 1999, a pesar de la intensa precipitación registrada en la segunda decena de abril, la época de lluvias (245.4 mm) inicia en la segunda decena de junio, a mediados de agosto se presenta la canícula y es a finales de octubre que termina el periodo más importante de precipitación. Para el 2000 la mayor cantidad de lluvia se presentaron desde mediados de mayo hasta finales de octubre (225.1 mm). Asimismo en el 2001 fue de la segunda decena de junio y hasta la última de octubre que se presentó el periodo más intenso de precipitación (386.7 mm).

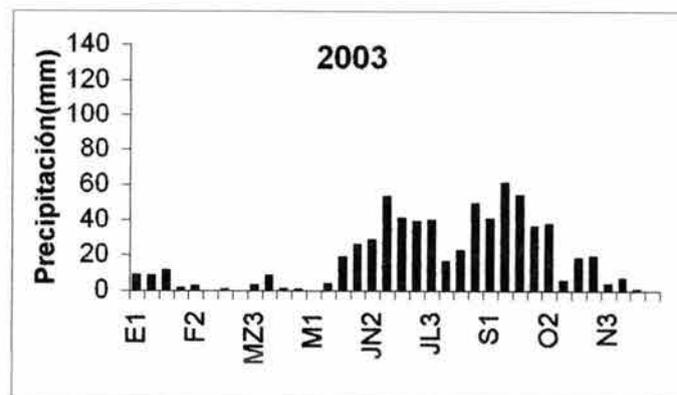
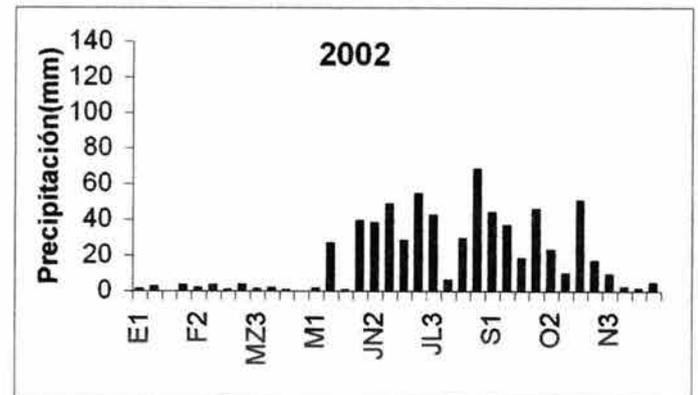
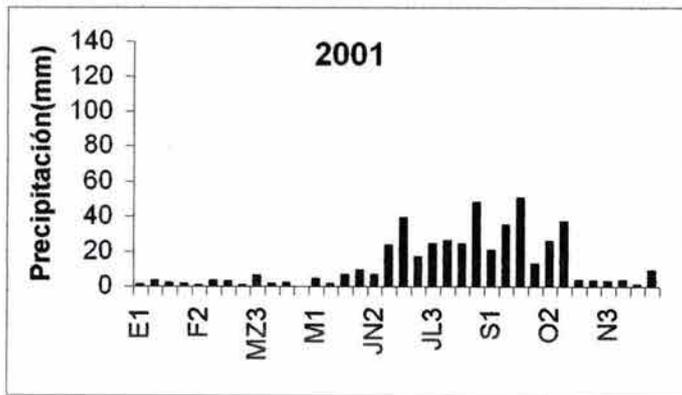
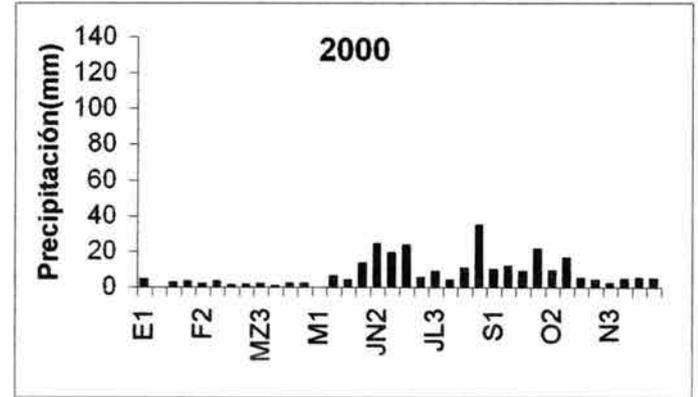
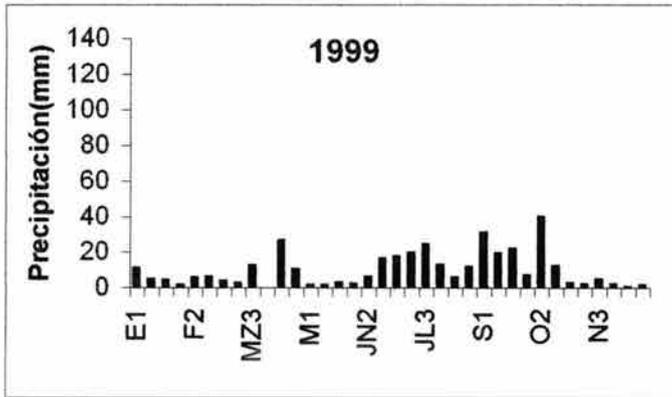
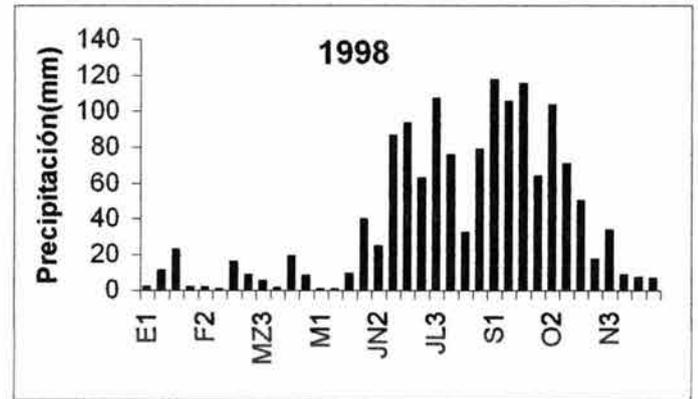
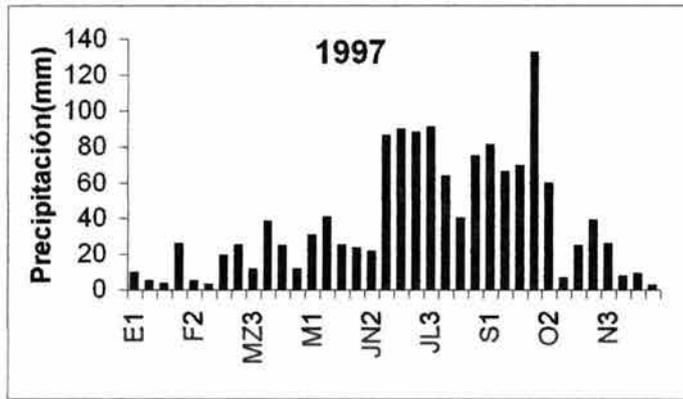


Figura 39. Precipitación media anual en zona de selvas altas y medianas perennes para los siete años estudiados.

Por otro lado 2002 no fue muy distinto en las selvas altas y medianas perennes, lluvias abundantes se registraron en la segunda decena de mayo y de junio hasta mediados de octubre (545.7 mm), con una marcada canícula en la primera decena de agosto. En el 2003 las lluvias más importantes se presentan a partir de la segunda decena de mayo y continúan hasta la segunda de octubre (563.8 mm), la canícula se presentó a principios de agosto (Figura 39).

3.5.2 Resultados del análisis espectral aplicado a los valores de NDVI y la precipitación.

El análisis espectral ayuda a entender aquellos procesos cíclicos en la naturaleza que ocurren a distintas velocidades y tiempos, pero que se encuentran relacionados entre si, esto debido a que la presencia de uno induce el comportamiento del otro o desencadena procesos paralelos (Figura 40).

Utilizando los valores de precipitación antes descritos y los de NDVI obtenidos a partir del análisis de las imágenes de satélite, el análisis espectral de los seis tipos de vegetación estudiados (cultivos, matorrales, pastizales, bosques de pino-encino, selvas bajas caducifolias y selvas altas y medianas perennes) muestra una relación a distintas frecuencias que ayuda a explicar el comportamiento de la vegetación ante distintos periodos de precipitación.

Para este análisis los elementos que más información nos brindan son la frecuencia (que se define como el número de ciclos por unidad de tiempo), el periodo (el número de unidades de tiempo necesarias para completar un ciclo completo en una frecuencia respectiva), la amplitud cruzada (se interpreta como una medida de la covarianza entre los respectivos componentes de las frecuencias en las dos series), la fase espectral o retraso (se define como la medida en radianes o días en la que una serie aventaja a la otra) y finalmente la coherencia cuadrada (explica la correlación cuadrada entre los componentes cíclicos de las dos series a una frecuencia dada).

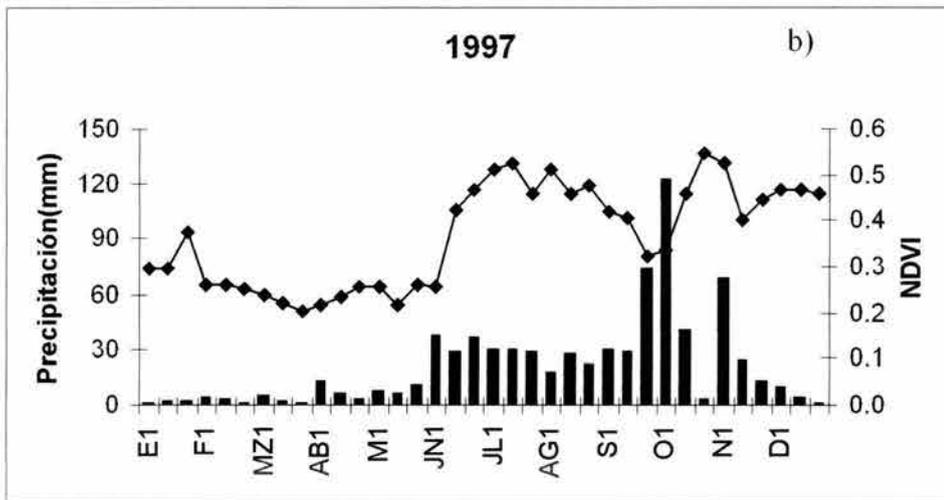
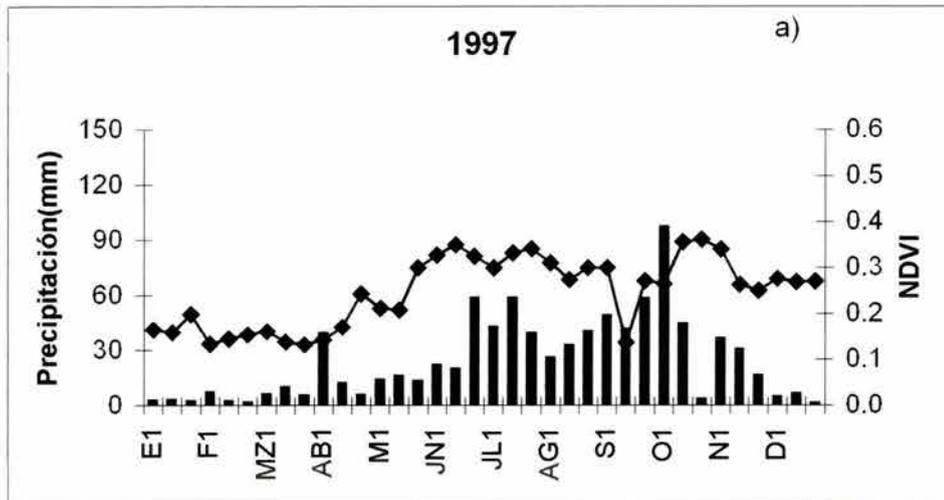


Figura 40. Relación entre los valores de NDVI y la precipitación para dos tipos de vegetación en 1997: a) Matorral b) Selvas bajas caducifolias.

El análisis espectral de los cultivos, sugiere que el periodo de frecuencia más significativo es el de los 120 días, con un retraso de 36 días y una coherencia cuadrada de 0.93. Asimismo el periodo de 76 días presenta una coherencia cuadrada de 0.56 y un retraso de 10 días.

En los matorrales, el periodo de 120 días fue el más significativo, con un retraso de 27 días y una coherencia cuadrada de 0.68. Le sigue el periodo de 90 días con una coherencia de 0.57 y una fase de 19 días. Finalmente el periodo de 79 días con una coherencia de 0.56 registró un retraso de 7 días.

Los pastizales presentan su periodo más significativo en los 90 días, con una coherencia en 0.77 y una fase de 24 días. El periodo de 46 días, presenta un retraso de 19 días y una coherencia de 0.74.

En los bosques de pino-encino el periodo de 120 días presenta la coherencia cuadrada más significativa 0.95 y un retraso de 45 días. En el periodo de 90 días la coherencia es de 0.68 y la fase de 34 días. Le sigue el periodo de 64.6 días con una coherencias de 0.58 y un retraso de 17 días.

Las selvas bajas caducifolias presentan un periodo significativo de 120 días, con una coherencia de 0.93 y un retraso de 34 días. Le sigue el periodo de 90 días con una coherencia de 0.87 y una fase de 24 días.

Finalmente, las selvas altas y medianas perennes presentan como significativo un periodo de 120 días, con una coherencia cuadrada de 0.92 y un retraso de 41 días. El periodo de 36.5 días presenta una coherencia de 0.87 y un retraso de 14 días. Por último el periodo de 76 días tiene una coherencia cuadrada de 0.55 y una fase de 12.

Tabla 9. Resultados del análisis espectral aplicado a seis tipos de vegetación representativos del Estado de Oaxaca.

Vegetación	frecuencia	periodo (días)	cross-amplitud	fase (Rad.)	fase (días)	coherencia cuadrada
Cultivos	0.06	180	6.06	-1.50	-42	0.74
	0.08	120	8.43	1.92	36	0.93
	0.11	90	3.36	1.44	20	0.44
	0.13	76	0.90	0.87	10	0.56
Matorral	0.06	157.5	1.49	0.66	16	0.40
	0.08	120	6.79	1.42	27	0.68
	0.11	90	4.80	1.30	19	0.57
	0.13	78.7	0.37	0.57	7	0.56
Pastizales	0.06	180	5.702	-1.38	-39	0.70
	0.09	114.5	2.654	1.79	32	0.46
	0.11	90	5.012	1.70	24	0.77
	0.14	70	0.749	-2.90	-32	0.31
	0.21	46	1.480	2.58	19	0.74
	0.27	36.5	0.765	1.06	6	0.40
Pino-encino	0.06	180	5.61	-1.96	-56	0.54
	0.08	120	17.03	2.38	45	0.95
	0.11	90	8.01	2.40	34	0.68
	0.13	76.3	1.47	1.43	17	0.19
	0.15	64.6	1.44	1.70	17	0.58
Selva	0.06	180	7.14	-1.91	-55	0.52
Bajas	0.08	120	18.28	1.79	34	0.93
caducifolias	0.11	90	9.67	1.71	24	0.87
Selvas Altas y Medianas perennes	0.06	180	14.50	-1.31	-37	0.88
	0.08	120	7.96	2.14	41	0.92
	0.12	84	1.49	1.35	18	0.28
	0.13	76.3	2.09	1.00	12	0.55
	0.27	36.5	4.41	2.38	14	0.87

4. DISCUSIÓN

4.1. Patrones anuales de NDVI de 15 tipos de vegetación del Estado de Oaxaca.

La determinación de la productividad primaria neta (PPN) es fundamental para estimar la cantidad de calorías y energía necesarias para mantener a la población humana, así como a los organismos heterótrofos en los ecosistemas naturales (Lieth y Whittaker 1975). Además, recientemente, la PPN esta siendo fundamental para estimar los potenciales de secuestro de carbono aéreo de los principales tipos de vegetación (Chapin et al. 2002).

La estimación de la PPN es complicada ya que es un procedimiento caro y que requiere mucho tiempo (Lieth 1975), debido a lo anterior la extrapolación de los datos de PPN en amplias escalas geográficas se dificulta todavía más. Sin embargo, la utilización de herramientas como la percepción remota y los sistemas de información geográfica permiten analizar los patrones geográficos y la dinámica de la PPN en amplias escalas espaciales y temporales. El Estado de Oaxaca es un mosaico complejo de tipos de vegetación en el cuál estimar la PPN de cada uno de estos tipos de vegetación resultaría imposible logísticamente. La estimación de la PPN de los principales tipos de vegetación en amplias escalas geográficas y temporales es imprescindible. En este estudio se reportan los primeros datos sobre PPN para quince tipos de vegetación del Estado de Oaxaca en siete años.

El análisis de la heterogeneidad espacial y la variabilidad temporal de la productividad primaria neta es fundamental para entender la variabilidad natural y los cambios direccionales de los procesos ecosistémicos (Paruelo y Lauenroth 1998). En la presente investigación, se encontró que la PPN varió marcadamente entre los siete años de estudio en los quince tipos de vegetación seleccionados. Como ejemplo tenemos que 1997 y 1998 fueron los años con mayor PPN, en contraste el 2000 y 2001 fueron los años con menor PPN. Lo anterior es apoyado por los valores del NDVI reportados en éste

trabajo, los valores promedio de los NDVI de 1997 y 1998 fueron mayores que los de 2000 y 2001 en todos los tipos de vegetación (Tabla 5). Una posible explicación de éstas diferencias interanuales de la PPN puede deberse a las marcadas diferencias en la precipitación anual; por ejemplo, la cantidad de precipitación de 1997 y 1998 fue 8 veces mayor que la de 2000; lo cual sugiere que la cantidad de precipitación anual es uno de los principales controladores de la PPN. Asimismo, los resultados del presente estudio apoyan la hipótesis que a escalas regionales la cantidad de precipitación anual está relacionada positivamente con la productividad primaria neta (Rosenzweig 1968, Lieth 1975, Churkina y Running 1998, Chapin et al. 2002, Wang et al. 2003).

La variabilidad interanual también es marcada para los diferentes tipos de vegetación. Por ejemplo las selvas bajas subcaducifolias en 1997 (0.3666 ± 0.02) y 1998 (0.3407 ± 0.02) registraron la mayor PPN en los siete años estudiados, en contraste con la PPN de 2000 (0.1995 ± 0.02). Nuevamente la cantidad anual de precipitación parece estar muy relacionada, en 1997 y 1998 la cantidad de lluvia excede los 600 mm, mientras que en el 2000 la cantidad anual de precipitación está por debajo de los 400 mm. Lo anterior refuerza la hipótesis de la estrecha relación existente entre la precipitación y los patrones de productividad primaria neta, en tipos de vegetación tanto perennes como caducifolios.

La productividad primaria neta en amplias escalas geográficas depende de la composición de especies y comunidades de plantas (Roy 2001); lo cual se relaciona con los diferentes patrones de PPN que presentan los quince tipos de vegetación aquí estudiados. En la presente investigación las selvas altas y medianas perennes y las subperennes fueron los tipos de vegetación con mayor PPN, en contraste los matorrales y los pastizales inducidos tuvieron la menor PPN; como lo sugieren los valores promedio del NDVI (Tabla 5). Se ha estimado que la producción primaria neta total de las selvas a nivel mundial es de $2500 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ (Chapin et al. 2002), esto incluye la productividad arbórea

y subterránea, sin embargo es la productividad primaria arbórea la que aporta la mayor parte $1400 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$. No sucede así con los matorrales, los cuales presentan un productividad primaria neta arbórea y subterránea similar, $500 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ cada una. Esta diferencia se debe principalmente a la capacidad fotosintética de las hojas de cada tipo de vegetación así como de su índice de área foliar. Dado que lo que mide el NDVI es la productividad primaria neta arbórea y a partir de ella se estima la productividad primaria neta total, no es de sorprender que las selvas en el Estado de Oaxaca presenten un NDVI mayor al de los demás tipos de vegetación, especialmente los matorrales, sin importar su condición de perennes o caducifolias.

Los resultados de esta comparación son similares a lo que reporta Lieth (1975). Este autor sugiere que la PPN de las selvas altas perennifolias oscila entre $1000\text{-}3500 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$; en contraste la productividad primaria neta de los matorrales oscila entre $10\text{-}250 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ y la de los pastizales entre los $200\text{-}1500 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$. Los patrones de precipitación de éstos tipos de vegetación permiten explicar las diferencias y variación de la PPN. Por ejemplo, en el año más lluvioso, 1998, las selvas alcanzaron una precipitación de poco más de 1400 mm de lluvia y un NDVI promedio de 0.4188 ± 0.02 , a diferencia de los matorrales los cuales reportaron 1000 mm y 0.2595 ± 0.02 y los pastizales que reportaron 1050 mm y 0.2854 ± 0.02 .

Lieth (1975) y Chapin et al. (2002) indican que la productividad primaria neta estimada para los matorrales, chaparrales, cultivos y pastizales a escala global es de 500 , 800 , 540 y $530 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$, respectivamente. Estos valores promedio de productividad están muy alejados de los $2000 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ reportados para las selvas o los $900 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ de los bosques templados. En el Estado de Oaxaca los matorrales, chaparrales, cultivos y pastizales son los tipos de vegetación con los valores promedio de NDVI más bajos a lo largo de los siete años estudiados. Los pastizales más que los cultivos reflejan una productividad primaria neta muy pobre con respecto a los demás tipos de vegetación.

El año que mayores valores promedio de NDVI registraron fue 1997 ($0.2934 \pm 0.$ y 0.3752 ± 0.1 , respectivamente), coincidiendo con uno de los años más lluviosos registrados. La baja productividad primaria neta y la estrecha relación de los pastizales y cultivos con la precipitación nos indican que es durante la época de crecimiento que alcanzan la máxima captura de CO_2 y que una vez terminado el periodo de crecimiento su rendimiento es muy bajo.

Por otro lado, es importante señalar que las selvas altas y los bosques templados tuvieron una PPN similar, a pesar de que poseen atributos ecológicos y ambientales distintos. A escala global se ha estimado que las selvas y los bosques aportan la mitad de la PPN terrestre (Chapin et al. 2001). Estos resultados coinciden con los valores estimados a partir del análisis de los NDVI donde las selvas y en segundo lugar los bosques aportan más de la mitad de la productividad primaria neta del Estado de Oaxaca. Asimismo, los seis tipos de bosques templados presentan una productividad primaria neta arbórea similar en el periodo de 1997-2003. Estos resultados contrastan con lo encontrado en otros bosques templados. Por ejemplo, datos de productividad primaria neta en los bosques de Japón sugieren que los bosques perennes de las zonas templadas son los más productivos ($\sim 20 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$), seguidos de los bosques de pino y los templados de coníferas ($10\text{-}15 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$) (Kira 1975). Sin embargo en el presente estudio no existen diferencias en la PPN entre bosques templados deciduos y bosques templados perennes; lo cual sugiere que estos bosques templados presentan una asimilación y distribución de los recursos parecidos además de estar limitados por los mismos factores. Este resultado concuerda con lo expuesto por Reich y Bolstad (2001), estos autores sugieren que no importando su condición de deciduos o siempre verdes los bosques templados presentan una productividad primaria neta de entre 8.8 y $10.1 \text{ Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$. Es decir que la cantidad total de productividad primaria neta de los bosques templados en promedio es muy parecida, esto debido a su composición y estructura, así como a los factores que

restringen su crecimiento como sería la luz, la temperatura, la disponibilidad de agua, la topografía e incluso la altitud.

Los resultados interanuales de la productividad primaria del presente estudio a nivel regional con NDVI, demuestran ser similares a los resultados de productividad primaria neta obtenidos a partir de métodos tradicionales a escalas locales. La alta variabilidad interanual en la PPN entre años y entre ecosistemas indica diferencias en la cantidad de biomasa acumulada, el carbón fijado, la capacidad de secuestro de CO₂ a largo plazo y la respuesta de la vegetación ante los cambios del clima global. De ahí la importancia de entender dicha variabilidad y los mecanismos que controlan los ciclos biológicos de la vegetación. La evaluación espacial y temporal de la PPN de quince tipos de vegetación nos permite proponer un mejor diseño espacial de secuestro de carbono en Oaxaca. Con lo anterior podemos afirmar que la diversidad de los ecosistemas reunidos en el Estado de Oaxaca lo hace un sitio importante a escala nacional de producción primaria neta y secuestro de carbono.

4.2. Patrones estacionales de los NDVI de 15 tipos de vegetación del Estado de Oaxaca.

La productividad primaria neta es el resultado de la duración de la época de crecimiento, es decir, de la longitud entre el inicio y final de la foliación de los diferentes tipos de vegetación. En la presente investigación, el ciclo anual de crecimiento de la vegetación varió de un tipo de vegetación a otro y de un año a otro, asimismo, se encontró un mosaico fenológico regional con una gran variabilidad intraanual. Una probable explicación de esta heterogeneidad espacial y temporal de la época de crecimiento, es la marcada heterogeneidad espacial de los patrones de precipitación en el Estado de Oaxaca (Figura 10); sin embargo, también el amplio gradiente altitudinal (3000 mts.) tiene una marcada influencia en los patrones de temperatura.

Los 15 tipos de vegetación del estado de Oaxaca presentan dos tipos de patrones fenológicos, el primero asociado a los tipos de vegetación siempre verdes (bosques templados y selvas altas y medianas perennifolias) caracterizados por una larga estación de crecimiento (300 días); mientras el segundo patrón fenológico está asociado a los tipos de vegetación caducifolios (selvas bajas caducifolias, pastizales y cultivos, chaparral y matorral), caracterizados por una acotada estación de crecimiento (150 días). A escala global, las selvas perennes y los bosques templados son los ecosistemas que presentan el periodo de crecimiento más extenso (365 y 250 días, respectivamente), mientras que los cultivos y los pastizales presentan la época de crecimiento más corta (200 días y 150 días, respectivamente), que además está acotada a la época de lluvias (Chapin et al. 2002). Los resultados encontrados en el presente trabajo para los quince tipos de vegetación estudiados, muestran una similitud con los datos reportados para la extensión de la época de crecimiento de la vegetación a nivel mundial. Las selvas y en segundo lugar los bosques son los tipos de vegetación con la época de crecimiento más extensa. De igual manera, los cultivos y pastizales presentan un claro patrón estacional de crecimiento de 100-150 días (Figuras 40-55).

Por otro lado, las condiciones de perennes de los tipos de vegetación están íntimamente relacionadas con un elevado índice de área foliar permanente, lo cual les confiere una mayor capacidad de actividad fotosintética (Kira 1975). En contraste, en los tipos de vegetación caducifolios el índice de área foliar está acotado a la época de lluvias ya que este tipo de vegetación escapa a la aridez con la abscisión de las hojas y teniendo un metabolismo basal muy bajo (Chapin et al. 2003). Debido a lo anterior, las selvas altas y medianas perennes son el tipo de vegetación con mayor productividad primaria neta, como resultado de su mayor duración de la época de crecimiento durante los siete años de estudio. Sin embargo, si es posible delimitar una época de crecimiento, la cual inicia aproximadamente en los últimos días de mayo y continúa hasta finales de septiembre,

principios de octubre. Los altos valores de NDVI en las selvas, una vez que terminó la época de crecimiento sugieren que la disponibilidad de agua y de nutrientes en el suelo favorecen que la vegetación siga teniendo una productividad muy alta, la cual va disminuyendo en los primeros meses del siguiente año debido a la falta de humedad y nutrientes los cuales están almacenados para que las plantas puedan resistir hasta la siguiente época de lluvias.

Las selvas bajas subcaducifolias también presentan un periodo de crecimiento muy marcado de mayo a octubre. Es importante señalar que particularmente en este estudio, en las selvas bajas caducifolias los patrones fenológicos y reproductivos están relacionados con la cantidad de precipitación (Bullock et al. 1995).

Por otro lado, los cultivos presentan valores de NDVI muy por debajo de los reportados por las selvas y los bosques, aún así es posible distinguir que a partir de los últimos días de mayo y hasta septiembre y en algunos casos octubre, se presenta su ciclo anual de crecimiento. La mayoría de los cultivos localizados en el Estado de Oaxaca son de temporal, por lo cual la estación de crecimiento está fuertemente relacionada con la cantidad de precipitación. Finalmente, los valores de NDVI de los pastizales en 1997, 1998 y 2003 muestran ser mayores a los registrados en los demás años, lo que concuerda con aquellos patrones de precipitación abundantes, lo que sugiere una vez más que tanto los pastizales están limitados principalmente por agua y que es éste factor climático el que más influyen en los procesos fenológicos de éste tipo de vegetación (Paruelo et al. 1995, Paruelo y Lauenroth 1998).

Esta disposición de los diferentes eventos fenológicos de los 15 tipos de vegetación parecen estar respondiendo claramente a los patrones de precipitación registrados para el Estado de Oaxaca. Therrell et al. (2002) indican que en el sureste de México, las marcadas elevaciones y la compleja topografía se combinan con los diferentes factores climáticos, los cuales resultan en un patrón geográfico heterogéneo

espacial y temporal de precipitación. Lo anterior, es responsable de la alta variabilidad espacial de la productividad primaria neta y la regionalización de los patrones fenológicos de los 15 tipos de vegetación del Estado de Oaxaca.

En el presente estudio, se encontró que la forma general de la curva de NDVI de los tipos de vegetación perenne fue constante y similar entre años, lo cual favoreció la dinámica de crecimiento y la productividad estacional (Hope et al 2003). En contraste, los tipos de vegetación caducifolios presentaron una forma de curva bimodal, marcando claramente la época de crecimiento y la época de senescencia (Hope et al 2003).

Lo relevante en los estudios relacionados con la fenología es poder comprender los factores que están influenciando el inicio del periodo de crecimiento y su duración (Paruelo y Lauenroth 1998, Wang et al. 2003, Suzuki et al. 2003). Asimismo, es importante entender la variabilidad interanual de los patrones de acumulación de carbono. Finalmente, la diferencia entre las fechas de inicio del crecimiento en un tipo de vegetación y otro podrían ser un buen indicador de la respuesta de la vegetación ante distintos eventos climáticos como las heladas, las sequías o las abundantes lluvias.

4.3. Relaciones entre la precipitación y los NDVI de 6 tipos de vegetación del Estado de Oaxaca.

El análisis espectral es una herramienta útil para determinar el tiempo y rapidez con la que vegetación responde a la distribución de la precipitación, debido a que éste análisis estadístico busca la relación entre procesos que ocurren a velocidades y tiempos distintos. Tomando en cuenta que el NDVI mide la productividad de la vegetación, y que ésta depende enormemente de la precipitación, es posible realizar para los seis tipos de vegetación seleccionados un análisis espectral con los valores de NDVI reportados.

A pesar de las diferencias en los valores de NDVI y precipitación a lo largo de los siete años estudiados para los seis tipos de vegetación, el análisis espectral indicó

frecuencias semejantes entre los seis tipos analizados lo que sustenta que a grandes escalas la vegetación, responde directamente a los eventos de precipitación de manera similar. El periodo de 180 días, divide la época de lluvias y la época seca del año, el cual determina la época de crecimiento de la vegetación, así como de la productividad primaria neta sin importar el tipo de ecosistema. Sin embargo, el análisis espectral realizado mostró valores negativos para el periodo de 180 días. Esto implica que el NDVI presenta un retraso en días igual al periodo más los días reportados en la fase. Tal es el caso de las selvas altas y medianas perennes que presentan en el periodo de 180 días una fase de -34 días, lo que significa que la vegetación responde a un ciclo anterior de $180 + 34$ días, lo que implica que el ciclo anterior duró 214 días. Sin embargo, dichos valores resultan poco significativos en relación a los fines buscados con la aplicación del análisis espectral.

El periodo de 120 y 90 días definen las variaciones estacionales de la lluvia primavera, verano, otoño, invierno. En el primer periodo, consistente en cinco de los seis tipos de vegetación, los matorrales son las comunidades que responden más rápidamente (27 días), a diferencia de los bosques de pino-encino (45 días). De la misma manera, en el periodo de 90 días los matorrales responden de manera más inmediata (19 días), mientras que los bosques de pino-encino fueron los más lentos (34 días). Cabe señalar que este periodo de 90 días sólo se presentó en cuatro de los seis tipos de vegetación.

Con los resultados reportados en la presente investigación se puede afirmar que los compuestos de 10 días tanto para los valores de NDVI como de precipitación, resultaron útiles para definir frecuencias espectrales significativas en los seis tipos de comunidades estudiadas. Los días de retraso del NDVI con respecto a la precipitación en la mayoría de los casos fue mayor a una decena; excepto para los matorrales en el periodo de 79 días, los cuales presentaron un retraso de 7 días. El hecho que los matorrales respondan más rápidamente a los eventos de precipitación sin importar su

frecuencia, pone de manifiesto la relación tan estrecha que existe entre la productividad primaria neta arbórea de este tipo de vegetación y las condiciones de precipitación.

En las zonas cubiertas por matorrales y pastizales existe la misma estructura de la vegetación en cuanto a la altura; la distribución de hojas y los tejidos foliares favorecen una rápida absorción de la lluvia. Esto último se debe a que la vegetación de zonas áridas contiene un gran número de especies vegetales que han evolucionado para responder rápidamente a la pérdida de agua en contraste con tipos de vegetación más mesicos. En el caso de los bosques, no solo el factor luz limita la distribución de recursos por parte de las plantas sino también su tamaño, lo que implica que el tiempo requerido para la distribución de los recursos a cada parte de su estructura sea mucho mayor. Asimismo, la profundidad y composición del suelo en los bosques favorecen el almacenamiento de una mayor cantidad de humedad, a diferencia de lo que ocurre en los matorrales y pastizales. Es por eso que el tiempo transcurrido entre que se produce la lluvia y el momento en el que las hojas manifiestan un cambio de color, que es lo que registra el NDVI, está desfasado mucho más en los bosques que en los matorrales. Wang et al. (2002) sugieren que los bosques responden mucho más lento a los eventos de precipitación debido a las estrategias de adaptación de las plantas para usar eficientemente el agua.

Los resultados del análisis espectral contribuyen a la identificación de las tolerancias climáticas de las diferentes comunidades vegetales y su eventual aplicación en escenarios de variabilidad y cambio climático.

Se recomendaría realizar un análisis espectral en los matorrales con valores diarios o semanales (menores a los periodos decenales aplicados en éste estudio) para poder así apreciar mejor la respuesta de la vegetación ante eventos locales de precipitación.

Los periodos de 120 y 90 días definen las variaciones estacionales de la lluvia primavera, verano, otoño, invierno. En el primer periodo, consiste en cinco de los seis

tipos de vegetación, los matorrales son las comunidades que responden más rápidamente (27 días), a diferencia de los bosques de pino-encino (45 días). De la misma manera, en el periodo de 90 días los matorrales responden de manera más inmediata (19 días), mientras que los bosques de pino-encino fueron los más lentos (34 días). Cabe señalar que este periodo sólo se presentó en cuatro de los seis tipos de vegetación. Los periodos de 76, 79, 46, 65, 76 y 36.5 días pueden corresponder a eventos específicos de lluvia como serían los frentes, tormentas tropicales, huracanes, etc., a los cuales la vegetación responde por las condiciones favorables de humedad en el suelo.

5. CONCLUSIONES

El presente estudio, representa el primer intento de estimar la productividad primaria neta a escala regional en México. Los patrones de productividad primaria neta del Estado de Oaxaca aquí presentados nos permiten tener un patrón espacial de la PPN, así como de su dinámica, que nos permite tener una mejor planeación de los escenarios ecológicos y de secuestro de carbono a nivel estatal en el sureste de México.

Los valores estimados de productividad primaria neta a partir de los NDVI presentan una tendencia similar con aquellos datos generados por medios tradicionales, así como con los valores estimados para los grandes biomas a escala global. Esto indica que el NDVI resultó ser un buen indicador de la productividad primaria neta de la vegetación del Estado de Oaxaca.

Los resultados obtenidos a partir de los NDVI reafirman que las selvas perennes del Estado de Oaxaca son el tipo de vegetación con la mayor productividad primaria neta, en comparación con los matorrales o los pastizales, lo que concuerda con el comportamiento de la productividad primaria neta global. Sin embargo estudios recientes señalan que más del 1% de las selvas del mundo está siendo convertidas a zonas agrícolas o siendo destruidas cada año, transfiriéndose por ello un estimado de 1.6 a 2.4 Gt de C cada año de la biosfera a la atmósfera (Grace et al. 2001). Producto de esta conversión el papel convencional de las selvas como sumideros y estabilizadores del carbono atmosférico está cambiando, afectando el balance entre el CO₂ de la biosfera y la atmósfera.

Los bosques templados siempre verdes también representan una fuente importante de productividad primaria neta a nivel mundial y en el Estado de Oaxaca. A nivel mundial se ha estimado que la captura de carbono por parte de los bosques templados es de 1.4 a 2.8 t C ha⁻¹, menor que las selvas pero mayor con respecto a los demás tipos de vegetación. Sin embargo históricamente los bosques templados han sido

el tipo de vegetación más explotado por la humanidad. La agricultura es la principal forma de conversión de los bosques, ésta modificación no solo altera la cobertura vegetal también altera los ciclos de secuestro de carbono tanto a nivel aéreo como subterráneo. Grandes cantidades de carbono han sido vertidos a la atmósfera por parte de la conversión de los bosques templados a la agricultura (Reich y Bolstad 2001). Lo anterior pone de manifiesto que la conversión de las selvas y los bosques a pastizales o cultivos estaría alterando no solo las condiciones del suelo y el clima local, sino que también la dinámica espacial y temporal de la productividad primaria y el secuestro de carbono.

A pesar de que se ha dicho que los datos de NDVI son poco eficientes para determinar la productividad primaria neta en vegetación siempre verde (bosques templados y selvas altas perennifolias) (Paruelo et al. 1997), en el caso del Estado de Oaxaca, el NDVI resultó un buen indicador de los periodos fenológicos tanto de la vegetación perennes como de la caducifolia.

Existen dos patrones fenológicos, el primero de ciclos de crecimiento anual relacionado con los tipos de vegetación siempre verde; mientras que el segundo es un patrón fenológico estacional, relacionado con los tipos de vegetación caducifolios. El análisis espectral resaltó la relación que existe entre los procesos fenológicos de las plantas y la precipitación, sugiriendo que la productividad primaria neta esta regulada por los patrones de precipitación. Así mismo queda expuesto que además del ciclo anual natural que cumplen los distintos tipos de vegetación, cada uno tiene una respuesta distinta a periodos específicos de lluvia, lo que se refleja en la cantidad de días que tarda la vegetación en proyectar, vía los NDVI, las condiciones favorables de disponibilidad del agua.

Finalmente, una de las implicaciones más importantes del presente trabajo es que se pueden plantear criterios geográficos y ecológicos para la conservación de los recursos naturales, particularmente sobre la vegetación. Con ésta información se puede hacer un

mapa de vulnerabilidad y resiliencia de la vegetación bajo presiones de manejo de recursos, deforestación y cambio climático, que ayudaría a la creación de estrategias de mitigación y conservación de los recursos naturales de la vegetación de Oaxaca (diversidad biológica, productividad, recursos maderables y no maderables, entre otros).

El nivel de resolución de la información permite monitorear la conservación y degradación de la vegetación en amplias escalas espaciales y temporales, en paisajes complejos y diversos biológicamente como lo es el Estado de Oaxaca.



6. BIBLIOGRAFÍA

- Barrett, E. C. y L. F. Curtis, 1999. Introduction to environmental remote sensing. Stanley Thornes (Publishers).
- Blackburn, T. M. y K. J. Gaston, 1996. Spatial patterns in the special richness of birds in the New World. *Ecography* 19:369-376.
- Blair, J. B. y M. A. Hofton, 1999. Modelling laser altimeter return waveforms over complex vegetation using high-resolution elevation data. *Geophysical Research Letters* 26: 2509-2512.
- Bonfiglio A., V. Cuomo, M. Landfred y M. Macchiato, 2002. Interfacing NOAA/AVHRR NDVI and soil truth maps for monitoring vegetation phenology at a local scale in a heterogeneous landscape of Southern Italy. *International Journal of Remote Sensing* 20: 4181-4195.
- Box, E., 1975. Quantitative evaluation of Global Primary Productivity Models generated by computers. En: H. Lieth y R. H. Whittaker (Eds.) *Primary Productivity of the Biosphere*. Springer-Verlag, pp: 266-283.
- Bubier, J. L., G. Bhatia, T. R. Moor, N. T. Roulet y P. M. Lafleur, 2003. Spatial and temporal variability in growing-season net ecosystem carbon dioxide exchange at a large peatland in Ontario, Canada. *Ecosystems* 6:353-367.
- Bullock, S. H, H. A. Mooney y E. Medina, 1995. *Seasonally dry tropical forest*. Cambridge University Press, U. K.
- Bürgi, M. y M. G. Turner, 2002. Factors and processes shaping land cover and the land cover changes along the Wisconsin river. *Ecosystems*, 5: 184-201.
- Caldwell, M., 1975. Primary production of grazing lands. En J. P. Cooper (Ed.) *Photosynthesis and productivity in different environments*. Cambridge University Press, pp: 41-73.
- Caraux D. y B. Lacaza, 2003. Monitoring Leaf Area Index of Mediterranean oak woodlands: comparison of remote-sensed estimates with simulations from an ecological process-based model. *International Journal of Remote Sensing* 17: 3441-3456.
- Challenger, A., 1998. Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres en México: pasado, presente y futuro. CONABIO-Instituto de Biología UNAM-Agrupación Sierra Madre, S.C., México.
- Chapin III, F. S., P. A. Matson y H. A. Mooney, 2002. *Principles of terrestrial*

- ecosystem ecology. Springer, N.Y.
- Chidumayo, E. N., 2001. Climate and phenology of savanna in southern Africa. *Journal of Vegetation Science* 12: 347-354.
- Churkina, G. Y S. W. Running, 1998. Contrasting climatic controls on the estimated productivity of global terrestrial biomes. *Ecosystems* 1: 206-215.
- Ciais, P., P. Friedlingstein, A. Friend y D. Schimel, 2001. Integrating global models of terrestrial primary productivity. En J. Roy, B. Saugier y H. A. Mooney (Eds.) *Terrestrial global productivity*. Academic Press, pp. 449-473.
- Cihlar, J., L. St.-Laurent y J. A Dyer, 1991. Relation between the Normalized Difference Vegetation Index and ecological variables. *Remote Sensing of Environment* 35:279-298.
- Cooper, J. P., 1975. *Photosynthesis and Productivity in different environments*. Cambridge University Press, London.
- Cramer, W., R. J. Olson, S. D. Prince, J. M. O. Scurlock y Miembros del Global Primary production Data Initiative, 2001. Determining present patterns of global productivity. En J. Roy, B. Saugier y H. A. Mooney (Eds.) *Terrestrial Global Productivity*. Academic Press, pp. 429-448.
- Curran, P. J., 1994. Attempts to drive ecosystem simulation models at local to regional scales. En: G. M. Foody y P. J. Curran (Eds.) *Environmental Remote Sensing From Regional to Global Scales*. John Wiley & Sons, pp: 149-166.
- Dale, V. H., 2001. Climate change and forest disturbances. *Bioscience*, 51:723-735.
- Daniel, K., P. Lundberg y P. Niemela, 1996. Species richness in mammalian herbivores: patterns in the boreal zone. *Ecography* 29: 404-409.
- Dávila, A., P. y M. Sousa, 1991. *Flora de Oaxaca. 1: Guía de autores e introducción sobre aspectos físico-ambientales y vegetación*. Herbario Nacional de México, Instituto de Biología, UNAM, México.
- Davis, F. W. y D. Roberts, 2000. Stands structure in terrestrial ecosystems. En: O. E. Sala, R. B. Jackson, H. A. Mooney y R. W. Howarth (Eds.) *Methods in Ecosystem Science*. Springer-Verlag, pp: 7-30.
- Dubayah, R. O. y J. B. Drake, 2000. Lidar remote sensing for forestry. *Journal of Forestry* 98: 44-46.
- Eckardt, F. E., 1975. Functioning of the biosphere at the primary production level – objectives and achievements. En J. P. Cooper (Ed.) *Photosynthesis and productivity in different environments*. Cambridge University Press, pp: 13.-185.

- Ecological Modelling, Editorial, 2002. The ecology of scale. *Ecological Modelling* 149: 1-4.
- Ecological Modelling, Editorial, 2002. Modeling complex ecological systems: an introduction. *Ecological Modelling* 153: 1-6.
- Ferreira, L. G. Y A. R. Huete, 2004. Assessing the seasonal dynamic of the Brazilian Cerrado vegetation through the use of spectral vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing* 25: 1837-1860.
- Ferrusquía-Villafranca, I., 1998. Geología de México: una sinopsis. En: T. P. Ramamoorthy, R. Bye, A. Lot y J. Fa (Eds.) *Diversidad Biológica de México: Orígenes y distribución*. Instituto de Biología, UNAM, pp. 3-79.
- Field, C. B., J. T. Randerson y C. M. Malmstron, 1995. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 51: 74-88.
- Foster, D. R., G. Motskin y B. Slater, 1998. Land-use history as long-term broad-scale disturbance: Regional forest dynamics in Central New England. *Ecosystems* 1: 96-119.
- García, E., 1981. *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. 3ra edición. Ed. Laros, México.
- Gareth, J., 1979. The measurement of plant growth. En: *Vegetation productivity. Serie: Topics in applied geography*. Logman, pp: 1-97.
- Gilbert, M.A., J. González-Piqueras y J. García-Haro, 1997. Acerca de los Índices de Vegetación. *Revista de Teledetección* 8:1-10.
- Goudriaan, J., J. J. R. Groot y P. W. J. Uithol, 2001. Productivity of agro-ecosystems. En J. Roy, B. Saugier y H. A. Mooney (Eds.) *Terrestrial Global Productivity*. Academic Press, pp. 301-313.
- Goward, S. N., C. J. Tucker y D. Dye, 1985. North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 advanced very high resolution radiometer. *Vegetatio* 64: 3-14.
- Grace, J., Y. Malhi, N. Higuchi y P. Meir, 2001. Productivity of tropical rain forests. En J. Roy, B. Saugier y H. A. Mooney (Eds.) *Terrestrial Global Productivity*. Academic Press, pp. 401-426.
- Graham, A., 1993. Historical factors and biological diversity in Mexico. En: T. P. Ramamoorthy, R. Bye, A. Lot y J. Fa (Eds.) *Biological diversity of Mexico: Origins*

- and distribution. Oxford University Press, N. Y., pp. 109-127.
- Granados, R., T. Reyna, G. Gómez y J. Soria, 2003. Multi-temporal analysis of NOAA-AVHRR-NDVI images for monitoring corn and bean vegetative growth. *International Journal of Remote Sensing* 25: 1615-1628.
- Groten, S. M., E y R. Ocatre, 2002. Monitoring the length of the growing season with NOAA. *International Journal of Remote Sensing* 14: 2797-2815.
- Gufirschman, J. P., J. M. Paruelo, C. Di Bella, M. C. Giallorenzi y F. Pacini, 2003. Land cover classification in the Argentine Pampas using multi-temporal Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing* 24: 3381-3402.
- Heilman, G. E. Jr., J. M. Strtttholt, N. C. Slosser y D. A. Dellasala, 2002. Forest fragmentation of the conterminous United States: assessing forest intactness through road density and spatial characteristics. *BioScience* 52: 411-423.
- Hicke, J. A., G. P. Asner, E. S. Kasischke, N. H. F. French, J. T. Randerson, G. J. Collatz, B. J. Stocks, C. J. Tucker, S. O. Los y C. B. Field, 2003. Postfire response of North American boreal forest net primary productivity analyzed with observations. *Global Change Biology* 9:1145-1157.
- Hill, M. J. y G. E. Donald, 2003. Estimating spatio-temporal patterns of agricultural productivity in fragmented landscape using AVHRR NDVI time series. *Remote Sensing of Environment* 84: 367-384.
- Hoefs, M., 1984. Productivity and carrying capacity of subarctic sheep winter range. *Artic* 37: 142-147.
- Hoffer, R. M., 1978. Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data. En: P. H. Swain y S. M. Davis (Eds.) *Remote Sensing: the Quantitative Approach*. McGraw Hill Inc., pp. 227-289.
- Holben, B., 1986. Characteristics of maximum value composite image for temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* 7: 1417-1434.
- Holmgren, M., M. Scheffer, E. Ezcurra, J. R. Gutiérrez y G. M. J. Moren, 2001. El Niño effect on the dynamics of terrestrial ecosystems. *TRENDS in Ecology & Evolution* 16 (2): 89-94.
- Hope, A. S, W. I. Boynton, D. A. Stow y D. C. Douglas, 2003. Interannual growth dynamics of vegetation in the Kuparuk River Watershed, Alaska based on the Normalized Difference Vegetation Index. *International Journal of Remote Sensing* 17:3413-3425.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 2002. Conjunto de

- datos vectoriales de la carta de Uso de Suelo y Vegetación. Serie II. Mapa escala 1:250,000., México.
- Jackson, R. B., M. J. Lechowicz, X. Li y H. A. Mooney, 2001. Phenology, growth, and allocation in global terrestrial productivity. En J. Roy, B. Saugier y H. A. Mooney (Eds.) *Terrestrial Global Productivity*. Academic Press, pp. 61-83.
- Jobbagy, E. G., O. E. Sala y J. M. Paruelo, 2002. Patterns and controls of primary production in the Patagonia steppe: a remote sensing approach. *Ecology* 83 (2): 307- 319.
- Kira, T., 1975. Primary production of forests. En J. P. Cooper (Ed.) *Photosynthesis and productivity in different environments*. Cambridge University Press, pp: 5-40.
- Kitayama, K. Y S. Aiba, 2002. Ecosystem structure and productivity of tropical rain forests along altitudinal gradients with contrasting soil phosphorus pools on Mount Kinabalu, Borneo. *Journal of Ecology* 90:37-51.
- Koutsias, N. y M. Karteris, 2003. Classification analyses of vegetation for delineating forest fire fuel complex in a Mediterranean test site using satellite remote sensing and GIS. *International Journal of Remote Sensing* 15: 3093-3104.
- Lefsky, M. A, W. B. Cohen, G. G. Parker y D. J. Harding, 2002. Lidar remote sensing for ecosystem studies. *Bioscience* 52:19-30.
- Lieth, H, 1975. Primary production of major vegetation units of the world. En H. Lieth y R. H. Whittaker (Eds.) *Primary Productivity of the Biosphere*. Springer-Verlag, pp: 203-231.
- Lieth, H y R. H. Whittaker, 1975. *Primary productivity of the biosphere*. Springer-Verlag, N.Y.
- Lorence, D. H. y A. García M., 1989. Oaxaca, México. En: Campbell D. G y H. D. Hammond (Eds.) *Floristic inventory of Tropical Countries*. The New York Botanic Garden, pp. 243-268.
- Lookingbill, T. R. y D. L. Urban, 2003. Spatial estimation of air temperature differences for landscape-scale studies in montane environments. *Agricultural and forest meteorology* 114: 141- 151.
- Lozano-García, D. F., R. N. Fernández y C. J. Johannsen, 1991. Assessment of regional biomass-soil relationships using vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 29:v331-338.
- Manzo-Delgado, L. y J. A. Meave, 2003. La vegetación vista desde el espacio: la fenología foliar a través de la percepción remota. *Ciencia*, julio-septiembre:18-28.

- Markon, C. J. y K. M. Peterson, 2002. The utility of estimating net primary productivity over Alaska using baseline AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing* 23: 4571-4596.
- Marques, M. C. M., J. J. Roper y A. P. Baggio Salvalaggio, 2004. Phenological patterns among life-forms in a subtropical forest in southern Brazil. *Plant Ecology* 173: 203-213.
- Maxwell, A. K., R. M. Hoffer y P. L. Chapman, 2002. AVHRR channel selection for land cover classification. *International Journal of Remote Sensing* 23: 5061- 5073.
- McNaughton, S. J., M. Oesterheld, D. A. Frank y K. J. Williams, 1989. Ecosystem-level patterns of primary productivity and herbivory in terrestrial habitats. *Nature* 341: 142-144.
- Melillo, J. M., A. D. McGuire, D. W. Kicklighter, B. Moore III, C. J. Vorosmarty y A. L. Scloss. Global climate change ad terrestrial net primary production. *Nature* 363: 234-240.
- Moreau, S., R. Bosseno, X. Fa Gu y F. Baret, 2003. Assessing the biomass dynamic of Andean *bofedal* and *titora* high-protein wetland grasses from NOAA/AVHRR. *Remote Sensing of Environment* 85:516-529.
- Myneni, R. B., C. D. Keeling, C. J. Tucker, G. Asrar y R. R. Nemani, 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes between 1981-1991. *Nature* 386: 698-702.
- Narasimha Roa, P. V., L. Venkataratnam, P. V. Krishna Roa y Ramana K. V., 1993. Relation between root zone soil moisture and Normalized Difference Vegetation Index of vegetation fields. *International Journal of Remoter Sensing* 14: 441-449.
- Odum, E., 1971. *Fundamentals of ecology*. Saunders, U.S.A.
- Ohta, S., Z. Uchijima y Y. Oshima, 1993. Probable effects of CO₂-induced climatic changes on net primary productivity of terrestrial vegetation in East Asia. *Ecological Research* 8: 199-213.
- Ollinger, S. V., M. L. Smith, M. E. Martin, R. A. Hallet, C. L. Goodale y J. D. Aber, 2002. Regional variation in foliar chemistry and N cycling among a forest of diverse history and composite. *Ecology* 83: 339-355.
- Olson, J. S., 1964. Gross and net production of terrestrial vegetation. *Journal of Ecology* 52 (Supl.): 99-118.
- Paruelo, J. M., M. R. Aguiar, R. A. Golluscio, R. J. C. León y G. Pujol, 1993. Environmental controls of NDVI dynamics in Patagonia based on NOAA-AVHRR

- satellite data. *Journal of Vegetation Science* 4: 425-428.
- Paruelo, J. M. y W. K. Lauenroth, 1995. Regional patterns of Normalized Differences Vegetation Index in North American shrublands and grasslands. *Ecology* 76:1888-1898.
- Paruelo, J. M., H. E. Epstein, W. K. Lauenroth e I. C. Burke, 1997. ANPP estimates from NDVI for the central grass region of the United States. *Ecology* 78 (3): 953-958.
- Paruelo, J. M. y W. K. Lauenroth, 1998. Interannual variability of NDVI and its relationship to climate for North American shrublands and grasslands. *Journal of Biogeography* 25: 721-733.
- Paruelo, J. M., E. G. Jobbagy, O. E. Sala, W. K. Lauenroth y I. C. Burke, 1998. Functional and structural convergence of temperate grassland and shrubland ecosystems. *Ecological Application* 8:194-206.
- Paruelo, J. M., I. C. Burke y W. K. Lauenroth, 2001. Land-use impact on ecosystem functioning in eastern Colorado, USA. *Global Changes Biology* 7: 631-639.
- Paruelo, J. M., E. G. Jobbágy y O. E. Sala, 2001. Current distribution of ecosystem functional types in Temperate South America. *Ecosystems* 4: 683-698.
- Pelkey, N. W., C. J. Stoner y T. M. Caro, 2003. Assessing habit protection regimes in Tanzania using AVHRR NDVI composites: comparisons at different spatial and temporal scales. *International Journal of Remote Sensing* 24: 2533-2558.
- Raich, J. W., A. E. Russell y P. M. Vitousek, 1997. Primary productivity and ecosystem development along an elevational gradient on Mauna Loa, Hawaii. *Ecology* 78: 707-721.
- Reich, P. B. y P. Bolstad, 2001. Productivity of evergreen and deciduous temperate forests. En J. Roy, B. Saugier y H. A. Mooney (Eds.) *Terrestrial Global Productivity*. Academic Press, pp. 245-283.
- Ricotta, C y G. C. Avena, 2000. Analysis of the spatial distribution of net primary productivity across Corsica (France) using the echelon approach. *International Journal of Remote Sensing* 11: 2301-2306.
- Rosenzweig, M. L., 1968. Net primary productivity of terrestrial communities: prediction from climatological data. *The Am. Nat.* 102 (923): 67-74.
- Roy, J., 2001. How does biodiversity control primary productivity?. En J. Roy, B. Saugier y H. A. Mooney (Eds.) *Terrestrial Global Productivity*. Academic Press, pp. 169-186.

- Ruimy, A., B. Saugier, y G. Dedieu, 1994. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production for remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research* 99: 5263-5283.
- Running, S. W. y S. T. Gower, 1991. FOREST-BGC: a general model of forest ecosystem processes for regional applications. Part II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. *Tree physiology* 9: 147-160.
- Running, S. W., P. E. Thornton, R. Nemani y J. M. Glassy, 2000. Global terrestrial gross and net primary productivity from the Earth Observing System. En: O. E. Sala, R. Jackson, H. Mooney y R. Howarth (Eds.) *Methods in Ecosystem Science*. Springer, pp. 44-57.
- Sarkar, S. y M. Kafatos, 2004. Interannual variability of vegetation over the Indian sub-continent and its relation to the different meteorological parameter. *Remote Sensing of Environment* 90: 268-280.
- Sala, O. E. Y A. T. Austin, 2000. Methods of estimating aboveground net primary productivity. En: O. E. Sala, R. Jackson, H. Mooney y R. Howarth (Eds.) *Methods in Ecosystem Science*. Springer, pp. 31-43.
- Salina-Zavala, C. A, A. V. Douglas y H. F. Diaz, 2002. Interannual variability of NDVI in northwest Mexico. Associated climatic mechanisms and ecological implications. *Remote Sensing of Environment* 82:417-430.
- Scanlon, T. M., J. D. Albertson, K. K. Caylor y C. A. Williams, 2002. Determining land surface fractional cover from NDVI and rainfall time series for a savanna ecosystem. *Remote Sensing of Environment* 82: 376- 388.
- Schultz, p. A. y M. S. Halpert, 1993. Global correlation of temperature, NDVI and precipitation. *Advances in Space Research* 13: 277-280.
- Scurlock, L. M. O. y R. J. Olson, 2002. Terrestrial net primary productivity- a brief history and a new worldwide database. *Environmental Review* 10: 91-109.
- Shariff, A. R., M. E. Biondini y C.E. Grygiel, 1994. North Dakota grassland net primary productivity and plant nitrogen dynamics as a function of grazing intensity. *Prairie Naturalist* 26: 229-240.
- Silver, W. L., 1998. The potential effect of elevated CO₂ and climate change on tropical forest biochemical cycling. *Climatic Change* 39: 337-361.
- Soriano, A., J. M. Paruelo, 1992. Biozones, vegetation units defined by functional characteristics identifiable with the aid of satellite sensor images. *Global Ecology*

- and biogeography letters 2: 82-89.
- Suzuki, R., S. Tanaka y T. Yasunari, 2000. Relationships between meridional profiles of satellite-derived vegetation index (NDVI) and climate over Siberia. *International Journal of Climatology*
- Suzuki, R., T. Nomaki y T. Yasunari, 2001. Spatial distribution and its seasonality of satellite-derived vegetation index (NDVI) and climate in Siberia. *International Journal of Climatology* 21: 1321-1335.
- Suzuki, R., T. Nomaki y T. Yasunari, 2003. West-east contrast phenology and climate in northern Asia revealed using a remotely sensed vegetation index. *International Journal of Biometeorology* 47: 126- 138.
- Tamayo, J. L., 1999. *Geografía moderna de México*. Decimoprimer edición, Trillas, México.
- Therrell, M. D., D. W. Stahle y M. K. Cleaveland, 2002. Warm season tree growth and precipitation over Mexico. *Journal of Geophysical Research* 107: 1-8.
- Toledo, V. M., 1988. La diversidad biológica de México. *Ciencia y Desarrollo* 81: 17-30.
- Toledo, V. M. Y M. J. Ordóñez, 1998. El panorama de la biodiversidad de México: una revisión de los hábitats terrestres. En: T. P. Ramamoorthy, R. Bye, A. Lot y J. Fa (Eds.) *Diversidad Biológica de México: Orígenes y distribución*. Instituto de Biología, UNAM, pp. 739-757.
- Tucker, C. J. C. V. Vanpraet, M. J. Sharman y G. Vanlittersun, 1985. Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel: 1980-1994. *Remote Sensing Environment* 17: 233-249.
- Velázquez, A. E. Durán, I. Ramírez, J. F. Mas, G. Bocco, G. Ramírez y J. L. Palacio, 2003. Land use-cover change processes in highly biodiverse areas: the case of Oaxaca Mexico. *Global Environmental Change* 13: 175-184.
- VEMAP (Vegetation/Ecosystem Modeling and Analysis project) Members, 1995. Comparing biogeography and biochemistry models in a continental scale study of terrestrial ecosystem responses to climate change and CO₂ doubling. *Global Biogeochem. Cycl.* 9:407- 437.
- Veron, S. R., J. M. Paruelo, O. E., Sala y W. K. Lauenroth, 2002. Environmental controls of primary production in agricultural systems of the Argentine Pampas. *Ecosystems* 5:625-635.
- Vitousek, P. M., P. R. Ehrlich, A. H. Ehrlich y P. Matson, 1986. Human appropriation of

- the products of photosynthesis. *Bioscience* 36: 368-373.
- Wali, M. K., 1999. Ecological succession and rehabilitation of disturbed terrestrial ecosystems. *Plant and Soil* 213:195-220.
- Wang, X., Z. Feng y Z. Ouyang, 2001. The impact of human disturbance on vegetation carbon storage in forest ecosystems in China. *Forest, Ecology and Management*, 148: 117-123.
- Wang, H., C. A. S. Hall, F. N. Scatena, N. Fetcher y W. Wu, 2003. Modeling the spatial and temporal variability in climate and primary productivity across the Luquillo Mountains, Puerto Rico. *Forest Ecology and Management* 179:69-94.
- Wang, J., P. M. Rich y K. P. Price, 2003. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing* 11:2345-2364.
- Waring, R. H. y S. W. Running, 1998. *Forest ecosystems, analysis of multiple scales*. Academic Press, U.S.A.
- Wessman, C. A., 1992. Spatial Scales and global change: Bridging the gap from plots to GCM Grid Cells. *Annual Review Ecology System* 23:175-200.
- Wessman, C. A. y G. P. Asner, 1998. Ecosystems and problems of measurement at large spatial scales. En: M. L. Pace y P. M. Groffman (Eds.) *Successes, Limitations and Frontiers in Ecosystems Science*. Springer, pp: 347-371.
- Whittaker, R. H. y P. L. Marks, 1997. Methods of assessing terrestrial productivity. En H. Lieth y R. H. Whittaker (Eds.) *Primary Productivity of the Biosphere*. Springer-Verlag, pp: 55-118
- White, M. A., R. R. Nemani, P. E. Thornton y S. W. Running, 2002. Satellite evidence of phenological differences between urbanized and rural areas of the eastern United States deciduous broadleaf forest. *Ecosystems* 5: 260-277.
- Wulder, M. A. y S. E. Franklin, 2003. Remote sensing of forest environments, introduction. The transition from theory to information. En: M. A. Wulder y S. E. Franklin (Eds.) *Remote sensing of forest environments, concepts and case studies*. Kluwr Academic Press, pp: 3-12.
- Yang, W., L. Yang y J. W. Merchant, 1994. AVHRR-derived NDVI and ecoclimatological parameters: relationships, spatial and temporal variabilities. ASPRS/ACSM.
- Yu, F., K. P. Price, J. Ellis y P. Shi, 2003. Response of seasonal vegetation development to climatic variations in eastern central Asia. *Remote Sensing of*

Environment 87:42-54.

Zarin, D. J., M. J. Ducey, J. M. Tucker y W. A. Sala, 2001. Potential biomass accumulation in Amazonian regrowth forest. Ecosystems 4: 658-668.

6.1 PÁGINA DE INTERNET UTILIZADA:

<http://ingrid.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP>