

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



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

**RESPUESTA DE LA VEGETACIÓN A LA VARIABILIDAD
CLIMÁTICA Y SUS IMPLICACIONES EN LA
CONSERVACIÓN DEL BOSQUE TEMPLADO EN LA
SIERRA MADRE ORIENTAL**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADA EN GEOGRAFÍA**

**PRESENTA
VIOLETA LETICIA ARRIOLA VILLANUEVA**

**ASESORA DE TESIS
DRA. LETICIA GÓMEZ MENDOZA**



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.

Índice

Resumen	1
I. Introducción	2
I. I Efectos de la variabilidad climática en la vegetación.....	2
I. II Resistencia y resiliencia de la vegetación	4
I. III Vulnerabilidad de los ecosistemas a los cambios en el clima.....	4
I. IV Vulnerabilidad de los ecosistemas a los eventos meteorológicos extremos.....	6
I. V Utilización del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI en el estudio de la influencia del clima en los ecosistemas	6
I. VI Influencia del cambio de uso del suelo en el verdor de la vegetación.....	10
II. Planteamiento del problema.....	11
III. Hipótesis	13
IV. Objetivos	13
Capítulo 1. Entorno geográfico y proyectos de conservación en la Sierra Madre Oriental	15
1.1 La Sierra Madre Oriental	15
1.2 Delimitación del área de estudio.....	16
1.3 Aspectos geográficos físicos.....	19
1.4 Exposición a eventos climáticos	23
1.5 Población.....	23
1.6 Actividades económicas y manejo del bosque.....	26
1.7 Proyectos de conservación en la región	30
Capítulo 2. Metodología	35
2.1 Datos	35
2.1.1 Precipitación	36
2.1.2 Vegetación (NDVI)	38
2.1.3 Humedad del suelo	40
2.2 Ciclo anual de la precipitación, la temperatura, la humedad del suelo y el NDVI	41
2.3 Retraso en la respuesta del NDVI a la precipitación y la humedad del suelo.....	41
2.4 Identificación de eventos extremos.....	43
2.5 Cambio de uso de suelo y cubierta vegetal	44
2.5.1 Tasas de cambio de uso de suelo	44

Capítulo 3. Resultados	45
3.1 Moduladores del clima en la Sierra Madre Oriental	45
3.1.1 El Niño-Oscilación del Sur.....	45
3.1.2 Influencia del paso de ciclones tropicales en la precipitación.....	46
3.2 Efectos del ciclo anual de precipitación, temperatura y humedad del suelo en la vegetación	49
3.3 Retraso en la respuesta del NDVI a la precipitación y la humedad del suelo.....	53
3.4 Respuesta de la vegetación a la variabilidad climática (1982-2002).....	57
3.4.1 Periodo 1996.....	60
3.4.2 Periodo 1998.....	64
3.5 Respuesta de la vegetación a la variabilidad climática (2000-2011).....	68
3.5.1 Periodo 2004.....	70
3.5.2 Periodo 2011.....	75
3.6 Cambio de uso del suelo.....	81
Discusión	86
Conclusiones	93
Referencias	95

Índice de figuras

Figura 1.1 Ecorregiones terrestres de México. Nivel II.....	16
Figura 1.2 Delimitación del área de estudio	18
Figura 1.3 Hojas de <i>Liquidambar styraciflua</i> y conos de <i>Pinus</i>	21
Figura 1.4 La Trinidad, Xilitla, San Luis Potosí. Bosques templados.....	22
Figura 1.5 Población Teenek.....	25
Figura 1.6 Mapa de la distribución de los pueblos indígenas	26
Figura 1.7 Actividad pecuaria en bosque de liquidámbar	28
Figura 1.8 Labor del comisariado ejidal de Pockchich, San Antonio, San Luis Potosí.....	29
Figura 1.9 Corredor Ecológico de la Sierra Madre Oriental y Áreas Naturales Protegidas.	32
Figura 2.1. Bosque templado en la Sierra Madre Oriental	35
Figura 2.2 Cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	39
Figura 3.1 Anomalías promedio de precipitación (mm) entre junio y agosto en la SMO a partir de veranos con condiciones a) El Niño y b) La Niña	46
Figura 3.2 Efectos del paso de ciclones tropicales en la precipitación de la zona de estudio.....	47
Figura 3.3 Anomalías de precipitación asociadas con el paso de ciclones tropicales en el Golfo de México ..	48
Figura 3.4 Relación del NDVI con el ciclo anual de precipitación, humedad del suelo y temperatura.....	50
Figura 3.5 Valores promedio de NDVI para: a) marzo, b) junio, c) septiembre y d) diciembre (1982-2002) .	52
Relación de la función de NDVI con la función (suma) de la precipitación y la humedad del suelo:	
Figura 3.6 Zona 1.....	54
Figura 3.7 Zona 2	55
Figura 3.8 Zona 3	56
Figura 3.9 Anomalías de NDVI, humedad del suelo y SPI-3 (1982-2002).....	59
Figura 3.10 Trayectoria del Huracán Dolly, agosto de 1996.....	60
Relación SPI-3, anomalía de humedad del suelo y anomalía de NDVI (1996-1997)	
Figura 3.11 Zona 1.	61
Figura 3.12 Zona 2	61
Figura 3.13. Zona 3	62
Figura 3.14 Anomalía de NDVI (noviembre 1996) y SPI-3 (octubre 1996).....	63
Figura 3.15 Anomalía de NDVI (noviembre 1996) y anomalía de humedad del suelo (octubre 1996).....	63
Relación SPI-3, anomalía de humedad del suelo y anomalía de NDVI (1997-1998)	
Figura 3.16 Zona 1	65
Figura 3.17 Zona 2	65

Figura 3.18 Zona 3	66
Figura 3.19 Anomalía de NDVI (septiembre 1998) y SPI-3 (mayo 1998).....	67
Figura 3.20 Anomalía de NDVI (septiembre 1998) y anomalía de humedad del suelo (mayo 1998).....	67
Figura 3.21 Anomalías de precipitación, humedad del suelo y NDVI (2000-2012)	69
Relación anomalía de precipitación, anomalía de humedad del suelo y anomalía de NDVI (2004-2005).	
Figura 3.22 Zona 1.....	70
Figura 3.23 Zona 2	71
Figura 3.24 Zona 3	72
Figura 3.25. Anomalía de NDVI (primera quincena de junio, 2004) y anomalía de precipitación (segunda quincena de mayo, 2004).....	73
Figura 3.26 Anomalía de NDVI (primera quincena de junio, 2004) y anomalía de humedad del suelo (primera quincena de junio, 2004)	73
Figura 3.27 Anomalía de NDVI (segunda quincena de septiembre, 2004) y anomalía de precipitación (primera quincena de septiembre, 2004)	74
Figura 3.28 Anomalía de NDVI (segunda quincena de septiembre, 2004) y anomalía de humedad del suelo (primera quincena de septiembre, 2004)	74
Figura 3.29 Túneles de gusano descortezador <i>Dendroctonus</i> , La Trinidad, Xilitla	75
Figura 3.30 a) 29 de junio de 2011. Tormenta tropical Arlene. b) 17 de julio de 2011. Aire tropical.....	76
Relación anomalía de precipitación, anomalía de humedad del suelo anomalía de NDVI (2010-2011).	
Figura 3.31 Zona 1.....	76
Figura 3.32 Zona 2	77
Figura 3.33 Zona 3	77
Figura 3.34 Anomalía de NDVI (primera quincena de junio 2011) y anomalía de precipitación (segunda quincena de mayo 2011).....	78
Figura 3.35 Anomalía de NDVI (primera quincena de junio, 2011) y anomalía de humedad del suelo (primera quincena de junio, 2011)	78
Figura 3.36 Anomalía de NDVI (segunda quincena de agosto, 2011) y anomalía de precipitación (primera quincena de julio, 2011)	80
Figura 3.37 Anomalía de NDVI (segunda quincena de agosto, 2004) y anomalía de humedad del suelo (primera quincena de julio, 2004).....	80
Figura 3.38 Superficie de los principales usos del suelo en la zona 1 para 1976 (Serie I) y 2000 (Serie II)	83
Figura 3.39 Superficie de los principales usos del suelo en la zona 2 para 1976 (Serie I) y 2005 (Serie III)...	84
Figura 3.40 Superficie de los principales usos del suelo en la zona 3 para 1976 (Serie I) y 2005 (Serie III)...	85

Índice de tablas

Tabla 1.1 Municipios de la Sierra Madre Oriental	24
Corrimientos para la precipitación y la humedad del suelo	
Tabla 3.1 Zona 1	54
Tabla 3.2 Zona 2	55
Tabla 3.3 Zona 3	56
Tasas de deforestación para la región de la Sierra Madre Oriental	
Tabla 3.4 Zona 1	82
Tabla 3.5 Zona 2	83
Tabla 3.6 Zona 3	84

Dedicatoria

A mi madre Leticia Villanueva por su ayuda y apoyo incondicional durante toda una vida, por ser un ejemplo de esfuerzo y sabiduría.

A Luis Alberto por ser una de mis mayores fuerzas,
por darme los mejores consejos, por su ayuda
y solidaridad.

A Lulú, Rocío, Daribel, Aline, Marco e Iván por su valiosa amistad,
por las largas pláticas de reflexión y por las muestras
de apoyo y cariño que me han dado siempre.

A mi familia Alegría Mestiza por su comprensión
y por los ánimos que me dan para seguir adelante.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por ser la institución que me permitió estudiar, aprender, tropezar y salir adelante. De igual manera, a mis maestros, les agradezco las enseñanzas, no sólo por el conocimiento adquirido, sino por ayudarme a mejorar como persona y como alumna.

A mi asesora la **Dra. Leticia Gómez Mendoza** por el apoyo académico y personal, por el buen trato, por los consejos y por su amplio conocimiento. Agradezco la confianza que tuvo en mi desde el principio, porque fue la que me mantuvo hasta el final, a pesar de los momentos difíciles.

Al **Mtro. José Manuel Espinoza Rodríguez** por ser uno de los mejores maestros de la carrera, por sus clases, sus aportaciones y consejos en todo momento.

Al **Dr. Víctor Orlando Magaña Rueda** por sus observaciones y recomendaciones al trabajo, por su conocimiento del tema y sus valiosas aportaciones.

A la **Mtra. Angélica Margarita Franco González** por su revisión y retroalimentación a la estructura de la tesis. Por su amabilidad y buen trato durante la revisión del trabajo.

Al **Dr. José Abraham Navarro Moreno** porque con sus aportaciones se mejoró de manera sustancial el orden de la investigación, por el buen trato y la revisión profunda y acertada de la tesis.

A **Luis Clemente López Bravo** por brindarme los datos de precipitación, su amable trato y disposición.

A **Luis Manuel Galván Ortiz**. por su conocimiento, apoyo y asesoramiento en la obtención de datos y la realización de la cartografía. Por la revisión de la tesis y los buenos consejos.

A **Luis Eduardo Herrera Aztegui** y **Sigrid Morett González** por su valiosa ayuda en la aplicación del análisis de Fourier a las series de datos y la obtención de la ecuación de igualdad.

Al equipo de trabajo de la **Agenda Ambiental** de la **Universidad de San Luis Potosí**, por su apoyo en el trabajo de campo y de gabinete. Un agradecimiento especial a **Jesús Izaguirre** por su ayuda en el manejo de los Sistemas de Información Geográfica.

A **José Antonio Ávalos Lozano** por su conocimiento de la cultura teneek y por compartir su trabajo de investigación y análisis.

A las comunidades de Pokchich y La Trinidad por compartir sus conocimientos sobre la región y el manejo del bosque templado, por el buen recibimiento y cordialidad.

Esta investigación fue apoyada por:

El **Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza** (PAPIME) de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA), UNAM. Mediante el otorgamiento de la beca "Tesis de Licenciatura" dentro del proyecto: Mejoramiento y Actualización de la Enseñanza en Climatología del Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, con clave: PE301212.

Resumen

Los bosques templados representan el ecosistema forestal de mayor cobertura en México, 16.45% del territorio. En la Sierra Madre Oriental tienen un alto valor económico y ambiental por ser la principal fuente de madera en la región, por su contribución al ciclo hidrológico, por su valor estético y por fungir como potenciales sumideros de carbono. Sin embargo, algunos estudios indican que sus tasas de deforestación anual, a nivel nacional, alcanzan las 200 mil hectáreas al año aproximadamente, y aunado a esto son de los ecosistemas más vulnerables ante el cambio climático. En el presente trabajo se estudió la influencia del clima en este ecosistema, a través de la relación entre el verdor de la vegetación, medido a partir del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), y la variabilidad climática intra-anual e interanual, como una aproximación de la sensibilidad del bosque templado ante eventos extremos del clima.

Se identificaron la precipitación y la humedad del suelo como las principales variables relacionadas con el verdor o salud de la vegetación, los resultados apuntan a que las correlaciones entre la precipitación y el valor de NDVI aumentan si se considera un mes de retraso generalmente, con el NDVI aumentando a mayor precipitación siempre y cuando no se exceda un umbral que se encuentra entre 70 mm y 130 mm de lluvia quincenal. El efecto de las sequías sobre la vegetación depende de su duración y del mes en que se inicie, en la región se encontró que la anomalía negativa de NDVI es mayor si el déficit de precipitación se presenta al inicio de la temporada de lluvias. De igual forma se realizó un análisis de la pérdida de cobertura vegetal y los resultados indican tasas de cambio negativas en general, mayores hacia la zona sur de la región; sin embargo, éstas no parecen tener influencia en las tendencias de los valores de NDVI.

Este estudio se enmarca dentro del proyecto "Corredor Ecológico de la Sierra Madre Oriental" de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) y la Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GIZ), que tiene como objetivo conservar parte de este y otros ecosistemas en la región, bajo alguna de las figuras legales dentro del sistema nacional de Áreas Protegidas o bien como corredor biológico con áreas de conservación comunitaria.

I. Introducción

México es considerado un país megadiverso debido a que se encuentra entre los cinco países con mayor diversidad de especies en el mundo (Llorente-Bousquets y Ocegueda 2008). En este punto reside la importancia de los estudios que se realicen en torno a la conservación en su territorio, ya que a pesar de contar con un alto número de formas de vida, también tiene altos índices de pérdida y degradación de ecosistemas.

Una de las formas en las que se ha buscado conservar la biodiversidad es a través de las Áreas Naturales Protegidas, que se definen como porciones terrestres o acuáticas del territorio nacional representativas de los diversos ecosistemas, en donde el ambiente original no ha sido esencialmente alterado y que producen beneficios ecológicos. Las Áreas Naturales Protegidas se encuentran dedicadas y manejadas, ya sea por medios legales u otros, con el fin de alcanzar objetivos específicos de conservación a largo plazo, ya sea de la biodiversidad, de los servicios ecosistémicos o de los valores culturales asociados a las mismas (CONANP 2012).

Las diferentes amenazas a las que se enfrenta la biodiversidad tienen que ver con los procesos productivos, la contaminación, el tráfico ilegal de la diversidad biológica, la introducción de especies exóticas, la falta de políticas públicas que protejan la vida silvestre, la pérdida de los hábitats y el cambio climático. En los últimos años, especialmente el cambio climático ha cobrado relevancia y se ha dado mayor importancia al impacto que podría generar este fenómeno en los ecosistemas (Hannah 2011). La extinción de las especies afecta directamente al equilibrio de la vida en la Tierra (Zunino y Zullini 2003), por lo que es relevante conservar el ecosistema al que pertenecen, y comprender los procesos que los mantienen en equilibrio, en diferentes escalas espaciales.

I. I Efectos de la variabilidad climática en la vegetación

El clima, en sentido estricto, se define como una estadística del tiempo atmosférico, tomando en cuenta los valores medios y la variabilidad de magnitudes como la temperatura,

la precipitación o el viento, esto durante períodos de meses hasta millones de años (IPCC 2007). No obstante, se debe tomar en cuenta que el clima depende de un gran número de factores que interactúan entre sí de manera compleja y que hoy en día se piensa en él como un estado cambiante de la atmósfera, mediante sus interacciones con el mar y el continente, en diversas escalas de tiempo y espacio (Magaña 2004).

La variabilidad climática se refiere a las variaciones del estado medio y otras características estadísticas (desviación típica, sucesos extremos, etc.) del clima en todas las escalas espaciales y temporales más amplias que las de los fenómenos meteorológicos (IPCC 2007). Las variaciones climáticas se clasifican en: periódicas, con un ciclo de aparición conocido y predecible como lluvias y monzones; cuasi periódicas, con ciclos recurrentes pero menos predecibles, como el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur, con un periodo de dos a diez años; y aperiódicas, esporádicas, que con su repentino surgimiento afectan la dinámica del sistema climático, como sucede con los ciclones tropicales (Gómez-Mendoza y Galicia 2004).

La relación de las variables climáticas con las especies ha sido expuesta en diversos estudios y artículos, y se ha determinado que los elementos biológicos tienen requerimientos específicos de temperatura, precipitación, humedad, insolación, entre otros, y que de ellos depende su composición y distribución. Asimismo, se han realizado muchos esfuerzos para vincular el estudio del tiempo y el clima con los estudios botánicos y ecológicos (Parmesan 2007; Bonan 2008; Hannah 2011).

Con frecuencia, cambios en la temperatura, la precipitación o la humedad son suficientes para provocar cambios importantes en la tasa de reproducción de las plantas y en el área de distribución, que se entiende como aquella fracción del espacio geográfico donde una especie está presente e interactúa en forma no efímera con el ecosistema, dicha área es una entidad compleja, no homogénea y sobre todo dinámica. El área de distribución puede ampliarse, reducirse, desplazarse, fragmentarse y sufrir otras modificaciones, así como desaparecer con la extinción de su ocupante (Zunino y Zullini 2003).

Se ha estudiado que para determinar el nivel de vulnerabilidad de la biodiversidad al cambio climático, se debe entender primero su relación con el clima y las principales variables que afectarían a los ecosistemas si cambiaran en el futuro.

I. II Resistencia y resiliencia de la vegetación

Analizar la resistencia de los ecosistemas a las variaciones del clima y determinar sus tiempos de respuesta ante eventos extremos y alteraciones en el ciclo anual de variables meteorológicas se enmarca dentro del desarrollo de las teorías de la resiliencia ecológica, que comenzó en 1960 con los intentos de modelar matemáticamente la dinámica de los ecosistemas. Parte de la construcción de los modelos fue crear fronteras que identificaran el funcionamiento de los sistemas. Al hacerlo, se categorizaron los procesos en internos y externos al sistema. El factor externo se refiere a los disturbios y perturbaciones a los que está expuesto el factor interno, que es la estructura y la composición de las diferentes especies (Gunderson *et al.* 2010).

Holling (1973) introdujo la palabra resiliencia para describir tres aspectos que ocurren en un ecosistema a través del tiempo. El primero describe la habilidad de los sistemas de absorber cambios en el estado de las variables y seguir persistiendo; el segundo identifica la cantidad de disturbio que un sistema podría soportar antes de cambiar a una configuración alternativa; y el tercero reconoce la sorpresiva y discontinua naturaleza del cambio en los sistemas, como el colapso de las poblaciones de peces o el brote repentino de gusanos en los abetos del bosque boreal. La resiliencia se refiere, por lo tanto, a la capacidad de las especies de recibir perturbaciones o disturbios y seguir persistiendo. Monitorear esta capacidad requiere de estudios que cubran múltiples escalas: local, regional, nacional e internacional (Gunderson *et al.* 2010).

I. III Vulnerabilidad de los ecosistemas a los cambios en el clima

La vulnerabilidad es el grado al cual un sistema es susceptible e incapaz de hacer frente a los efectos adversos del cambio climático, incluida la variabilidad climática y los eventos extremos (IPCC 2007). Es una función del cambio climático que relaciona los impactos y la

capacidad adaptativa de las especies. Los impactos son una combinación de la exposición y la sensibilidad al cambio climático. La exposición está determinada por los cambios climáticos regionales, mientras que la sensibilidad está en función de la ecología, fisiología y la diversidad genética de las especies, que están siendo influenciadas por factores externos como el tipo de manejo de los recursos y los cambios en el hábitat. La exposición más la sensibilidad generan un impacto potencial, que es el posible daño que podría provocar una amenaza o peligro, a este impacto se le resta la capacidad adaptativa del ecosistema para adaptarse a cambios en el clima, incluyendo su variabilidad y extremos, lo que resulta en la vulnerabilidad (Klausmeyer *et al.* 2011). Un sistema es vulnerable en la medida en la que está expuesto a un peligro.

La vulnerabilidad hace referencia al contexto físico, social, económico y ambiental de una región, sector o grupo social susceptible de ser afectado por un fenómeno meteorológico o climático, y que resulta clave para entender el origen de los desastres. La dinámica de la vulnerabilidad, como elemento multifactorial, debe ser documentada en su pasado reciente y proyectada al futuro para poder hablar de potenciales impactos del cambio climático. Es por ello, que ha sido necesario pasar de la descripción cualitativa a una cuantitativa para priorizar en donde es más necesaria la adaptación. Dado que no existe forma única de calcular la vulnerabilidad ante cambio climático se hace necesario contar con elementos mínimos para evaluarla. Muchos esfuerzos en el mundo van en esta dirección (IPCC 2012, citado por Magaña 2013).

Las respuestas toman por lo general un enfoque naturalista, en donde el peligro de cambios en el clima genera el impacto, y los desastres se explican sólo por los cambios en el clima, sin reconocer el papel que tiene el incremento en la vulnerabilidad debido a la actividad humana (Magaña 2013). Sin embargo, cada vez es más claro que la conservación de la biodiversidad y de sus funciones ecológicas va más allá de establecer reservas y parques naturales protegidos. En los paisajes culturales, resultantes del manejo humano (como los paisajes agrícolas), existe una gran diversidad de especies que puede ser conservada (Martínez 2008). En este sentido se busca disminuir la vulnerabilidad no sólo de los elementos biológicos sino también de las sociedades que viven e interactúan con ellos.

I. IV Vulnerabilidad de los ecosistemas a los eventos meteorológicos extremos

Los eventos extremos del clima son una importante amenaza para la biodiversidad, ya que tienen el potencial de causar impactos significativos en la distribución de las especies y la composición de los hábitats. Aunque se sabe que este tipo de eventos afectan a los ecosistemas, para algunas regiones no es claro el grado de presión que pueden resistir, o cuál es su resiliencia, lo que vuelve difícil establecer cómo los afectará el cambio climático. Por lo tanto, medir el estrés de la vegetación ante eventos extremos del clima es de importancia para poder determinar los tiempos de respuesta y la resiliencia de los ecosistemas, a través de la utilización de diferentes técnicas estadísticas y de interpretación.

En México, los impactos negativos de condiciones extremas del clima son recurrentes. Trátese de sequía o de lluvias anómalamente intensas e inundaciones, sectores como el de la agricultura o la protección civil experimentan afectaciones con un alto costo, tanto económico como social. De igual manera, los daños en los ecosistemas ocurren en gran medida al alterarse la variabilidad del clima o cambiar las características de los valores extremos. Por ello, es necesaria una consideración adicional para un enfoque apropiado en un análisis de vulnerabilidad al cambio climático que considere los extremos. Para reducir la vulnerabilidad se propone diseñar e implementar estrategias de adaptación al cambio climático. Por ello, hablar de adaptación requiere entender y evaluar la vulnerabilidad a anomalías climáticas (Magaña 2013).

I. V Utilización del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI en el estudio de la influencia del clima en los ecosistemas

Las estimaciones en la respuesta de la fenología de las plantas tienen el potencial de ser sustancialmente influenciadas por la elección del diseño de estudio y por la metodología estadística utilizada. Sin embargo, como los datos fenológicos han sido compilados en una diversidad de caminos y en una diversidad de periodos, su análisis no ha sido sencillo, y aún no existen métodos aceptados de manera general (Parmesan 2007). La limitada información acerca de la vegetación en escalas temporales y espaciales ha significado una dificultad para

discernir entre los efectos del cambio ambiental en las especies (Tucker et al. 2005). Lo anterior lleva a la conclusión de que la vulnerabilidad de los ecosistemas al cambio y la variabilidad climática debe considerar un análisis espacial de escalas geográficas amplias, debido a que no existen modelos regionales a la resolución de especies. Por lo que es importante identificar los tipos de vegetación como una referencia de la vulnerabilidad de un conjunto de especies de plantas (Galicia *et al.* 2008).

Para estudiar la variabilidad espacial y temporal del funcionamiento de la vegetación son apropiadas las series temporales de imágenes satelitales y sus relaciones con variables climáticas (Paruelo y Lauenroth 1998). Una forma indirecta de medir los impactos del clima en los ecosistemas, a través del análisis de imágenes de satélite, es el uso del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI, que estima la calidad, cantidad y desarrollo de la vegetación con base en la medición de radiación en canales del espectro visible, que la vegetación emite o refleja, obtenida por medio de sensores remotos (Magaña *et al.* 2012).

Creado por Rouse y colaboradores en 1974, el NDVI es una forma de medir la actividad fotosintética de la vegetación, determinando la cantidad de clorofila o su verdor. Se basa en la propiedad que tiene la vegetación de reflejar la radiación solar incidente en dos bandas espectrales de manera diferente: la fracción roja del visible y la infrarroja cercana, que en el satélite/sensor NOAA-AVHRR, corresponden a los canales 1 y 2, respectivamente. Mientras la absorción de la clorofila causa baja reflectancia en el canal 1, las paredes de las células de las hojas, que se encuentran llenas de agua, reflejan la mayor cantidad de energía en el infrarrojo cercano. Por lo tanto, el NDVI mide el vigor y verdor de la vegetación, o representa su actividad fotosintética (De la Casa y Ovando 2006). Es el más conocido y usado de los llamados Índices de Vegetación, y constituye una aproximación a los impactos en la vegetación de las variaciones en la lluvia ya que proporciona información sobre la magnitud del estrés hídrico de la vegetación. La medición del verdor de la vegetación con métodos de percepción remota, se remonta a la disponibilidad de imágenes del sensor AVHRR, existente desde julio de 1981. Con la mejora en los datos y los sensores de alta resolución (MODIS) en los satélites Terra y Aqua de la NASA, estos estudios se han vuelto

cada vez más frecuentes, ya que se cuenta con información histórica y reciente (Wang *et al.* 2003, Tucker *et al.* 2005).

La generalización espacial de los procesos ecológicos es significativa ya que las variaciones de las propiedades del suelo, la topografía, la humedad del suelo y la vegetación se correlacionan, y su expresión final se refleja en el tipo y vigor de la vegetación. Este vigor puede ser monitoreado en regiones geográficas amplias mediante dichos sensores remotos (Gómez-Mendoza 2007). Numerosos autores han analizado el impacto de las condiciones climáticas sobre la vegetación natural o sobre los cultivos a diferentes escalas espaciales mediante el NDVI (Ichii *et al.* 2002).

Ichii y colaboradores (2002) relacionaron los valores de NDVI con los de temperaturas y precipitaciones a escala global, y observaron una relación positiva y significativa entre el NDVI y las temperaturas en las latitudes medias y altas de Europa y Asia, mientras que la mayor correlación entre el NDVI y las precipitaciones las registraron en regiones desérticas y subdesérticas. Por esta razón, los estudios realizados sobre el impacto de las condiciones hídricas sobre la dinámica vegetal utilizando imágenes de satélite han sido frecuentes en las regiones semiáridas (Tucker *et al.* 1983; Davenport y Nicholson, 1993).

Se ha demostrado que el NDVI es útil para evaluar el estrés de la vegetación y su relación con la temperatura y la precipitación, es decir que puede ser un indicador de la resistencia y resiliencia de los ecosistemas (Tucker *et al.* 2005). En el estudio realizado por Wang y colaboradores (2003) se encontró que la precipitación, más que la temperatura, tiene influencia sobre la respuesta en el NDVI; y el efecto de esta variable en la vegetación se ha investigado extensamente, principalmente en regiones áridas y ecosistemas de naturaleza caducifolia.

Estudios recientes han explorado el uso de series de tiempo y medidas de teledetección, algunos de los más sobresalientes se han realizado en las regiones semiáridas del valle del Ebro, en la Península Ibérica (Cuadrat *et al.* 2005); en China (Fang *et al.* 2005); en Kansas (Wang *et al.* 2003); Córdoba, Argentina (De la casa y Ovando 2006); Norte y Sur de

Dakota, Alberta y Saskatchewan (Weier y Herring 2013); Botswana (Nicholson y Farrar 1994) y las Grandes Planicies de Estados Unidos (Wang *et al.* 2001, Peters y Ji 2003).

En regiones que exhiben una estacionalidad bien definida de sus condiciones climáticas, el NDVI se expresa a través del tiempo por medio de ondas que acompañan de manera estrecha la variación interanual del crecimiento de la vegetación (Hill y Donald 2003, citado por De la Casa y Ovando 2006). Este comportamiento ha permitido evaluar de manera remota distintos problemas, desde determinar la cantidad de biomasa producida, hasta establecer la eventual degradación del paisaje (De la Casa y Ovando 2006).

Fang y colaboradores (2005), encontraron que los patrones de precipitación alteran el crecimiento de la vegetación templada. De igual manera, ha sido observado comúnmente que el incremento en la precipitación mejora el crecimiento de las plantas de las praderas templadas (Huxman *et al.* 2004). De manera general, no se encuentran muchos estudios sobre el efecto de la precipitación en zonas templadas, y específicamente de las zonas de bosque. Por dicha razón, el presente trabajo busca aportar al conocimiento de la respuesta de este tipo de ecosistemas.

Se ha descrito la relación vegetación-precipitaciones como lineal, basada en el supuesto de que el verdor de la vegetación es función de la humedad disponible. La precipitación es el factor más importante en los patrones regionales de NDVI y, por inferencia, de los patrones de productividad en Botswana (Nicholson y Farrar 1994), en las Grandes Planicies de Estados Unidos (Wang *et al.* 2003), en la península Ibérica (Cuadrat *et al.* 2005) y en regiones templadas de China (Fang *et al.* 2005). En la investigación de Gómez-Mendoza (2007), realizada para la Sierra Norte de Oaxaca, también se determinó, a través del análisis de umbrales, que el factor climático de la vegetación a nivel intra-anual, evaluado a través del NDVI, es la precipitación, más que las temperaturas extremas.

De los estudios anteriores se concluye que las variaciones temporales del NDVI están íntimamente relacionadas con las precipitaciones puntuales (Davenport y Nicholson 1993). Por ello, frecuentemente se han utilizado ecuaciones de balance hídrico del suelo o

precipitaciones acumuladas en el tiempo, que consideran escalas temporales amplias, para determinar la respuesta de la vegetación ante determinadas condiciones de humedad.

La influencia de la humedad del suelo en la vegetación ha sido estudiada por Nicholson y Farrar (1994) para varios tipos de vegetación y tipos de suelo. Encontraron que el tipo de suelo, principalmente la porosidad, influenciaban en la respuesta de la vegetación a la lluvia y a la humedad disponible en el suelo. Se ha demostrado que la precipitación y la humedad del suelo son dos variables que influyen directamente en la vegetación (Castro *et al.* 2009), por lo tanto, encontrar la respuesta del bosque ante estas dos variables es determinante para entender la relación que tiene el clima con la superficie forestal y con los suelos.

El NDVI es útil para evaluar el estrés de la vegetación y su relación con la temperatura, la precipitación y la humedad del suelo, es decir, que puede ser un indicador de la resistencia y resiliencia de los ecosistemas. Sin embargo, los estudios que indican los retrasos del NDVI con respecto a la variación anual e interanual del clima en México aún son escasos. Se han realizado investigaciones sobre los tiempos de respuesta de los tipos de vegetación a la sequía en distintas zonas de México (Galván 2011). También se han publicado estudios más regionales sobre el efecto de la variabilidad de la temperatura y la precipitación en el comportamiento del verdor de la vegetación en la Sierra Norte de Oaxaca (Gómez-Mendoza 2007). El aporte que se pretende realizar a través de esta investigación es el avance en el conocimiento de la influencia del clima en ecosistemas boscosos de México.

I. VI Influencia del cambio de uso del suelo en el verdor de la vegetación

Los cambios en la cubierta vegetal son significativos dentro del sistema climático, y tienen un fuerte impacto en la estructura y función de los ecosistemas, ya que alteran el balance entre la vegetación natural y las condiciones climáticas (Turner *et al.* 2007; Bonan 2008). Se destaca la importancia de este tema en estudios de conservación, ya que muchas de las reservas naturales establecidas en México no han tenido éxito por la dinámica del suelo en el que se encuentran y la naturaleza de sus fronteras.

El cambio de uso del suelo es un factor importante de reducción del ecosistema, y también modifica las condiciones climáticas locales, ya que al cambiar o eliminar la cobertura vegetal se produce un cambio en el albedo y éste se refleja en cambios en la precipitación, en la evapotranspiración y en la humedad del suelo (Gómez-Mendoza, 2007). Se ha demostrado que los usos de la tierra, las presiones y los cambios fuera de la reserva afectan la biota dentro de ella, y por otro lado, el establecimiento de reservas también afecta las prácticas de subsistencia de las personas, con implicaciones para el bienestar humano y la preservación de la vida silvestre (Turner *et al.* 2007). La dependencia de los recursos naturales representa un conflicto con las zonas de conservación, ya que se tiene la necesidad de utilizar las materias primas que brinda el bosque. Ante esta situación es probable que el adecuado manejo de las Áreas Naturales Protegidas y la administración del uso del suelo en sus zonas de influencia incremente la capacidad de resiliencia, de los ecosistemas y promueva condiciones favorables para su adaptación, sin afectar las actividades económicas de la población local.

II. Planteamiento del problema

La Sierra Madre Oriental ha sido identificada como una zona de alta diversidad biológica, en donde son especialmente considerados, por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), los bosques de Pino-Encino, además del Bosque Mesófilo de Montaña por estar catalogado como uno de los ecosistemas más amenazados en México. Los bosques templados tienen un alto valor económico y ambiental por ser la principal fuente de madera en la región, por su contribución al ciclo hidrológico, por su valor estético y por fungir como potenciales sumideros de carbono. En la región centro y sur de la Sierra Madre Oriental se han generado iniciativas para gestionar la conservación a través de la propuesta de la creación del Corredor Ecológico de la Sierra Madre Oriental (CESMO), que incluye ecosistemas de bosque de pino-encino, bosque mesófilo de montaña, matorral xerófilo y selva caducifolia y perennifolia (CONANP-GIZ 2013).

En el informe de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas CONANP, en colaboración con la Agencia de Cooperación Alemana GIZ, se desarrolla actualmente en la región una línea de investigación sobre la vulnerabilidad de la biodiversidad al cambio

climático. Por lo que es importante profundizar en la relación que tienen los ecosistemas con el clima en la región. En el marco de estas iniciativas, el presente trabajo busca aportar a los estudios que se realizan en relación a este tema, relevante para determinar la exposición y sensibilidad del bosque a eventos climáticos y reconocer algunas de las amenazas a su permanencia.

Las tendencias climáticas de 1954 a 2008, muestran que el porcentaje de días al año en los que se observan temperaturas máximas extremas, en la región, ha aumentado y el de días con temperaturas bajas extremas ha disminuido. En el caso de los eventos extremos, como los ciclones tropicales, existe gran incertidumbre sobre cambios en su actividad futura, sobre todo cuando se trata de analizar tendencias de cambio en trayectorias. Existe un mayor consenso, sin embargo, en que la intensidad de los huracanes aumentará al incrementarse la temperatura de la superficie del mar (Magaña *et al.* 2012).

Estos fenómenos generan efectos negativos para los ecosistemas y para los medios de vida de la población rural que habitan la región. Ejemplo de ello, es la baja en la productividad del maíz, la disminución de la humedad en el suelo y la aparición de plagas en zonas boscosas, lo que hace que el riesgo de incendios aumente, las fuentes de agua disminuyan y el aprovechamiento forestal se vea mermado (Magaña *et al.* 2012). Por lo tanto, si se descompensa la cantidad anual de lluvia se debe tener un plan de acción. En este sentido, la identificación de la respuesta del bosque a la variabilidad climática es necesaria para comprender en qué medida las tendencias del clima lo afectarán y a las comunidades que dependen de él.

La delimitación de áreas de protección debe considerar una amplia gama de variables que permitan tener mayor eficiencia en la conservación; en este contexto, estudiar la influencia de la variable climática en los ecosistemas ayudará a pronosticar el comportamiento de la vegetación ante eventos climáticos de diferente naturaleza y tener un mayor control sobre las amenazas que afectan a determinadas regiones. Si se profundiza en el estudio de los factores que determinan los cambios en el verdor de la vegetación, se podría aumentar la inversión en la prevención de desastres y disminuir el gasto en actividades de mitigación.

Determinar la sensibilidad de la biodiversidad a la variabilidad del clima y a la presencia humana, permitirá generar propuestas de conservación que mantengan este equilibrio y que tomen en cuenta factores multidisciplinarios que permitan llegar a la resolución de los problemas ambientales que enfrenta actualmente el país. En este sentido, el presente trabajo busca ser un aporte a los estudios sobre la sensibilidad de los ecosistemas de bosque templado a la variabilidad climática y al cambio de uso del suelo.

III. Hipótesis

La variación temporal en el verdor de la vegetación depende de diferentes factores, siendo los más importantes la precipitación y la humedad del suelo. Dicha respuesta no se refleja inmediatamente a los eventos de precipitación sino que existen retrasos, relacionados con la composición, estructura y tipos de vegetación. Se espera que el bosque templado de la Sierra Madre Oriental presente retrasos en su respuesta intra-anual e interanual a los valores medios y extremos de precipitación y humedad. De igual manera, se espera que las diferencias regionales en las tasas de cambio de uso del suelo influyan en el verdor de la vegetación.

IV. Objetivos

Objetivo general: Establecer la relación del verdor del bosque templado con las variaciones en la precipitación y la humedad del suelo en la Sierra Madre Oriental, así como identificar la influencia de las tasas de cambio de uso del suelo en la vegetación, con el fin de hacer una aportación a los trabajos de conservación que se realizan actualmente en la región.

Objetivos específicos:

- Describir el entorno geográfico del bosque templado en la Sierra Madre Oriental y su grado de conservación.
- Cuantificar los tiempos de respuesta de la vegetación al ciclo anual de la lluvia y la humedad del suelo, mediante el análisis de series de tiempo de los periodos 1982-2002 y 2000-2011.

- Evaluar la sensibilidad del bosque templado a eventos climáticos extremos que resultan de la variabilidad climática, como el paso de ciclones tropicales o sequías.

Este trabajo pretende encontrar la sensibilidad y la resiliencia del bosque templado de la Sierra Madre Oriental a través del análisis de su relación con elementos del clima como la precipitación y la humedad del suelo.

En el capítulo 1 se delimita y se describen las principales características geográficas de la zona de estudio, así como los proyectos de conservación que se realizan actualmente para el Corredor Ecológico de la Sierra Madre Oriental. En el capítulo 2 se hace referencia a las fuentes y características de los datos utilizados. Se describe la metodología para determinar los tiempos de respuesta del bosque templado a la variabilidad climática y la metodología para identificar el cambio de uso del suelo regional. En el capítulo 3 se describen los principales moduladores del clima en la región y se presentan los resultados obtenidos de aplicar las metodologías a las series de datos. Primero se analiza la respuesta de la vegetación al ciclo anual de la lluvia y a la humedad del suelo, después se presentan las gráficas de las series de tiempo de 1982 a 2011 y se puntualizan algunos periodos sobresalientes. Se presentan las tasas de cambio de uso del suelo.

Capítulo 1. Entorno geográfico y proyectos de conservación en la Sierra Madre Oriental

1.1 La Sierra Madre Oriental

La Sierra Madre Oriental es un sistema montañoso constituido León, Tamaulipas, San Luis Potosí, Hidalgo, Guanajuato, Querétaro, Veracruz y Puebla. principalmente de rocas mesozoicas sedimentarias plegadas, extendido desde el norte de Coahuila hasta el paralelo 20 en la costa de Veracruz. Atraviesa los estados de Coahuila, Nuevo Aunque la estructura geológica es en general homogénea en toda su extensión, el relieve presenta diferencias notables debido a las condiciones climáticas, gradualmente más húmedas hacia el sur. Por esto, en el norte son comunes los relieves de crestas alargadas limitadas por pedimentos o disectadas por valles intermontanos, controlados por la estructura geológica (Lugo-Hubp y García-Arizaga 2003).

El flanco oriental es un conjunto montañoso orientado al noroeste, con unos 600 km de longitud a partir del extremo oriental del Cinturón Volcánico, y con una anchura promedio de 50-80 km y altitud media de 2,000 m. Es una de las zonas más húmedas del país, con precipitación anual de más de 1,000 mm, lo que favorece una abundante y variada vegetación (aunque en reducción por una intensa deforestación), así como numerosos ríos montañosos. La vertiente occidental es de menor pendiente, los cauces fluviales son escasos y de poca extensión (Lugo-Hubp y García-Arizaga 2003).

Para este análisis la zona de estudio se delimitó en función de la ecorregión de las Sierras Templadas de la Sierra Madre Oriental, determinada en la cartografía de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO 2008) (Figura 1.1).

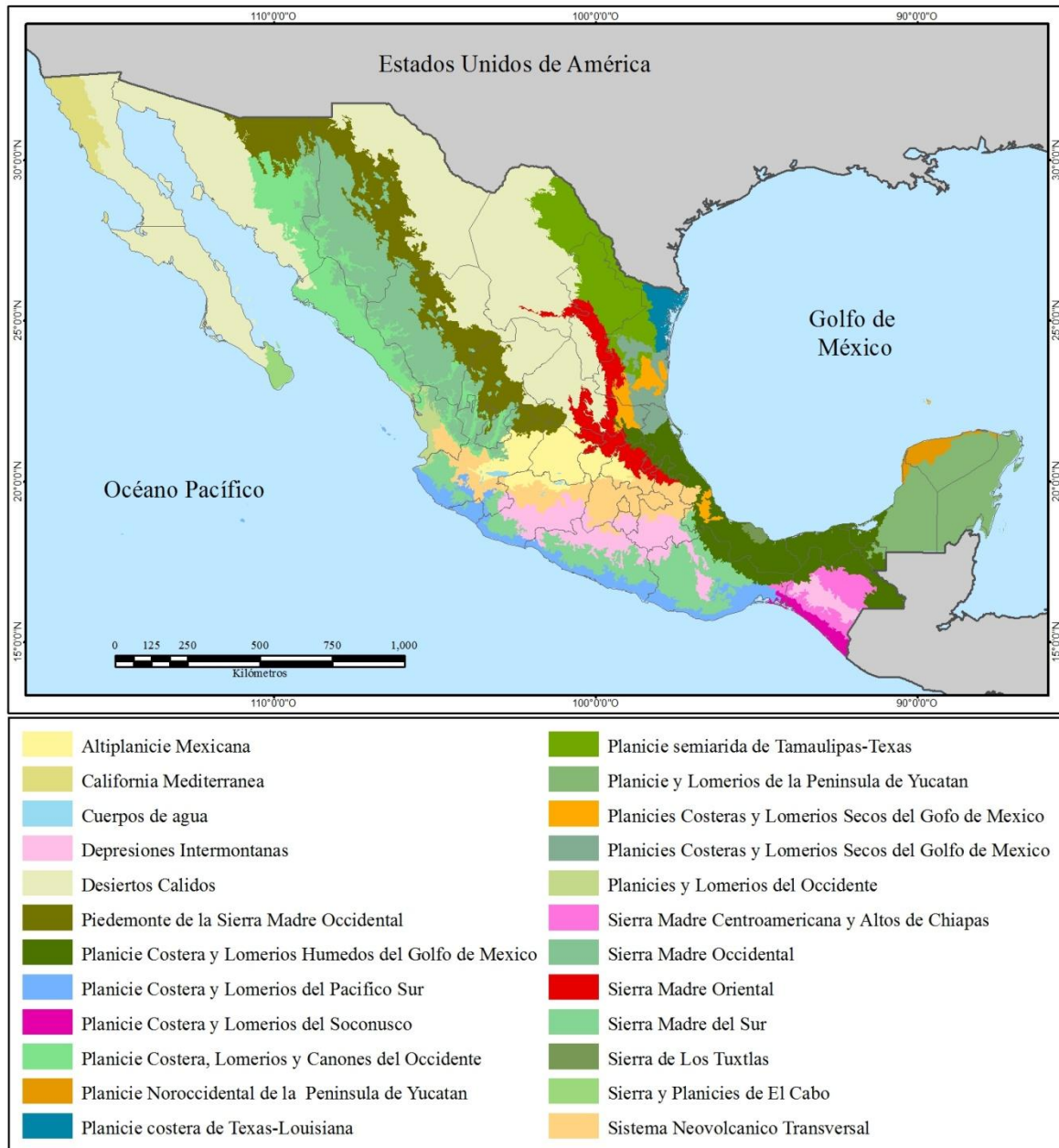


Figura 1.1 Ecorregiones terrestres de México Nivel II. Elaboración propia. Fuente: CONABIO 2008.

1.2 Delimitación del área de estudio

El área de estudio, abarca la zona centro y sur de la Sierra Madre Oriental, desde la Reserva de la Biósfera de El Cielo en Tamaulipas, a los 23° 25' de latitud norte; hasta su límite más meridional cerca de Cuetzalan, Puebla a los 19° 52' de latitud norte.

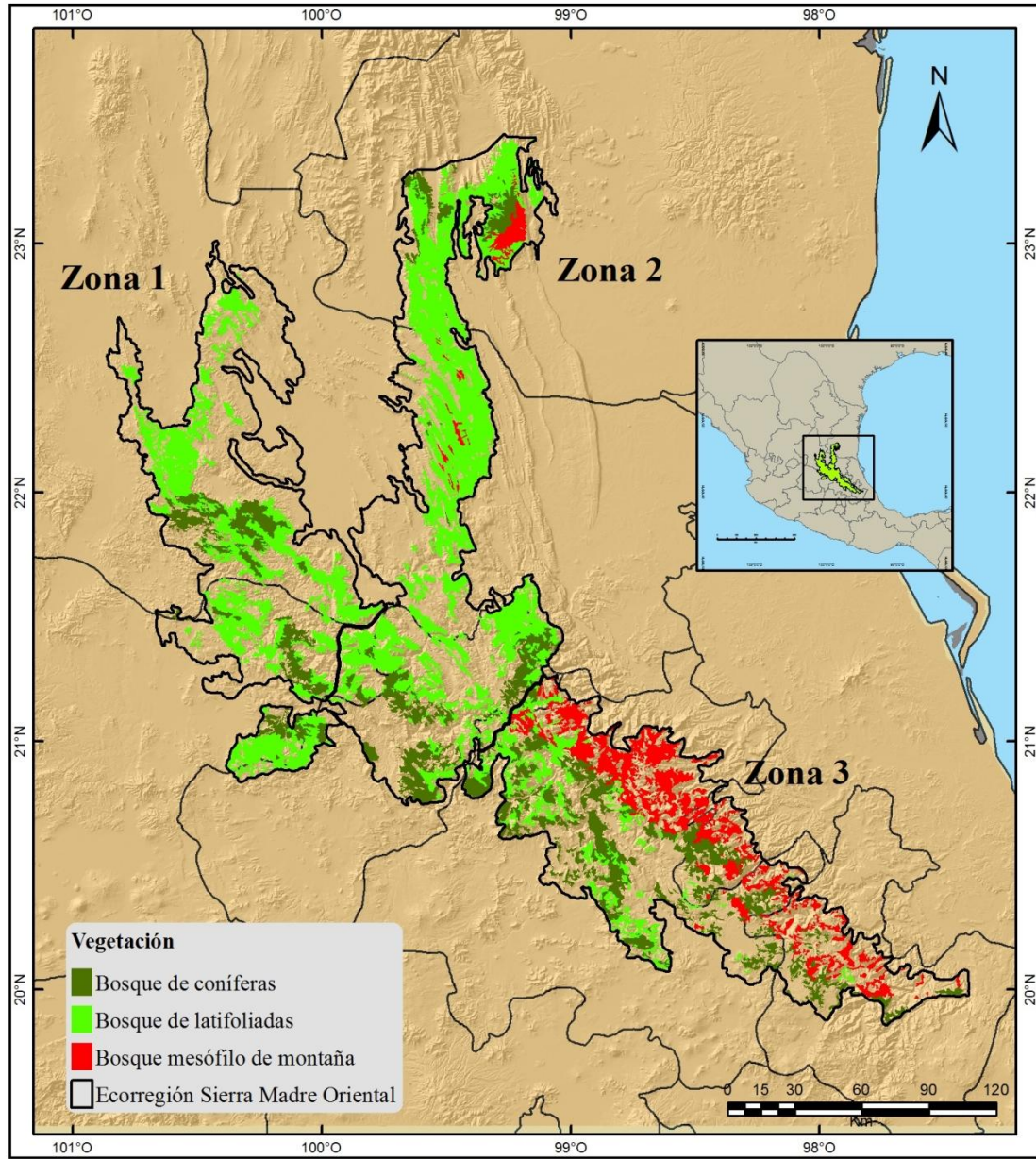
Con base en la información generada por la CONABIO se delimitó la ecorregión de las sierras templadas de la Sierra Madre Oriental. A partir de esta delimitación, se extrajo el área de bosques templados de la carta de Uso de Suelo y Vegetación (serie IV) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, escala 1:250 000, y se distinguió entre el bosque de coníferas, el bosque de latifoliadas y el bosque mesófilo de montaña.

Se clasificaron tres zonas de acuerdo con los valores observados en el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), en la cantidad de precipitación media anual; y en el tipo de vegetación predominante (Figura 1.2).

La **zona 1** es más continental y menos húmeda que las otras dos. La precipitación media anual es de 500 mm. Los valores de NDVI oscilan entre 0.3 y 0.47 a lo largo del año. Predomina el bosque de encino, y el de coníferas se encuentra en menor proporción.

La **zona 2** está más expuesta que la zona 1 a la influencia de las trayectorias de los ciclones del Golfo de México. La precipitación media anual es de 814 mm. Los valores de NDVI oscilan entre 0.46 y 0.64 a lo largo del año. Predomina el bosque de encino y en segundo lugar el bosque de coníferas. También se encuentran vestigios de bosque mesófilo de montaña de distribución fragmentada.

La **zona 3** es la más lluviosa. La precipitación media anual es de 1,193 mm. Lo anterior debido a la latitud y a que la influencia de los ciclones tropicales es mayor. Los valores de NDVI oscilan entre 0.49 y 0.6 a lo largo del año. Predomina un corredor de bosque mesófilo de montaña, representativo de la Sierra Madre Oriental, y también se presentan bosques de coníferas de manera importante.



Elaboración propia. Fuente de la información: CONABIO, 2008; INEGI, 2010

Proyección: GTM Datum: WGS 1984

Figura 1.2 Delimitación del área de estudio. Bosque templado en la Sierra Madre Oriental.

1.3 Aspectos geográficos físicos

La provincia de la Sierra Madre Oriental es muy compleja y discontinua, tanto en su origen como en su medio físico. La mayor parte de las montañas de esta provincia fueron formadas por plegamiento, durante la Orogenia Laramide; las rocas predominantes son sedimentarias y metamórficas del Cretácico y Jurásico (Lugo-Hubp y García-Arizaga 2003).

El plegamiento se muestra de diversas maneras, pero el aspecto más notorio en estas sierras es el que produce una topografía de fuertes ondulados paralelos alargados, donde las crestas reciben el nombre de anticlinales y las concavidades de sinclinales. Debido a la predominancia de rocas calizas en la región, se han producido particularmente en la porción media y sur considerables manifestaciones de carso, es decir, de geformas resultantes de la disolución de la roca por el agua (INEGI 2002).

Debido a que se trata de una zona de transición entre las regiones biogeográficas neártica y neotropical, las condiciones secas y semisecas que imperan en el norte y occidente de la sierra, propician que ahí no haya una red de drenaje significativa, mientras que en las partes media y sur la naturaleza subhúmeda de los climas, junto con las manifestaciones cársticas, la vegetación y la niebla, han contribuido a generar importantes sistemas fluviales que corren hacia el oriente y han excavado profundos cañones, como los de los ríos Guayalejo y Verde (Challenger y Soberón 2008).

1.3.1 Vegetación

En la región de estudio, en general, los bosques de *Quercus* prevalecen ampliamente, aunque también se presentan de manera importante bosques de *Pinus* y algunas otras comunidades de bosque mesófilo de montaña. Estos bosques se desarrollan generalmente sobre roca caliza con suelos delgados (Rzedowski 2006).

En México, los árboles de pino y otras coníferas (como oyameles y cipreses), así como especies arbóreas de hojas anchas (por ejemplo, encinos) constituyen los grupos vegetales más importantes de los ecosistemas boscosos templados de México (Martínez 2008).

Los bosques templados de coníferas y latifoliadas, en los cuales los pinos (*Pinus* spp.), oyameles (*Abies* spp.), pinabetos (*Picea* spp., *Pseudotsuga* spp.) y encinos (*Quercus* spp.) son las especies dominantes en su composición y estructura, predominan en las zonas de clima templado. Debido a la fertilidad de sus suelos y a su clima, han sido objeto de procesos de transformación con fines agrícolas y energéticos, y por asentamientos humanos a lo largo de milenios (Challenger *et al.* 2009).

La evolución *in situ* de los géneros *Quercus* y *Pinus*, influida de manera importante por los procesos orográficos y de fluctuaciones climáticas en el pasado geológico, ha conducido a procesos de diversificación y especiación de tal magnitud en México, que el país es considerado el mayor centro de diversidad mundial de pinos, con alrededor de 50% de las especies conocidas, y el centro de diversidad hemisférica para los encinos, con alrededor de 33% de las especies conocidas del mundo (Challenger *et al.* 2009).

Los bosques de encinos, se distribuyen en la parte media de las faldas de las montañas, este tipo de vegetación se integra por una diversidad muy amplia de comunidades distintas, que son reflejo de las más de 200 especies de *Quercus* en México. Los bosques de coníferas de México son comunidades de vegetación siempre verde, los pinos son los de mayor distribución, se encuentran en todas las serranías del país, formando bosques de altura y densidad muy variables, pero de escasa diversidad en lo que se refiere a las especies dominantes del dosel, ya que muchos de estos bosques son monoespecíficos o bien están dominados por un reducido número de especies. Los bosques mezclados de pino-encino se encuentran en las áreas de transición entre los bosques de encino y los de pino, predominando los primeros a menor altitud y los de pinos a mayor altitud (Challenger *et al.* 2009).

Cabe destacar la importancia del bosque mesófilo de montaña como parte de las sierras templadas en la región, ya que al revisar la cartografía se puede observar que se encuentra altamente fragmentado. En él predominan elementos tropicales de montaña entremezclados con otros típicamente boreales y las condiciones de humedad son muy favorables, lo que resulta en una gran riqueza de especies. La relevancia de los bosques mesófilos, radica

tanto en la biodiversidad que albergan, como en el estado tan fragmentado de su hábitat y el nivel de amenaza al que están expuestos con respecto de otros tipos de vegetación en el país (Villaseñor 2010).

a)



Foto: Arriola, V.

b)



Foto: Arriola, V.

Figura 1.3 a) Hojas de *Liquidambar styraciflua* (especie dominante del bosque mesófilo de montaña) y b) Conos de *Pinus cembroides* (pino piñonero). Fotografías tomadas durante trabajo de campo en la Sierra Madre Oriental.

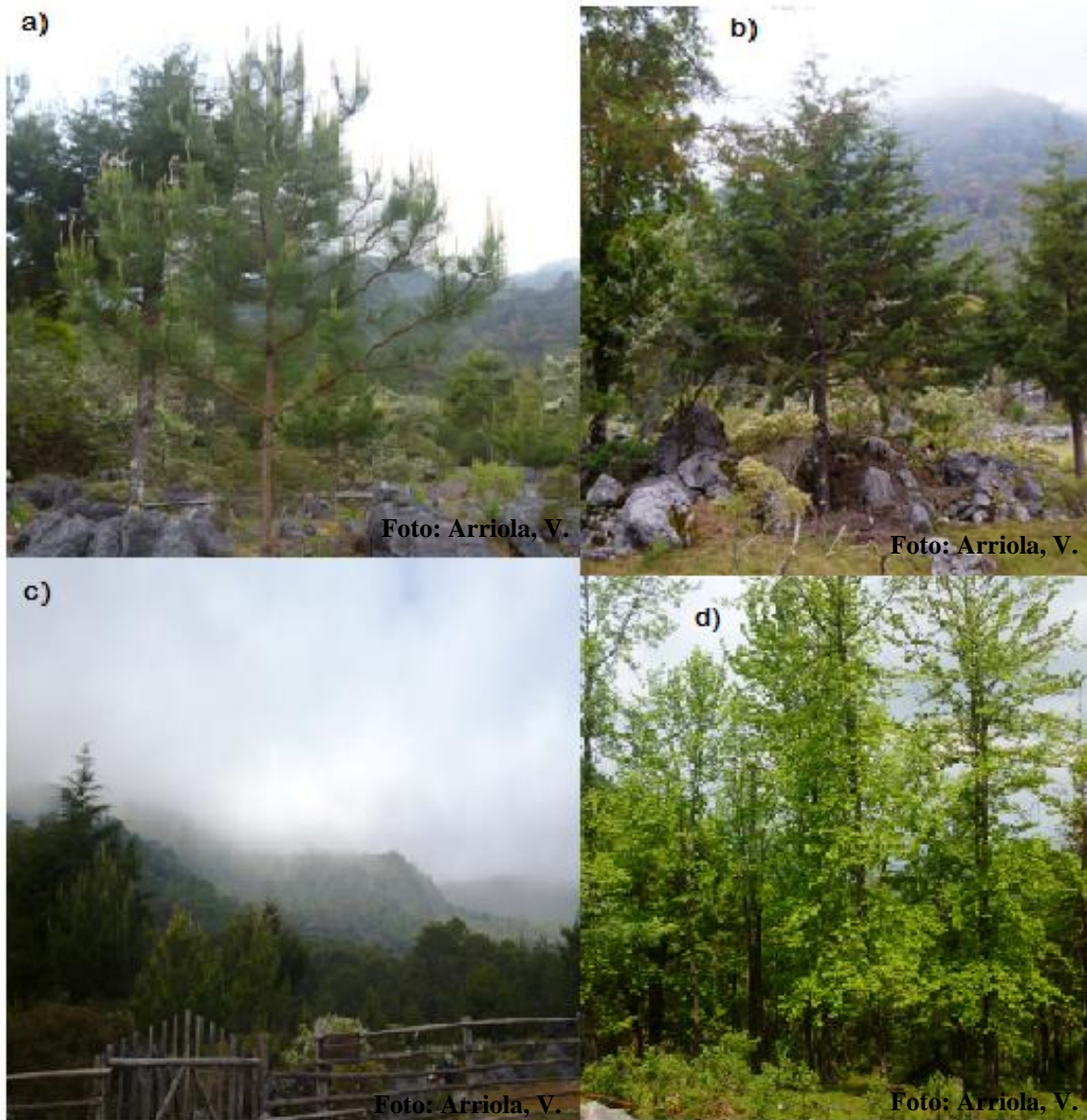


Figura 1.4 Bosque templado. La Trinidad, Xilitla, San Luis Potosí. En esta área se encuentran los bosques templados mejor conservados de la zona Huasteca, que han escapado de la destrucción debido a lo escarpado e inaccesible de este sector de la sierra. a) *Pinus greggii*, b) *Cupressus lusitanica* (cedro blanco), c) Bosque de Pino-Encino, d) Bosque Mesófilo de Montaña (*Liquidambar styraciflua*). Fotografías tomadas durante trabajo de campo.

1.4 Exposición a eventos climáticos

La región de la Sierra Madre Oriental está expuesta a diferentes fenómenos climáticos con manifestaciones regionales y locales; esta zona es una de las más lluviosas de México; sin embargo, algunos procesos de cambio de uso de suelo como la deforestación pueden ya haber alterado el ciclo hidrológico de la región haciendo que ante lluvias intensas disminuya la infiltración y aumenten los escurrimientos. La orografía y el uso del suelo son factores clave en el clima de la región (Magaña *et al.* 2012).

La altitud y los plegamientos permiten que el bosque templado y el bosque mesófilo de montaña estén presentes, ya que en dichas zonas se cubren sus requerimientos de temperatura, precipitación y humedad. La influencia de la entrada de ciclones tropicales durante el verano también incrementa el aporte de humedad en la parte oriental. Los eventos extremos pueden modificar de manera importante estas condiciones, y el impacto que puedan generar está determinado por los diferentes factores que se explicaron anteriormente dentro del concepto de vulnerabilidad.

Los desastres en la región, como los incendios o la aparición de plagas, relacionados a cambios en el clima conllevan a un alto impacto social y económico, en gran medida debido a la pérdida de resiliencia de los diferentes sistemas (Magaña *et al.* 2012). Para poder construir escenarios de impacto a futuro, primero se debe evaluar la vulnerabilidad de los ecosistemas, de la población y de sus actividades económicas.

1.5 Población

El área de estudio abarca 112 municipios de 7 Estados (Tamaulipas, San Luis Potosí, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Veracruz y Puebla) (Tabla 1). Se observa una mayor densidad de población en la parte sur y centro. Huauchinango, en Puebla, es la localidad urbana con mayor población dentro de la zona.

Tabla 1.1 Municipios de la Sierra Madre Oriental (área de estudio).

Municipio	Habitantes 2010	Municipio	Habitantes 2010	Municipio	Habitantes 2010
TAMAULIPAS		HIDALGO		PUEBLA	
Gómez Farías	8 786	Acatlán	20 077	Ahuacatlán	14 754
Jaumave	15 105	Acaxochitlán	40 583	Ahuazotepec	10 457
Ocampo	12 962	Actopan	54 299	Amixtlán	5 004
Palmillas	1 795	Cuautepec de H.	54 500	Camocuautla	2 476
Tula	27 572	Agua Blanca	8 994	Coatepec	0 758
SAN LUIS POTOSÍ		Atotonilco el Grande	26 940	Cuetzalan del Progreso	47 433
Alaquines	8 186	Calnali	16 962	Cuautempan	9 212
Armadillo de los Infante	4 436	Cardonal	18 427	Chiconcuautla	15 767
Cárdenas	18 937	Chapulhuacán	22 402	Honey	7 463
Cerritos	21 394	Eloxochitlán	2 800	Herm. Galeana	7 718
Ciudad del Maíz	31 323	Eloxochitlán	2 800	Juan Galindo	10 213
Cd. Fernández	43 528	Huasca de Ocampo	17 182	Hueytlalpan	5 734
Guadalcázar	25 985	Huehuetla	23 563	Huitzilán de Ser.	13 982
Lagunillas	5 774	Ixmiquilpan	86 363	Jonotla	4 598
Rayón	15 707	Juárez Hidalgo	3 193	Huachinango	97 753
Rioverde	91 924	Omitlán de Juárez	8 963	Naupan	9 707
San Ciro de Acosta	10 171	Lolotla	9 843	San Felipe Tepatlán	4 120
San Nicolás Tolentino	5 466	Metepec	11 429	Pahuatlán	20 618
Santa Catarina	11 835	SA Metzquititlán	9 364	Tepango de Rod.	4 244
Sta Ma. del Río	40 326	Metztitlán	21 623	Tepetzintla	10 240
Tamasopo	28 848	Min. del Chico	7 980	Tlacuilopec	17 115
Xilitla	51 498	Min. del Monte	13 864	Tlaola	19 826
Zaragoza	24 596	La Misión	10 452	Tlapacoya	6 406
El Naranjo	20 495	Jacala de Ledezma	12 804	Tlaxco	5 415
GUANAJUATO				Zoquiapan	2 639
Atarjea	5 610	Molango de Escamilla	11 209	Zacatlán	76 296
San José Iturbide	72 411	Nicolás Flores	6 614	Zapotitlán de M.	5 608
Sn Luis de la Paz	115 656	Pacula	5 049	Zihuateutla	12 530
Santa Catarina	5 120	Pisaflores	18 244	Xicoteppec	75 601
Tierra Blanca	18 175	S.B. Tutotepec	18 137	Xochitlán de Vicente Suárez	12 249
Victoria	19 820	Santia. de Anaya	16 014	Zongozotla	4 599
Xichú	11 560				

Tabla 1.1 (Cont...)

QUERÉTARO		HIDALGO		VERACRUZ	
Pinal de Amoles	27 093	Tenango de Doria	17 206	Huayacocotla	20 765
Arroyo Seco	12 910	Tepehuacán	29 125	Ilamatlán	13 575
Cadereyta de M.	64 183	Tianguistengo	14 037	Texcatepec	10 627
Jalpan de Serra	25 550	Tlahuiltepa	9 753	Zacualpan	6 784
Landa de Matam	19 929	Tlanchinol	36 382	Zontecomatlán	13 866
Peñamiller	18 441	Tulancingo de B.	151 584		
Tolimán	26 372	Xochicoatlán	7 320		
San Joaquín	8 865	Zacualtipán	32 437	TOTAL	2 422 780
		Zimapán	38 516		

Fuente: INEGI, 2010

1.5.1 Grupos indígenas

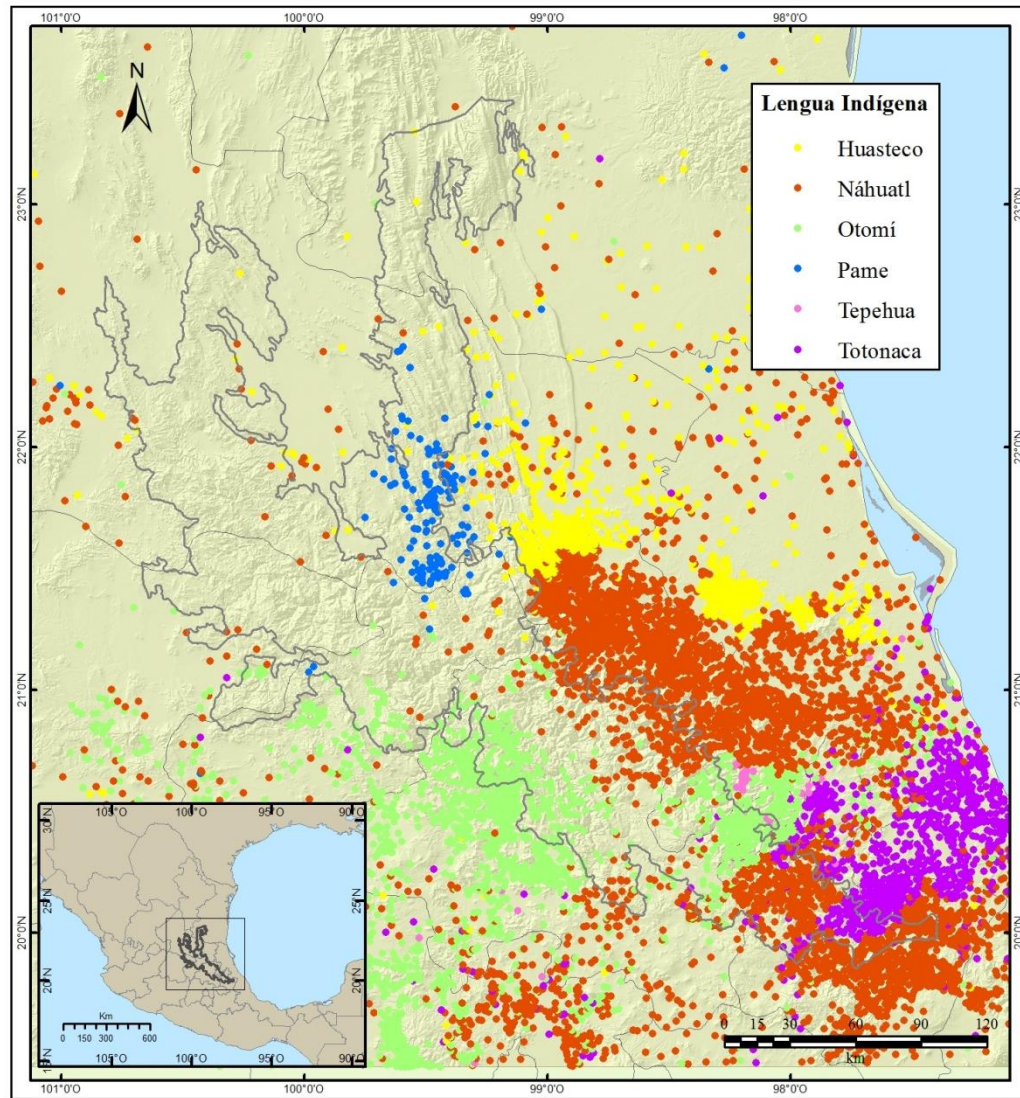
La Sierra Madre Oriental se ubica entre dos grandes regiones culturales: Aridoamérica y Mesoamérica. Alberga a comunidades rurales, muchas de las cuales pertenecen a grupos indígenas como los otomí-tepehuas, nahuas, pames, totonacas y teenek (Figura 1.5).



Figura 1.5 Población teneek. Fotografías tomadas durante trabajo de campo.

Esta riqueza cultural se ve reflejada en la diversidad de actividades productivas en la región y en la heterogeneidad lingüística (Figura 1.6). Estas comunidades, más dependientes de los

recursos naturales, veneran a dioses relacionados con el ciclo agrícola y la naturaleza, como el dios de la lluvia, de la fertilidad de los suelos, del sol y de la luna.



Fuente: elaborado con base en el shape de puntos de la Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas, CDI. Proyección: GTM Datum: WGS1984

Figura 1.6 Mapa de la distribución de las lenguas indígenas en el área de estudio. Elaborado con base en la información generada por la Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas, CDI.

1.6 Actividades económicas y manejo del bosque

La agricultura y la ganadería son las principales actividades económicas en la región. La agricultura, basada en el cultivo del maíz y frijol, bajo el sistema de tumba-roza-quema, no

permite la regeneración de terrenos ya agotados y provoca al mismo tiempo severos procesos erosivos. En el bosque mesófilo de montaña la producción de café de sol, sin el dosel del bosque original o sin sembrar árboles frutales, también representa un factor importante de la erosión de los suelos y la pérdida de la cubierta vegetal (CONANP-GIZ 2013).

Se trata de uno de los sectores con mayor vulnerabilidad ante la variabilidad climática, principalmente para los agricultores tradicionales, ya que dependen del clima para planear sus actividades agrícolas. No obstante, es importante señalar que quienes practican este tipo de agricultura tienen un profundo conocimiento de su medio, obtenido a través del tiempo y la observación, que les da la posibilidad de enfrentar los aspectos negativos de las condiciones climáticas extremas y considerar medidas de adaptación, modificando las actuales prácticas agrícolas, y ajustándolas a los cambios de lluvia y temperatura (Hernández y Sánchez 2010).

La ganadería intensiva es importante, principalmente hacia la región de la huasteca hidalguense. La ganadería extensiva se desarrolla en los relictos de vegetación, afectando los procesos de regeneración de las especies arbóreas y el sotobosque. La presencia de bosques de liquidámbar suele coincidir con suelos derivados de lutitas, muy apreciados para la actividad pecuaria (Figura 1.7) (CONANP-GIZ 2013).

La extracción clandestina de madera para la industria de muebles, práctica extendida en buena parte de las comunidades del área, afecta especies comerciales como el pino (*Pinus*), el cedro blanco (*Cupressus lusitanica*) y el guayamé (*Abies vejarii*). Algunos géneros maderables del bosque mesófilo de montaña también suelen ser utilizados localmente con fines de construcción, especialmente *Liquidambar*, *Morus*, *Clethra* y *Quercus* (CONANP-GIZ 2013).

Otras actividades como el turismo rural dentro de los espacios con atractivos turísticos es incipiente, no obstante se está promoviendo sin una previa ordenación del territorio y se

considera como una actividad que mejorará las condiciones económicas de su población. En la investigación de Juárez y Ramírez (2006) se señala que los cafeticultores de algunos municipios de Puebla consideran que se puede practicar la espeleología, los deportes de agua (navegación o piragüismo), el ecoturismo y el turismo cultural. Además de que más del 70% de los cafeticultores desean participar en la prestación de servicios turísticos como la alimentación y el hospedaje.



Foto: Arriola, V.

Figura 1.7 Actividad pecuaria en bosques de liquidámbar, La Trinidad, Xilitla, San Luis , Potosí. Fotografía tomada durante trabajo de campo.

Ante este escenario, es importante destacar el papel de algunas comunidades rurales como los teenek, que han conservado en cierto grado los ecosistemas, a través de prácticas agroecológicas y tecnologías locales de producción (Figura 1.8).

Los agroecosistemas tradicionales de los países en desarrollo se basan en calendarios agrícolas complejos, prácticas agrícolas polifuncionales, obras para el manejo y conservación del agua y suelo, medios de trabajo primitivos, materias primas locales, y alta inversión de fuerza de trabajo. En este contexto, la cría de animales combinada con actividades agrícolas y forestales en arreglos espaciales o en secuencias temporales no es reciente, campesinos de todo el mundo la han practicado desde tiempos inmemoriales, y,

desde la perspectiva pecuaria, actualmente se les conoce como sistemas agrosilvopastoriles (Nahed, 2002).

Estos agroecosistemas se ajustan de manera adecuada a las condiciones naturales, económicas, sociales y culturales de las unidades familiares campesinas, estrategia que les ha permitido reproducirse socialmente y permanecer hasta nuestros días, por lo que ofrecen una alternativa sostenible con bajo uso de insumos externos para aumentar los niveles de producción animal (Nahed, 2002).



Figura 1.8 Labor del comisariado ejidal de Pockchich, San Antonio, San Luis Potosí. Fotografía tomada durante trabajo de campo.

En la región, mediante trabajo de campo, indagación bibliográfica, y recurriendo con expertos en el tema, se identificaron los siguientes agroecosistemas, en diferentes pisos del bosque y de la selva próxima al bosque:

- *Agroecosistema eem¹ (milpa)*: producción extensiva de maíz, frijol, calabaza, quelites, lentejas, tomates, jitomate, chiles, camotes y yuca.
- *Agroecosistema pakablom¹ (cañaveral)*: producción predominante de caña morada combinada con frutales, camotes y jícamas.
- *Agroecosistema Te'lom¹ (cafetal)*, con decenas de especies en diferentes pisos de la selva.
- *Sistema de K'aalumlab¹ (traspatio)*: más de 200 especies vegetales (60 medicinales) ganado porcino y aves de corral de diversas variedades.
- Otro importante agroecosistema es el *Agrosilvopastoril¹*, que consiste en la combinación de ganado vacuno, pastizales, árboles manejados para forraje y cercos vivos de árbol primavera.

El efecto ladera es importante en prácticamente toda el área. Los campesinos de las diferentes zonas agroecológicas, identifican los diferentes tipos de exposición, llamando a la ladera umbría expuesta al norte, *el sombroso¹* y, a la solana de exposición sur, el *calentadero¹*. En ambas laderas se utilizan diferentes ensambles de cultivos (chile, chayote y maíz), lo que da como consecuencia un mosaico de tipos de vegetación.

1.7 Proyectos de conservación en la región

La Sierra Madre Oriental ha sido identificada como una zona de alta diversidad biológica, en donde son especialmente considerados, por la CONABIO, los bosques de Pino-Encino, además del bosque mesófilo de montaña por estar catalogado como uno de los ecosistemas más amenazados en México. Los bosques templados albergan una gran diversidad de especies y tienen un alto valor económico y ambiental por ser la principal fuente de madera en la región, por su contribución al ciclo hidrológico, por su valor estético y por fungir como potenciales sumideros de carbono. En la región centro y sur de la Sierra Madre

¹ Términos locales de la cultura Teenek

Oriental se han generado iniciativas para gestionar la conservación a través de la propuesta de la creación del Corredor Ecológico de la Sierra Madre Oriental (CESMO), que incluye ecosistemas de bosque de pino-encino, bosque mesófilo de montaña, matorral xerófilo y selva caducifolia y perennifolia (CONANP-GIZ 2013).

Las Áreas Naturales Protegidas (ANP) han sido consideradas como una estrategia efectiva contra el cambio climático, sin embargo, si no se cuenta con la aprobación y participación de las comunidades que viven dentro o cerca de las reservas, estas estrategias están muy lejos de ser rentables. Actualmente en la Sierra Madre Oriental existen las siguientes ANP estatales y federales (Figura 1.9):

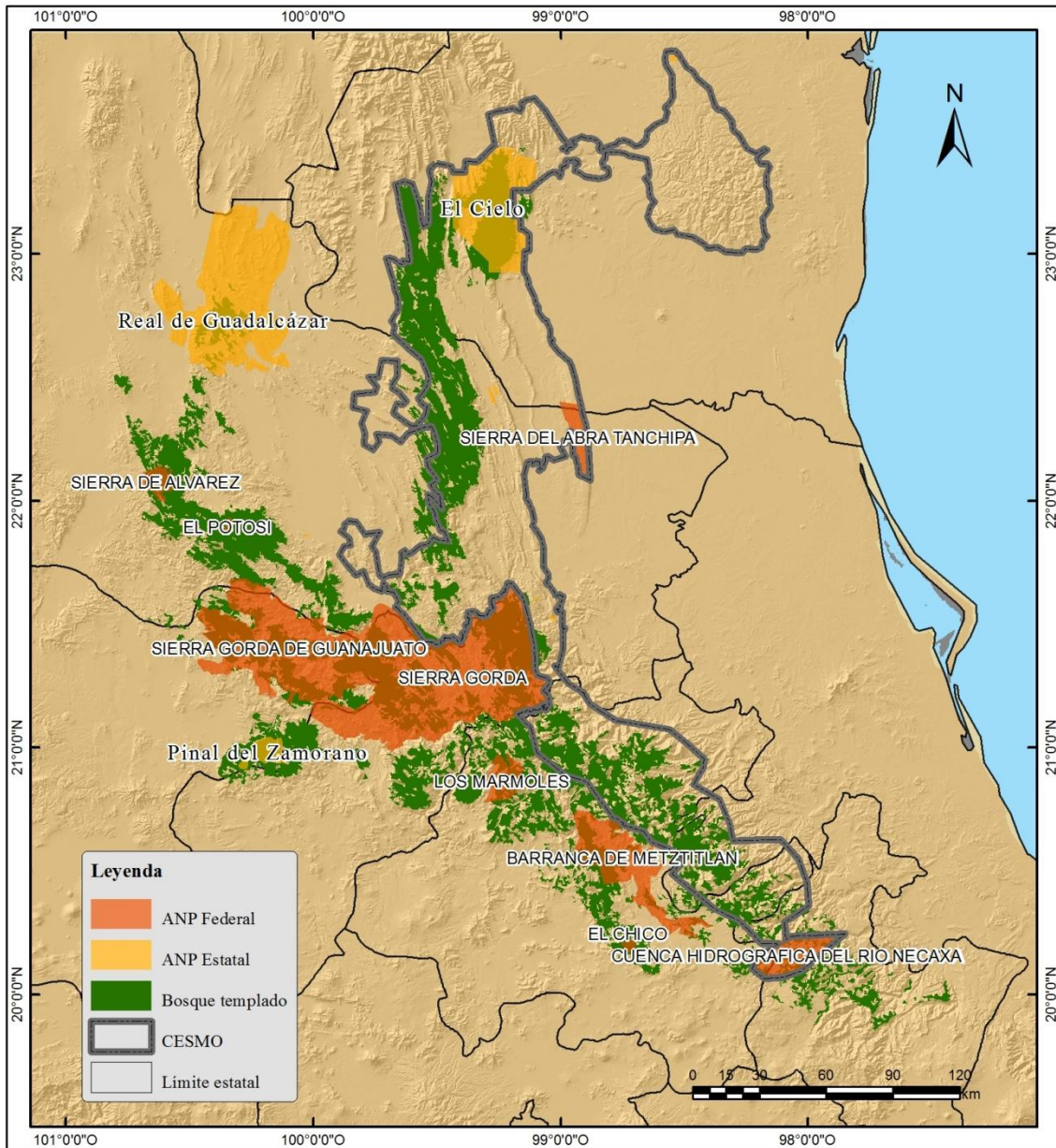
Con decreto:

1. Reserva de la Biósfera El Cielo (Tamaulipas), estatal
2. Reserva de la Biósfera Real de Guadalcázar (SLP), estatal
3. Zona de protección forestal y refugio de la fauna silvestre Sierra de Álvarez (SLP), federal
4. Reserva de la Biósfera Sierra Gorda de Guanajuato, federal
5. Reserva de la Biósfera Sierra Gorda (Querétaro), federal
6. Parque Nacional Los Mármoles (Hidalgo), federal
7. Reserva de la Biósfera Barranca de Metztitlan (Hidalgo)
8. Zona Protectora Forestal Vedada Cuenca Hidrográfica del Río Necaxa (Puebla), federal
9. El Chico
10. Pinal del Zamorano

Sin decreto:

1. Reserva de la Biósfera Sierra de Tamaulipas.
2. Reserva de la Biósfera Corredor Ecológico Sierra Madre Oriental-Huasteca Potosina (SLP).

3. Corredor Biológico del Bosque Mesófilo de Montaña en Hidalgo, Veracruz y Puebla.
4. Corredor Ecológico de la Sierra Madre Oriental



Fuente: CONANP, 2007; Polígono GIZ-CONANP; Ecorregiones CONABIO, 2008

Proyección: GTM Datum: WGS 1984

Figura 1.9 Corredor Ecológico de la Sierra Madre Oriental (CESMO) Propuesta CONANP-GIZ. Áreas Naturales Protegidas y Bosque templado de la Sierra Madre Oriental.

La Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, a través del proceso de implementación de la Estrategia de Cambio Climático para Áreas Naturales Protegidas (ECCAP), identificó la necesidad de impulsar y fortalecer la cooperación y coordinación entre sus diversos socios con el fin de sumar esfuerzos para la conservación de dichas áreas (CONANP, 2012). La Estrategia cuenta con seis componentes; dos sustantivos: mitigación y adaptación, tres de apoyo: conocimiento, comunicación y cultura, desarrollo de capacidades y asistencia técnica, y un componente de transversalidad de políticas públicas y vinculación interinstitucional (ECCAP 2010).

El objetivo de esta estrategia es fortalecer a las ANP como instrumentos para lograr una mejor adaptación de los ecosistemas y las poblaciones que habitan en ellas frente al cambio climático, y contribuir a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero y al enriquecimiento de los almacenes de carbono. En el marco de la ECCAP, la CONANP junto con la Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GIZ), por encargo del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear (BMU), están implementando el proyecto Cambio Climático y Gestión en Áreas Naturales Protegidas. El objetivo de este proyecto es el desarrollo conceptual y la implementación de medidas de mitigación y adaptación al cambio climático en áreas protegidas y zonas prioritarias para la conservación en la zona central de la Sierra Madre Oriental que posteriormente sirvan para retroalimentar a la ECCAP a nivel nacional (CONANP 2012).

Se identificó a la región de la Sierra Madre Oriental por ser considerada un hotspot de biodiversidad. Abarca alrededor de 2.5 millones de hectáreas, alberga ecosistemas prioritarios como selva baja caducifolia, bosque mesófilo de montaña, bosques de pino y encino, humedales, matorral xerófilo, entre otros. Esta región comprende cinco estados de la República Mexicana en donde existen tres ANP federales (Reserva de la Biósfera Sierra del Abra Tanchipa, la Región Prioritaria para la Conservación Xilitla y el Área de Protección de Recursos Naturales Cuenca Hidrográfica del Río Necaxa) y al menos tres proyectos para nuevas áreas, así como diversas áreas estatales, municipales y comunitarias (CONANP 2012).

De 2007 a 2010 se llevó a cabo el proyecto Corredor Ecológico Sierra Madre Oriental y Lagunas Costeras, el cual fue fundamental para detonar una nueva etapa de cooperación bilateral entre México y Alemania para el manejo de las ANP. En 2011, la inversión del gobierno de Alemania en materia de conservación de la biodiversidad en México, a través de la Agencia de Cooperación Alemana (GIZ) se triplicó, ascendiendo a un total de 16.5 millones de euros. Adicionalmente, este proceso de colaboración permitió establecer el proyecto Conservación de la Biodiversidad en la Sierra Madre Oriental y Golfo de México con el Banco de Desarrollo Alemán (KfW), por un monto de 15 millones de euros (SEMARNAT 2012).

Debido a los recientes proyectos que se han llevado a cabo en la porción central de la Sierra Madre Oriental, resulta evidente la necesidad de estudios a nivel regional que sustenten las teorías de vulnerabilidad de los diferentes ecosistemas presentes en la zona, a través del análisis de la sensibilidad del bosque templado a la variabilidad climática.

Capítulo 2. Metodología

El estudio de la relación entre el clima y la vegetación en la Sierra Madre Oriental comprendió un análisis del entorno geográfico, compilación de datos climáticos, análisis de series de tiempo y trabajo de campo (Fig. 2.1).

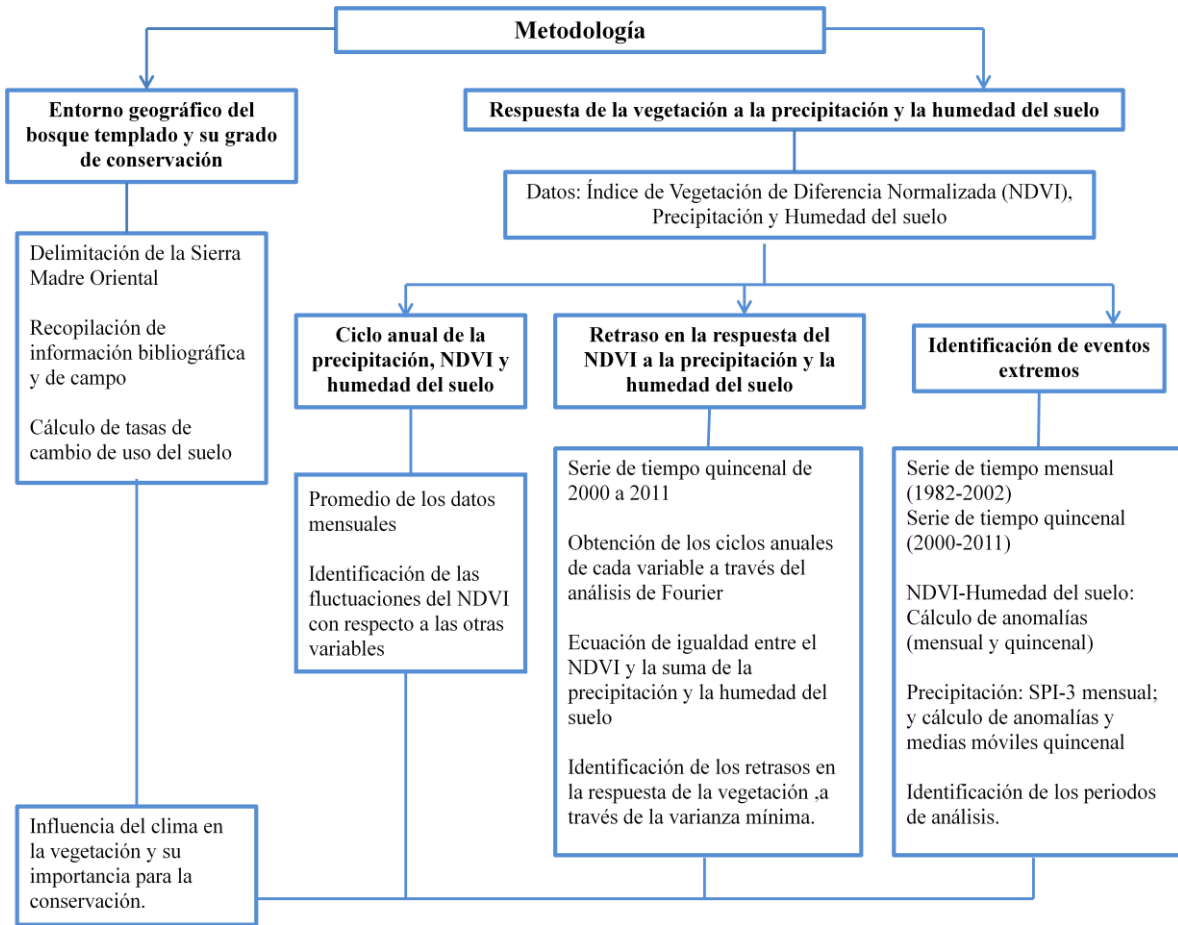


Figura 2.1 Esquema de la metodología

2.1 Datos

Se utilizaron datos de precipitación y de humedad del suelo y se analizaron sus efectos en la vegetación, a través de los datos del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Para los fines de la investigación y debido a la escala de análisis, se recurrió a datos en puntos de malla, descargables en formato raster. En la actualidad, se cuentan con bases de datos de variables meteorológicas que cubren periodos prolongados de tiempo y

que varían en su resolución espacial y temporal (Domínguez 2012). Estas variables se encuentran disponibles en línea y significan una fuente importante de información para la investigación.

El análisis temporal se estableció en dos periodos: de 1982 a 2002 y de 2000 a 2011, con diferentes resoluciones de escala espacial y temporal. A continuación se describen las fuentes de los datos de las tres variables para ambos periodos.

2.1.1 Precipitación

La precipitación en la zona está determinada por eventos meteorológicos como los ciclones tropicales, los frentes fríos y la influencia de los periodos de sequía. Para esta variable, a través del análisis de las series de tiempo, se identificaron periodos anómalamente húmedos y secos.

Unidad de Investigación Climática (CRU) 1982-2002

Para obtener los datos de este periodo, se utilizó la base de la Unidad de Investigación Climática (CRU TS2.1) de la Universidad de Anglia Oriental, con una resolución espacial de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, disponible en la página del Instituto Internacional de Investigación para el Clima y la Sociedad (IRI por sus siglas en inglés; en adelante se utilizarán las siglas en inglés para las instituciones y los datos). En este periodo, de la misma base, CRU TS2.1, se obtuvo el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), con el fin de detectar periodos de sequía y su relación con el verdor de la vegetación.

Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) 1982-2002

El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) se consideró para analizar la respuesta de las anomalías de los datos de vegetación a esta variable. Los datos del SPI son calculados por el IRI y tienen una resolución de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Este índice, diseñado por McKee y colaboradores (1993), representa el número de desviaciones estándar que cada registro de precipitación se desvía del promedio histórico. Se basa en acumulaciones de precipitación mensual y sus valores pueden ser comparados a través de diferentes regiones climáticas.

Fue diseñado para ser un indicador espacial de la sequía y puede calcularse con distintas escalas de tiempo para el análisis de disponibilidad de agua. Es un índice basado en la probabilidad de la precipitación para cualquier escala de tiempo (Galván 2011).

El SPI es uno de los índices de sequía más utilizados en la actualidad. El estudio de Agnew (2000) demostró la relación entre la duración de una sequía, la frecuencia de las sequías, y la escala de tiempo de la sequía mediante el SPI. De acuerdo con el mismo autor, el SPI se calcula con la ecuación 1.

$$SPI = \frac{X_{ik} - \bar{X}_i}{\sigma_i} \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

σ_i = Desviación estándar de estación observada.

X_{ik} = Precipitación de la estación observada y observación histórica.

\bar{X}_i = Precipitación media de la estación observada.

Diferentes escalas de tiempo se aplican a diferentes tipos de sequía (McKee *et al.* 1993), las más utilizadas son las de 3, 6, 12, 24 y 48 meses, y se refieren al número de meses que se toman en cuenta para realizar el cálculo, que implica la conversión de una distribución gamma original a una distribución normal de la precipitación y su evaluación en desviaciones estándar (Agnew 2000). Se utilizó el SPI de 3 meses (SPI-3) ya que es el que se recomienda para estudiar anomalías de lluvia relacionadas con variabilidad intraestacional, además de que se ha demostrado que es el que tiene mayor relación con los procesos vegetales (Peters y Ji 2003)

Reanálisis Regional de Norteamérica (NARR) 2000-2011

Para el segundo periodo de análisis se utilizó la base de datos del Reanálisis Regional de Norteamérica (NARR) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA),

modificada por el grupo de trabajo del área de climatología del Instituto de Geografía de la UNAM con el fin de obtener mayor resolución espacial (de $0.3^\circ \times 0.3^\circ$ a $0.09^\circ \times 0.09^\circ$).¹

El objetivo del reanálisis es ofrecer una base de información para la investigación que sea adecuada para muchos usos, incluyendo las investigaciones meteorológicas y climáticas (Kalnay *et al.* 1996). La idea básica del proyecto de reanálisis es utilizar un sistema de pronóstico/análisis para realizar una asimilación de datos usando la información meteorológica disponible desde el año 1957 (Domínguez 2012).

2.1.2 Vegetación (NDVI)

Para determinar la respuesta de la vegetación a los cambios en la precipitación, se utilizó como referencia el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Los índices de vegetación tienen su origen en el interés de monitorear las fluctuaciones en la vegetación y entender cómo éstas afectan el ambiente. Primero se comenzaron a utilizar sensores remotos satelitales para medir y mapear la densidad de la vegetación verde sobre la Tierra. Con el sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) de la NOAA se han recogido imágenes de la superficie del planeta desde 1982.

Al medir la longitud de onda y la intensidad de la luz visible e infrarroja cercana, reflejada por la superficie de la tierra, los científicos utilizan un algoritmo llamado "Índice de Vegetación" para cuantificar las concentraciones de vegetación de hoja verde en todo el mundo. Después, se combinan los Índices de Vegetación diarios en compuestos de 8, 16 o 30 días, y se crean mapas detallados de la densidad de la vegetación de la Tierra, que identifican dónde las plantas están creciendo y dónde están bajo estrés, debido a la falta de agua. El NDVI se calcula a partir de la luz visible e infrarroja cercana reflejada por la vegetación (Weier y Herring 2013).

En la Figura 11, se puede observar que la vegetación sana (izquierda) absorbe la mayor parte de la luz visible que le llega, y refleja una gran parte de la luz del infrarrojo cercano.

¹ Datos obtenidos a través de Luis Clemente López Bravo, Instituto de Geografía, UNAM.

La vegetación poco saludable o escasa (a la derecha), refleja más luz visible y menos luz en el infrarrojo cercano.

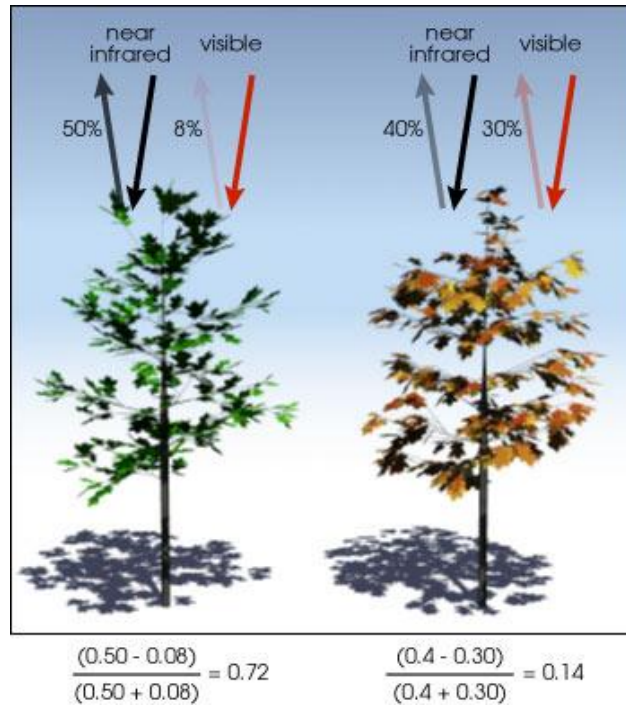


Figura 2.2 Cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI. Ilustración de Robert Simmon. Fuente: http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php

Para cuantificar la densidad de crecimiento de las plantas se utiliza la ecuación 2. Los cálculos de NDVI para un píxel dado siempre resultan en un número que oscila entre menos uno (-1) y más uno (1); sin embargo, no hay hojas verdes que den un valor cercano a cero. Un cero significa sin vegetación y cerca de 1 (0.8-0.9) indica el máximo de densidad de hojas verdes (Weier y Herring 2013).

$$NDVI = (NIR - VIS) / (NIR + VIS) \dots \dots \dots (2)$$

Dónde:

NIR = Radiación del infrarrojo cercano

VIS = Radiación visible

Las imágenes que proporciona el IRI, se encuentran en formato digital con valores de 0 a 255, éstas fueron transformadas a la expresión real del NDVI (-1, 1) de acuerdo con la siguiente expresión: $((\text{valor de NDVI})-42.5)/212.5$

Estudios de Cartografía y Modelización de Inventarios Mundiales (GIMMS) 1982-2002

Para obtener los datos de NDVI del primer periodo de estudio se utilizó la base Estudios de Cartografía y Modelización de Inventarios Mundiales (GIMMS) generada en el *Global Land Cover Facility* (GLCF) en la Universidad de Maryland, con una resolución de 8 km x 8 km.

LandDAAC MODIS 2000-2011

Para el segundo periodo se utilizó la base de datos *LandDAAC MODIS* del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Estos datos están disponibles desde el año 2000 y tienen una resolución de 250 m x 250 m.

Las imágenes del Espectro-radiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS) permiten elaborar índices de vegetación con resoluciones espaciales de 250 m, 500 m, 1 km y 0.25 grados, en intervalos temporales de 16 días y 1 mes. El NDVI se calcula con la información que brindan estas imágenes (Weier y Herring 2013).

2.1.3 Humedad del suelo

La humedad del suelo es la cantidad de agua por volumen de suelo que hay en un terreno y desempeña un papel importante en el balance energético entre la superficie terrestre y la atmósfera, así como en la evolución del ciclo hidrológico. La humedad del suelo se estima con un modelo hidrológico de una sola capa, que utiliza la precipitación y la temperatura observadas, y calcula la humedad del suelo, la evaporación y la escorrentía. Se expresa comúnmente como la cantidad de agua (en milímetros) presentes en una profundidad de un metro del suelo. (Fan y Van den Dool 2008).

Centro de Predicción Climática (CPC) 1982-2002

Para el primer periodo de estudio, la humedad del suelo se obtuvo de la base de datos de Humedad del Suelo Global Mensual de Alta Resolución (GMSM) del Centro de Predicción del Clima (CPC) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). Se trata de datos mensuales con una resolución de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$. Expresan la cantidad de agua (en milímetros) presentes en una profundidad de un metro de suelo.

Reanálisis Regional de Norteamérica (NARR) 2000-2011

La humedad del suelo, para el segundo periodo de estudio, se obtuvo de la misma base que la precipitación, del Re-análisis Regional para América del Norte (NARR) de la NOAA. Se obtuvieron compuestos quincenales, a partir de los datos diarios, con una resolución de $0.3^{\circ} \times 0.3^{\circ}$. La variable *Soil Moisture Content* (Contenido de Humedad del Suelo) indica la cantidad de agua presente en el suelo y se representa en unidades de kg/m^2 .

2.2 Ciclo anual de la precipitación, la temperatura, la humedad del suelo y el NDVI

En una primera aproximación, se buscó entender la relación del NDVI con la humedad del suelo y con el ciclo anual de la precipitación en la Sierra Madre Oriental, para ello, se utilizaron los datos promedio de las tres variables, se graficaron y se identificaron los periodos de inicio y fin de la temporada de lluvias y sus impactos en el verdor de la vegetación a lo largo del año. Se graficaron también los datos promedio de temperatura a nivel mensual, pero se observó una relación más directa de las fluctuaciones del NDVI con la precipitación y la humedad del suelo.

2.3 Retraso en la respuesta del NDVI a la precipitación y la humedad del suelo

A partir de la gráfica en la que se comparan el NDVI, la humedad del suelo y la precipitación, se llegó a la conclusión de que las tres variables responden de manera similar al ciclo anual en la región. No obstante, se observó un tiempo de retraso entre una y otra.

Con el fin de obtener ese tiempo, se calcularon los valores promedio quincenales (2000-2011) y se generó una función para cada variable, utilizando el análisis de Fourier, que es una técnica utilizada en estadística para identificar los patrones y ciclos dentro de las series de datos. El propósito de este análisis es descomponer una serie de tiempo compleja, con componentes cíclicos, en una función de senos y cosenos con longitudes de onda particulares. Esta técnica es muy utilizada para explicar los ciclos de los fenómenos celestes, y para identificar patrones del tiempo y del clima, la ventaja de este análisis es que nos permite ver las contribuciones que tienen diferentes frecuencias a una serie de tiempo y se genera un espectro de datos continuo, representado a partir de las oscilaciones de frecuencias armónicas (Wilks 2011). Posteriormente, se normalizaron las funciones obtenidas de precipitación y humedad del suelo, con valores de 0 a 1 para hacerlas comparables con el NDVI. Una vez calculados estos valores, se aplicó la ecuación 3, en la que se suma la precipitación con la humedad del suelo (función suma) con el fin de igualar el valor resultante al NDVI.²

$$NDVI = (F_1)(P^*-t_1) + (F_2)(HS^*-t_2) + constante \dots \dots \dots (3)$$

La P* y la HS* se refieren a la precipitación y la humedad del suelo normalizadas. La F₁(Factor 1), F₂ (Factor 2) y la constante se utilizaron para igualar la escala de las variables. Por último, la t₁ y la t₂ se refieren al corrimiento, es decir el valor en tiempo que tiene que restarse para que la precipitación y la humedad del suelo puedan igualarse al NDVI.

Para obtener el corrimiento se utilizó el método de la varianza mínima, en el que se sustituyen t₁ y t₂, por valores de 1 a n quincenas, en la función suma; el resultado obtenido se resta al valor original de NDVI y se eleva al cuadrado, con el fin de obtener la varianza. Se selecciona el resultado más bajo, que representa el valor más cercano a la igualdad con el NDVI original, y se repite el proceso para cada dato quincenal.

² El análisis de Fourier y la ecuación obtenida fueron calculados por Sigrid Morett González y Luis Eduardo Herrera Aztegui, Instituto de Geografía, UNAM.

El corrimiento obtenido indica el tiempo que tarda la vegetación en responder a los cambios en la humedad del suelo y la precipitación para cada temporada del año.

2.4 Identificación de eventos extremos

Los datos, obtenidos a nivel quincenal y mensual, se acomodaron en series de tiempo y a partir de ellos se generaron gráficas que permitieron visualizar la relación entre las tres variables. Para identificar períodos húmedos y secos se realizó un cálculo de anomalías (Wilks, 2011).

$$Z = \frac{X_i - \bar{X}_i}{\bar{X}} \dots \dots \dots (4)$$

Donde

Z: Anomalía

X_i: Valor de un periodo dado

\bar{X}_i : Valor medio del periodo dado

Para el caso de la precipitación, en la primera serie de datos mensuales, se utilizó el SPI-3 para identificar el efecto de la precipitación acumulada, ya que es la que se ha demostrado que tiene mayor influencia en los procesos de la vegetación, y al ser un cálculo que toma en cuenta la desviación estándar, representa de manera similar a las anomalías de precipitación. En la segunda serie de datos quincenales, se realizó un cálculo de anomalías y medias móviles para normalizar o estandarizar el efecto de los extremos positivos de lluvia.

A partir de las anomalías se identificaron eventos extremos de déficit y superávit de precipitación para ambos periodos, y se realizó un análisis más detallado de éstos para cada una de las tres zonas.

2.5 Cambio de uso de suelo y cubierta vegetal

Con el fin de determinar el impacto del cambio de uso del suelo y de la cubierta vegetal, se identificaron los tipos de vegetación y cobertura del suelo para la zona, con base en la cartografía de las series I y III, de la carta de uso del suelo y vegetación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), escala 1:250,000.

Primero se procedió a una homologación de los tipos de vegetación de las coberturas de uso de suelo y vegetación de 1976 a 2005, tomando como base la clasificación de Bocco et al. 2002, ya que los sistemas de clasificación de INEGI han cambiado a lo largo del tiempo y esto dificulta la identificación de zonas de cambio.

2.5.1 Tasas de cambio de uso de suelo

Se calcularon las tasas de cambio de uso de suelo para toda el área de estudio, con base en la ecuación de la FAO, 1996 (ecuación 5).

$$t = \left(1 - \frac{S_1 - S_2}{S_1} \right)^{1/n} - 1 \dots\dots\dots 5$$

Donde:

t es la tasa de cambio (para expresar en % hay que multiplicar por 100),

S₁ superficie en la fecha 1,

S₂ superficie en la fecha 2,

n es el número de años entre las dos fechas

Posteriormente se calcularon las tasas de cambio para los tipos de vegetación seleccionados de la Sierra Madre Oriental (bosque de coníferas, bosque de latifoliadas y bosque mesófilo de montaña).

Capítulo 3. Resultados

3.1 Moduladores del clima en la Sierra Madre Oriental

El clima en la región de estudio es en general templado, con lluvias todo el año pero predominantes en verano y otoño. Las lluvias de esas dos estaciones están relacionadas con el flujo de humedad que producen los vientos alisios o vientos del este. En invierno, las lluvias están relacionadas con los frentes fríos, conocidos en la región con el nombre de "nortes", y son parte de ondas de latitudes medias que viajan al este, con una intrusión por el Golfo de México. En verano, los vientos alisios producen un importante flujo de humedad, que asociados al efecto orográfico, mantienen lluvias constantes y en ocasiones, pueden ser extremas por el efecto de ciclones tropicales (Magaña *et al.* 2012).

La precipitación aumenta localmente por la presencia de montañas con dirección normal a la de los vientos dominantes, de manera que hay contrastes, en la cantidad de lluvia, entre pendientes de diferente orientación. La mayor extensión de la región registra sequía intraestival o canícula, que se refiere a una disminución del número de días con lluvia en los meses de verano, que en las estadísticas climáticas se marca notablemente. Durante el invierno la precipitación es menor que en verano; sin embargo, sobre las áreas mejor expuestas a los "nortes" se presenta precipitación abundante (Vidal 2005).

3.1.1 El Niño-Oscilación del Sur

Gran parte de la variabilidad del clima de la región está modulada por el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENOS), el cual puede resultar en periodos secos/húmedos de verano, durante la fase El Niño/La Niña (Magaña, 2004). Existen, también, otras formas de variabilidad del clima en la zona, relacionadas con fluctuaciones a una escala de décadas, como lo es la Oscilación Multidecadal del Atlántico. Así, la combinación del océano Atlántico cálido y el océano Pacífico frío, tienden a alterar las circulaciones atmosféricas en niveles bajos sobre los mares intra-americanos, reduciendo el flujo de humedad hacia esta región (Magaña *et al.* 2012).

En la región, cuando hay un evento de El Niño, la humedad del suelo presenta anomalías positivas (por arriba del promedio) en invierno, pero altamente negativas (por debajo del promedio) en verano lo que implica condiciones contrastantes de afectaciones en los ecosistemas por sequías. En contraste, cuando se presentan condiciones La Niña en forma dominante, la tendencia es a inviernos secos y veranos más lluviosos en la parte norte, y húmedos en la parte sur, y con ello, se presentan valores de humedad del suelo por encima de la media (Figura 3.1). Además, debe recordarse que bajo condiciones La Niña, pueden ocurrir más días con precipitaciones y la probabilidad de ciclones tropicales que penetran a tierra por el Golfo de México también aumenta (CONANP-GIZ 2013).

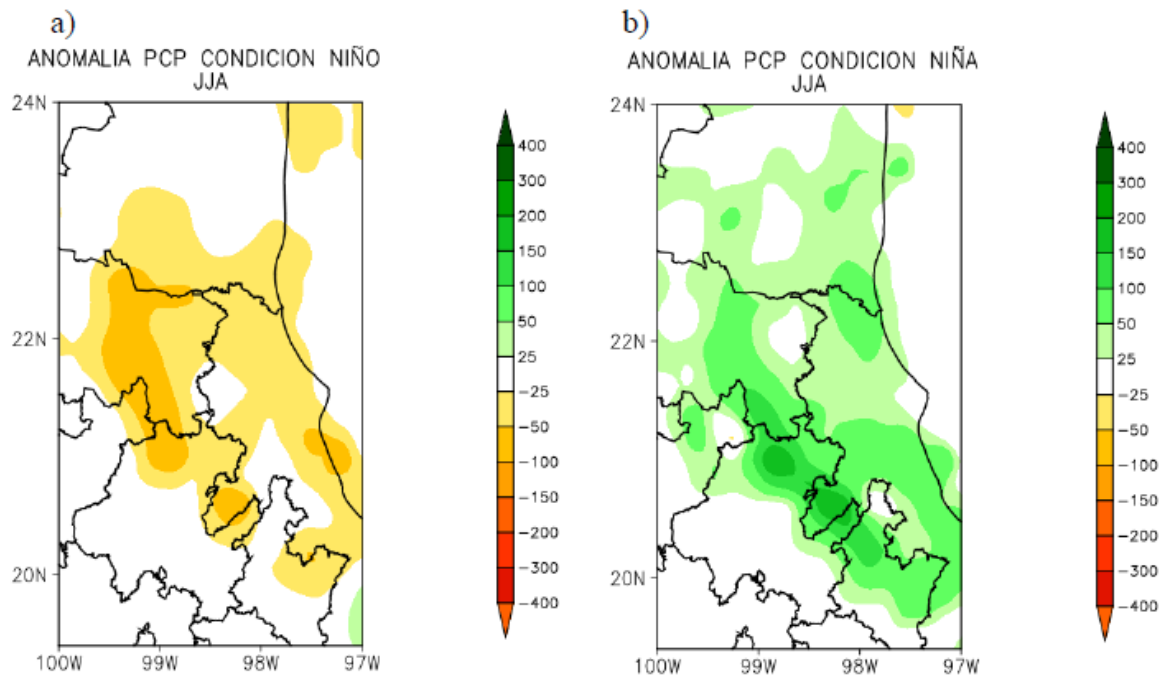


Figura 3.1 Anomalías promedio de precipitación (mm) entre junio y agosto en la SMO a partir de veranos con condiciones a) El Niño y b) La Niña, para los años 1982, 1986 y 1997. Tomado de Magaña *et al.* 2012.

3.1.2 Influencia del paso de ciclones tropicales en la precipitación

Uno de los eventos que pueden provocar mayores cambios en las anomalías de NDVI es el paso de ciclones tropicales. Al hacer una comparación de la precipitación mensual y el paso de huracanes de 1982 a 2002 en la zona, se llegó a la conclusión de que éstos tienen una influencia importante en el comportamiento de los extremos de lluvia (Figuras 3.2 y 3.3).

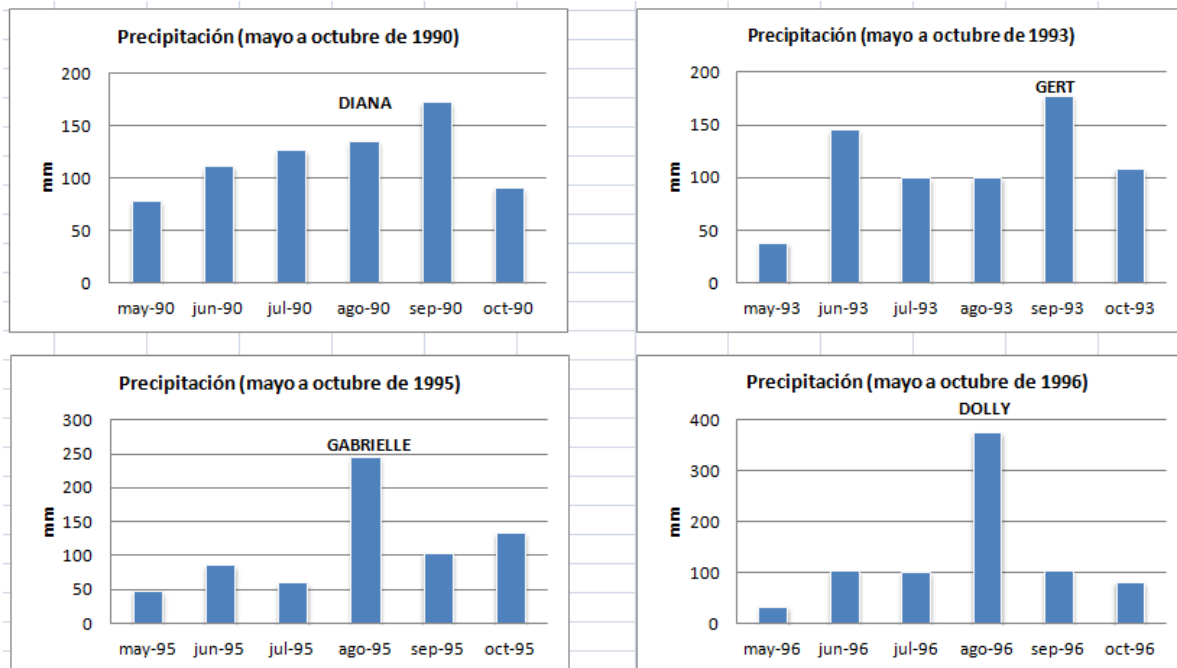


Figura 3.2 Efecto del paso de ciclones tropicales en la precipitación de la zona de estudio para algunos años. Elaboración propia. Fuente: IRI, UEA CRU TS2p1

La temporada de huracanes para la zona empieza el 1 de junio y termina el 30 de noviembre. Las perturbaciones ciclónicas tienen su origen en el Mar de las Antillas y el Golfo de México, son más frecuentes hacia fines del verano y principios del otoño y su influencia se manifiesta en el aumento de lluvia en septiembre y octubre (Vidal, 2005).

Se ha estudiado que las precipitaciones más intensas en la región están frecuentemente relacionadas con ciclones tropicales. No obstante, existe una gran incertidumbre sobre los cambios en su actividad futura, ya que los eventos extremos son la parte más incierta del clima (Magaña *et al.* 2012), por ello es importante reconocer la influencia que tienen en los regímenes meteorológicos e identificar la vulnerabilidad que se tendría ante un aumento o una disminución en este tipo de fenómenos.

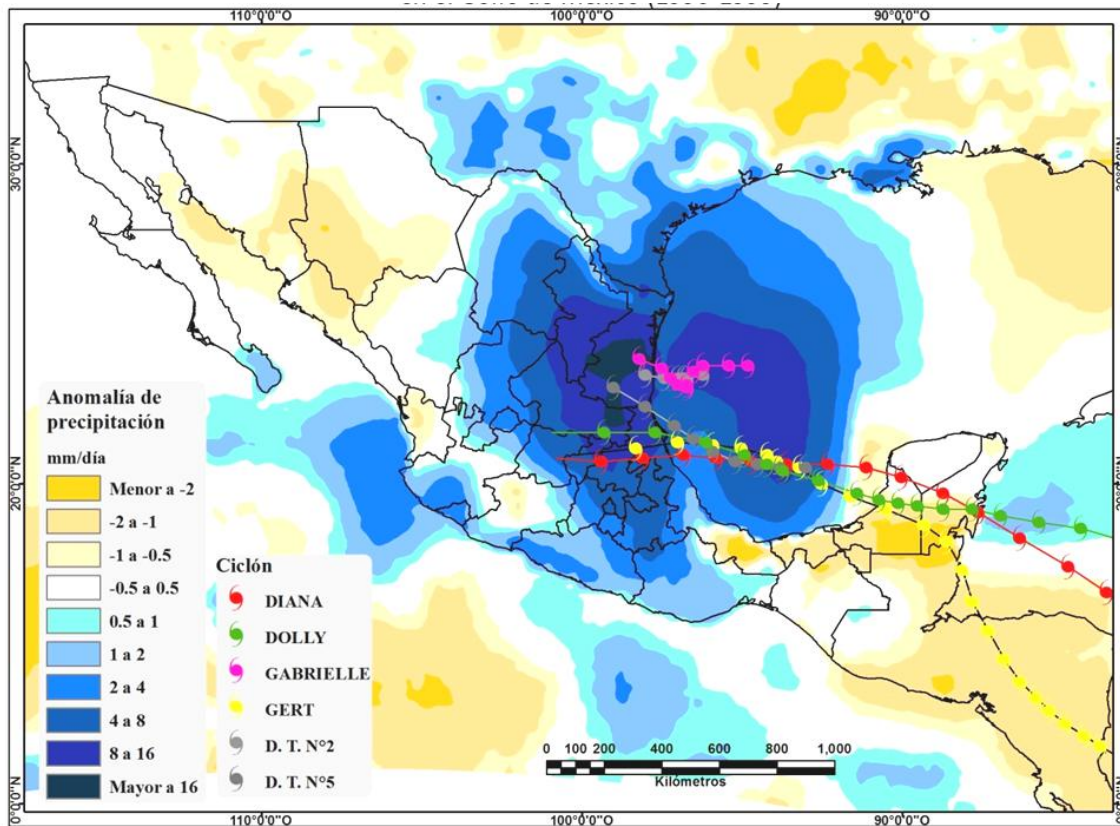


Figura 3.3 Compuesto de anomalía de precipitación de los días de paso de los ciclones tropicales que tocaron tierra en el Golfo de México durante la década de 1990. Elaboración propia con base en las trayectorias de líneas y puntos de la *National Oceanic and Atmospheric Administration*, NOAA

<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/ibtracs/index.php?name=ibtracs-data> Y la precipitación acumulada de la base de datos del *North American Regional Reanalysis*, NARR <http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/narr/plotday.pl>

No existe una idea clara del impacto de este tipo de eventos en el futuro; sin embargo, se piensa que en general podría aumentar la presencia de ciclones de mayor categoría. De acuerdo con los pronósticos del estudio de Magaña (2004), realizado para los años 1997-1998, se registró que hubo una disminución de huracanes en el Caribe y Golfo de México, asociados con un año El Niño. Esto podría significar una alta vulnerabilidad de la región ante este tipo de eventos, ya que como ha sido evidente, los huracanes representan una aportación importante de lluvia.

3.2 Efectos del ciclo anual de precipitación, temperatura y humedad del suelo en la vegetación

Se ha estudiado que la precipitación tiene una influencia importante en la vegetación; sin embargo, muchas de las interacciones tierra-atmósfera aún no están totalmente comprendidas. Los parámetros que se consideran de interés en un estudio de relación de la atmósfera con la tierra son la temperatura del suelo, la cubierta de nieve, la humedad del suelo y la vegetación. Las dos últimas son las que resultan tener los efectos más importantes, y su variabilidad en el espacio y el tiempo puede afectar el intercambio de calor y humedad con la atmósfera (Castro *et al.* 2009).

Se ha demostrado que la humedad del suelo y la vegetación pueden tener fuertes respuestas a las precipitaciones antecedentes. Por ejemplo, se ha notado un rápido reverdecimiento de la vegetación y un aumento de la humedad del suelo que se produce después de la aparición del monzón en América del Norte (Castro *et al.* 2009). Por esta razón se seleccionó la precipitación para el análisis climático, y también porque a través de ella se pueden caracterizar fenómenos meteorológicos de diferentes escalas como las sequías o el paso de frentes fríos y ciclones tropicales en la región.

La reacción del NDVI es reflejo de una serie de relaciones suelo-agua-vegetación, donde el déficit de lluvia no es el único detonante del estrés de la vegetación; sin embargo, como se puede observar en la figura 3.3 es posible identificar una correlación más alta a lo largo del año entre la precipitación, la humedad del suelo y el NDVI en las tres zonas de estudio.

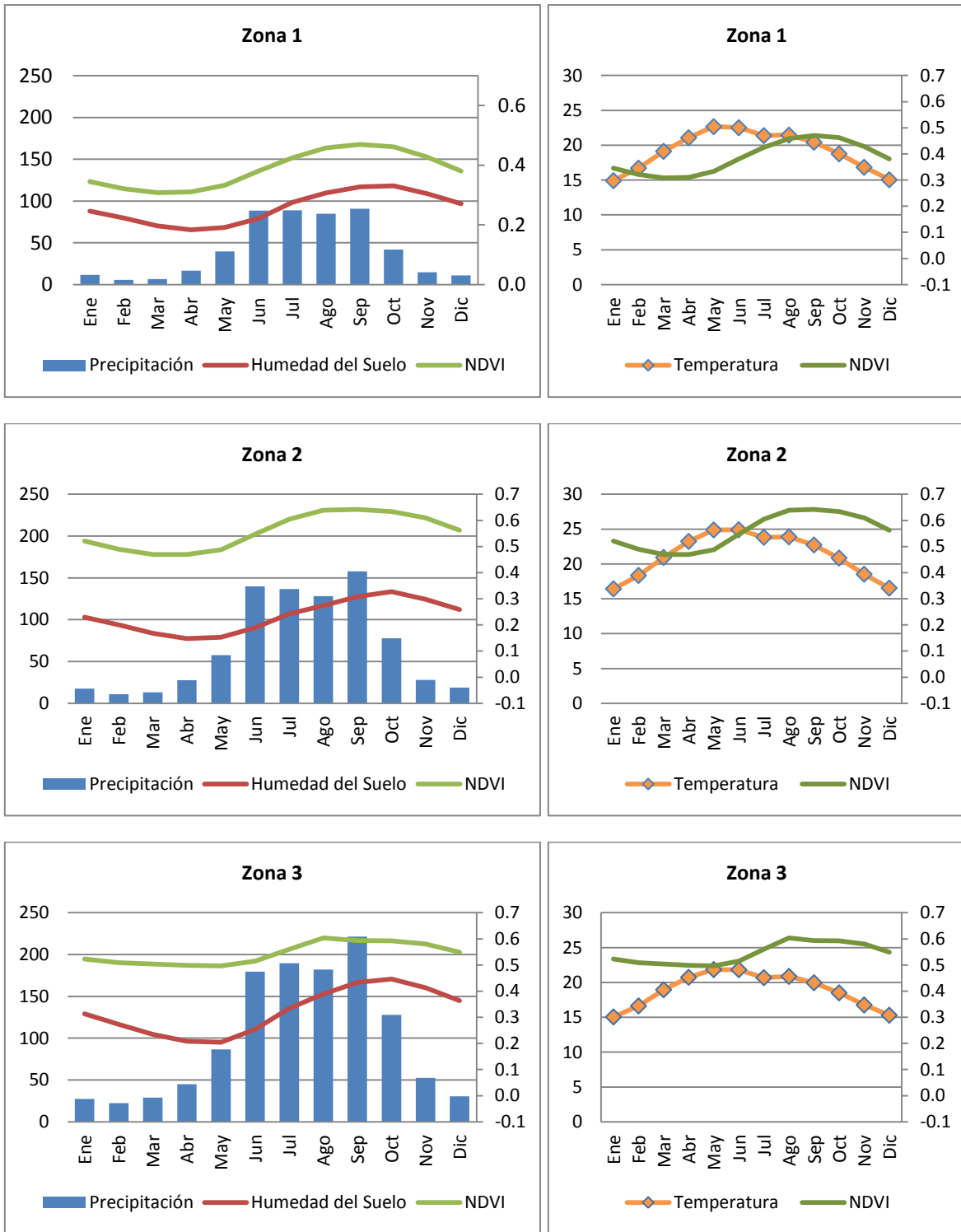


Figura 3.4 Relación del NDVI con el ciclo anual de precipitación, humedad del suelo y temperatura. (Los datos de humedad del suelo deben multiplicarse por tres para obtener el valor real).

La estacionalidad de las lluvias en la Sierra Madre Oriental está fuertemente influenciada por la temporalidad de los fenómenos que se describieron anteriormente. La temporada de lluvias inicia en mayo; sin embargo, el aumento significativo en el verdor de la vegetación se aprecia hasta junio-julio y sigue esa marcha hasta octubre. No es evidente la influencia de la canícula en los valores mensuales de NDVI. Posteriormente, con la disminución de las lluvias, disminuye el NDVI, hasta que alcanza sus valores mínimos cerca del mes de marzo y abril.

De manera general, el déficit de precipitación lleva a un déficit de humedad del suelo y éste impone un estrés hídrico a la vegetación, estos resultados coinciden con los analizados a nivel nacional por Galván (2011). Los cambios en el verdor de la vegetación varían de acuerdo con la temporada del año (Figura 3.5). Se observa el cambio en la intensidad del verdor de la vegetación, principalmente en las zonas 1 y 2. Es decir que hay una menor fluctuación en los datos de NDVI conforme la precipitación es más abundante todo el año como en la zona 3, donde predomina el bosque mesófilo.

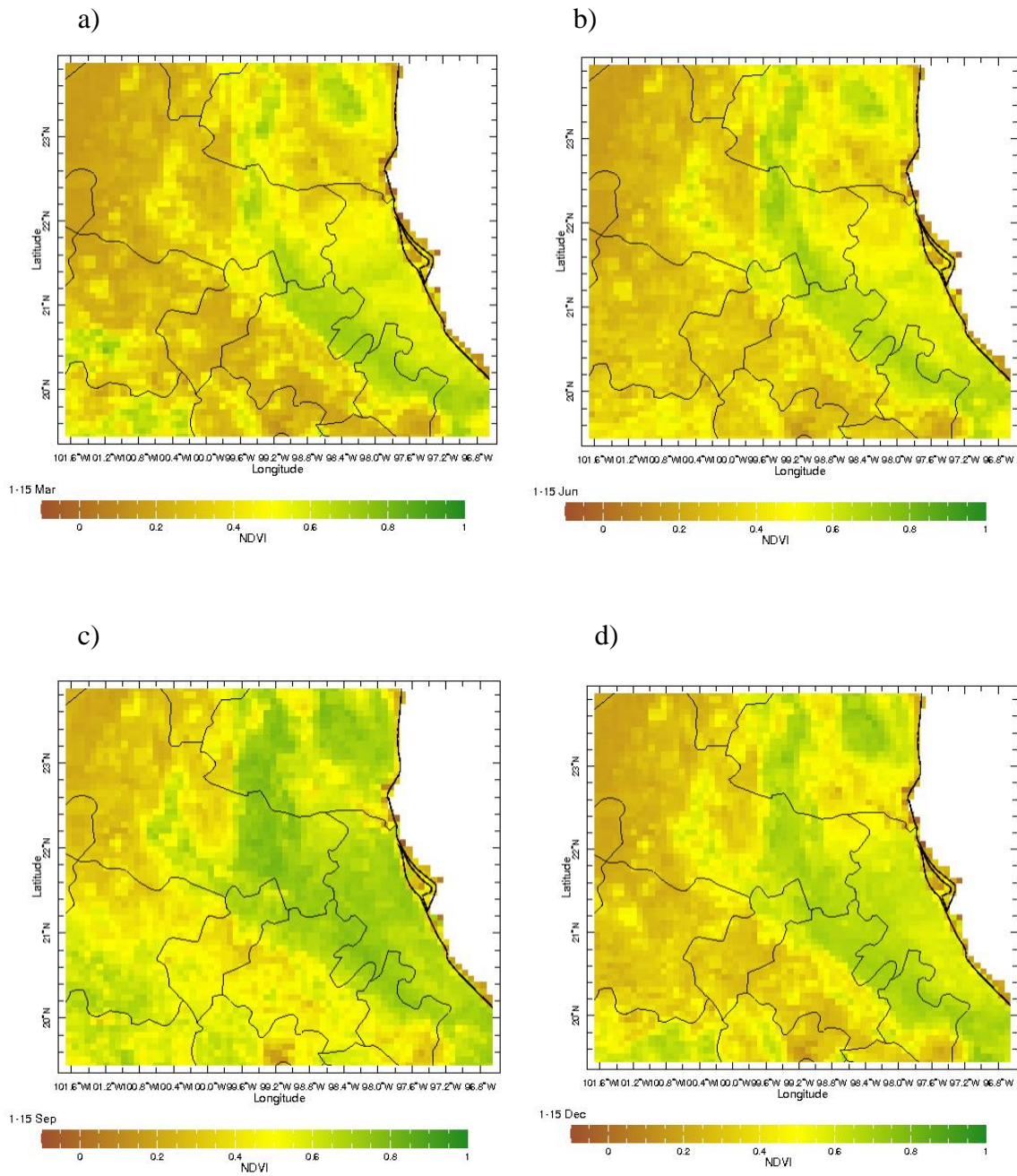


Figura 3.5 Valores promedio de NDVI para: a) marzo, b) junio, c) septiembre y d) diciembre (promedios 1982-2002). Obtenido de IRI, en:

<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/UMD/GLCF/GIMMS/NDVIg/global/ndvi/>

3.3 Retraso en la respuesta del NDVI a la precipitación y la humedad del suelo

La relación entre el ecosistema y el régimen de lluvia es claro; sin embargo, para obtener los tiempos en que la vegetación responde a las otras dos variables, se utilizó un análisis de Fourier y se obtuvieron los retrasos en quincenas para las tres zonas. Como se describe en la metodología, este tipo de análisis son ampliamente utilizados para estudiar el comportamiento de las variables meteorológicas. En este caso, se utilizó para obtener una función continua de las tres variables que representara el ciclo anual a partir del análisis de las series de datos y posteriormente determinara el corrimiento que existe entre la temporada de lluvias, la humedad del suelo y la respuesta en el NDVI.

El tiempo de respuesta de la vegetación a la precipitación en la temporada más lluviosa es de aproximadamente 2 quincenas, conforme disminuyen las lluvias el tiempo de respuesta es más largo (3 quincenas) debido a que, a pesar de que disminuye la precipitación, la lluvia de invierno sigue implicando un aporte importante, y esto permite que la vegetación no disminuya su verdor tan rápidamente, además de que la cantidad de agua acumulada en el suelo, disponible para las plantas, aún es relevante. No obstante, al llegar a finales de febrero y principios de marzo, se empieza a apreciar una disminución más importante en la cantidad de lluvia y esto provoca que la vegetación pierda verdor más drásticamente y tenga una respuesta casi inmediata.

Se obtuvieron resultados para las tres zonas. Se comparó el comportamiento de la función suma (suma de los espectros de precipitación y humedad del suelo, obtenidos a través del análisis de Fourier) y el de los datos quincenales de NDVI (Figuras 3.6, 3.7 y 3.8). Se muestran los corrimientos, después de haber aplicado la ecuación (3), para cada variable y para cada temporada del año, determinados a través del método de la varianza mínima, descrito en el capítulo 2 (Tablas 3.1, 3.2 y 3.3).

Zona 1: La función de NDVI y la de la suma de la precipitación y la humedad del suelo no tuvieron una respuesta igual a lo largo del año. En la zona 1, para la temporada lluviosa el corrimiento fue de 2 quincenas para la lluvia y de una para la humedad del suelo; en el invierno hubo un corrimiento de 3 quincenas para la precipitación y de 2 y media para la humedad del suelo y durante la temporada de menor precipitación la respuesta fue inmediata, así como en el inicio de las lluvias. Se puede observar que a pesar del aumento en la intensidad de las lluvias y una mayor cantidad de humedad en el suelo, la vegetación no sigue aumentando su verdor en temporada de lluvias.

Tabla 3.1 Retrasos en la respuesta del verdor de la vegetación a la precipitación y la humedad del suelo. Zona 1.

Periodo	Fechas	Corrimiento precipitación	Corrimiento humedad del suelo
Lluvias (inicio)	2° quincena de mayo - 1° quincena de julio	0	0
Lluvias (fin)	2° quincena de julio - 1° quincena de noviembre	2	1
Invierno	2° quincena de noviembre - 1° quincena de febrero	3	2.5
Estiaje	2° quincena de febrero - 1° quincena de mayo	0	0

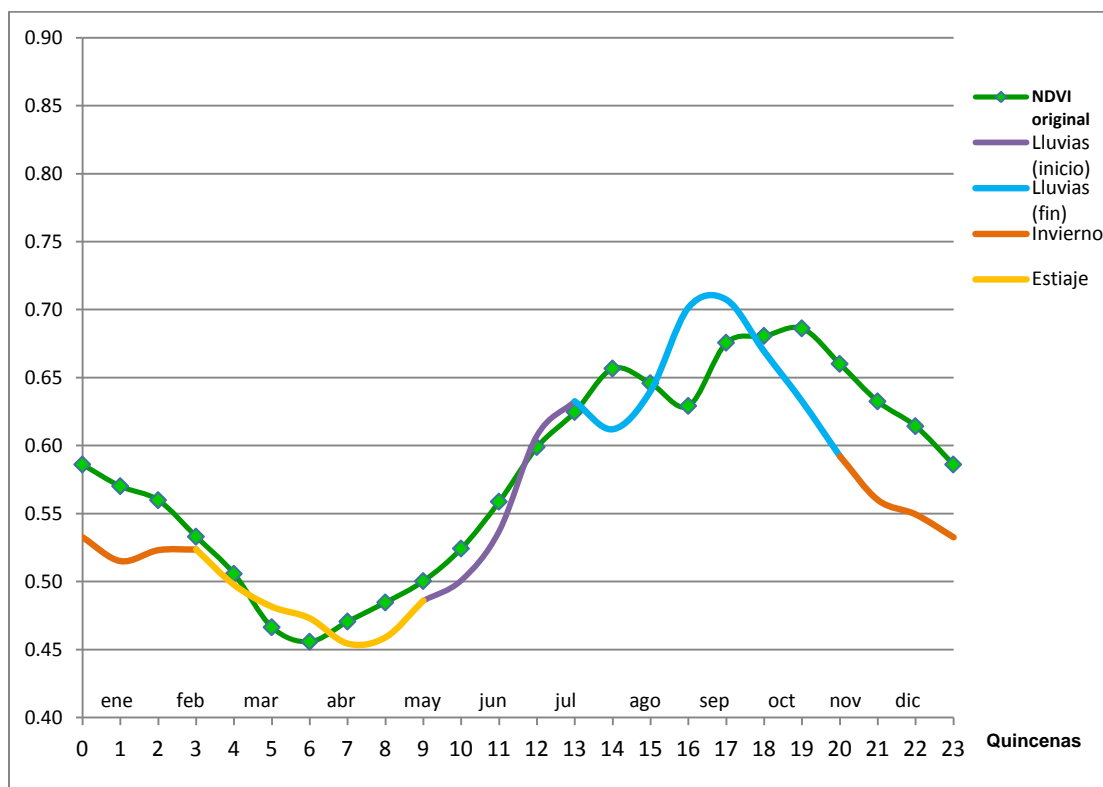


Figura 3.6 Relación de la función de NDVI con la función (suma) de la precipitación y la humedad del suelo, Zona 1. La división por colores en la gráfica representa un tiempo de respuesta diferente.

Zona 2: En la zona 2, para la temporada lluviosa el corrimiento fue de 2 quincenas para la lluvia y de una y media para la humedad del suelo, en el invierno hubo un corrimiento de 3 quincenas para la precipitación y de 2 para la humedad del suelo y durante la temporada de menor precipitación la respuesta fue inmediata para la humedad del suelo y de media quincena con respecto a la precipitación, igual que para el inicio de las lluvias. Se puede observar que, en esta última temporada, la vegetación presenta un comportamiento que no coincide totalmente con la precipitación o la humedad del suelo, y probablemente responda a otros factores como el aumento de temperaturas para esa temporada.

Tabla 3.2 Retrasos en la respuesta del verdor de la vegetación a la precipitación y la humedad del suelo. Zona 2.

Periodo	Fechas	Corrimiento precipitación	Corrimiento humedad del suelo
Lluvias (inicio)	2° quincena de mayo - 1° quincena de julio	0.5	0
Lluvias (fin)	2° quincena de julio - 1° quincena de noviembre	2	1.5
Invierno	2° quincena de noviembre - 1° quincena de febrero	3	2
Estiaje	2° quincena de febrero - 1° quincena de mayo	0.5	0

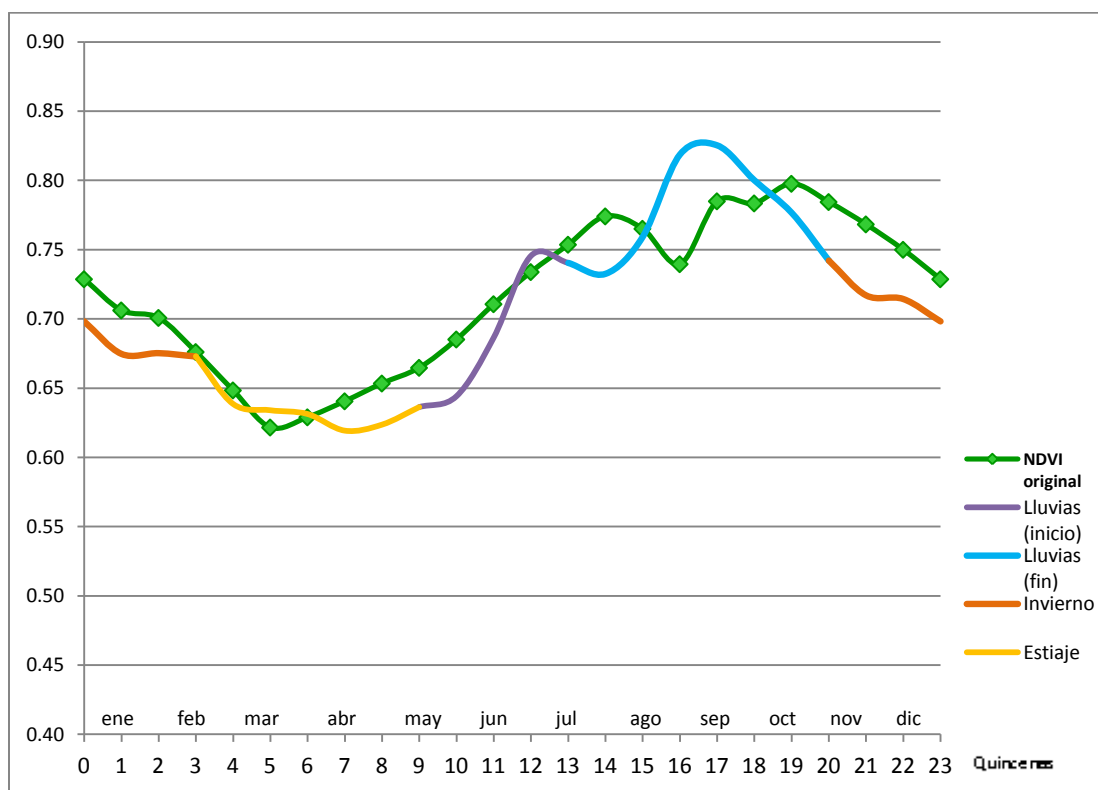


Figura 3.7 Relación de la función de NDVI con la función (suma) de la precipitación y la humedad del suelo, Zona 2. La división por colores en la gráfica representa un tiempo de respuesta diferente.

Zona 3: En esta zona, para la temporada más lluviosa el corrimiento fue de 2 quincenas para la lluvia y de una para la humedad del suelo, en el invierno hubo un corrimiento de 2 quincenas y media para la precipitación y de una para la humedad del suelo y durante la temporada de menor precipitación la respuesta fue inmediata, igual que hacia el inicio de la temporada de lluvias.

Tabla 3.3 Retrasos en la respuesta del verdor de la vegetación a la precipitación y la humedad del suelo. Zona 3.

Periodo	Fechas	Corrimiento precipitación	Corrimiento humedad del suelo
Lluvias (inicio)	2° quincena de mayo - 1° quincena de julio	0	0
Lluvias (fin)	2° quincena de julio - 1° quincena de noviembre	2	1
Invierno	2° quincena de noviembre - 1° quincena de febrero	2.5	1
Estiaje	2° quincena de febrero - 1° quincena de mayo	0	0

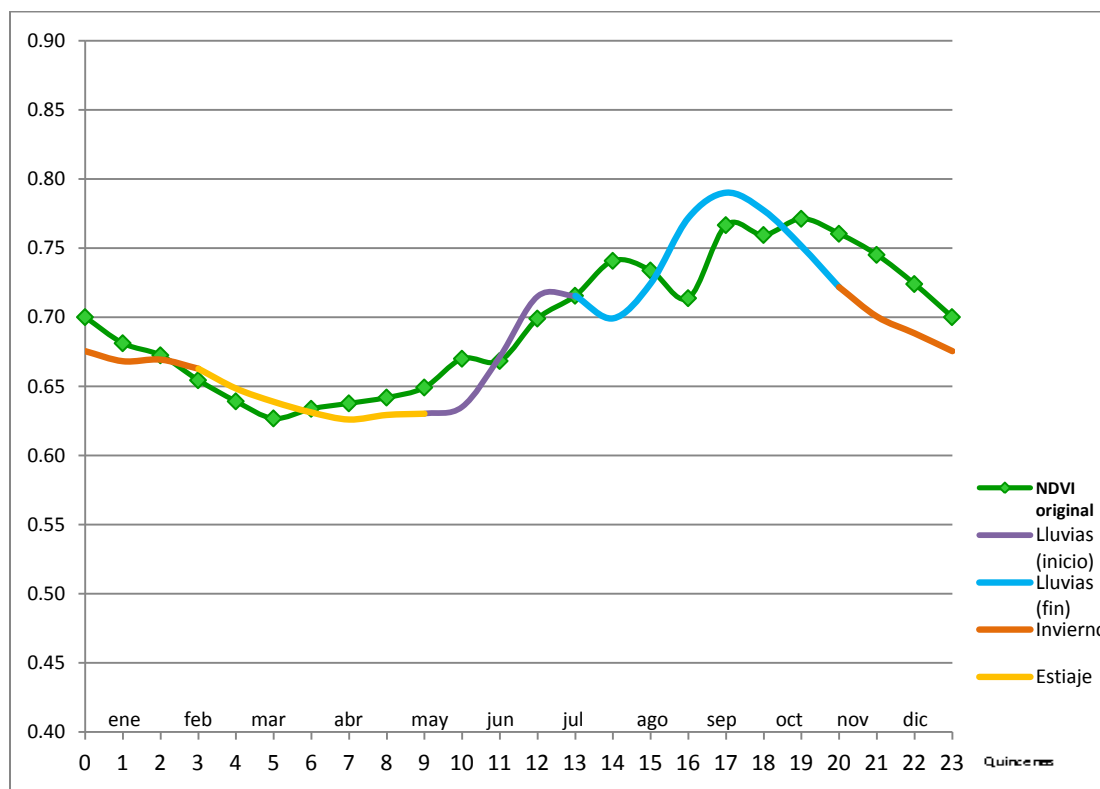


Figura 3.8 Relación de la función de NDVI con la función (suma) de la precipitación y la humedad del suelo, Zona 3. La división por colores en la gráfica representa un tiempo de respuesta diferente.

De manera general, el espectro de los valores de NDVI y el de la suma de la precipitación y la humedad del suelo tienen una fuerte relación, sobre todo si se consideran los corrimientos para cada fecha. No obstante, la relación no es exacta porque intervienen otros factores como la temperatura y otras variables meteorológicas, la presencia de plagas recurrentes en los últimos años como el gusano descortezador *Dendroctonus* o el inadecuado manejo del bosque.

Si se toma en cuenta el desfase aproximado de dos quincenas entre la precipitación y el valor de NDVI en la temporada más lluviosa, existe un umbral de lluvia que cuando se rebasa deja de tener influencia en la vegetación. En el caso de la zona 1 es de 70 mm de lluvia quincenal, en la zona 2 es de 120 mm y en la zona 3 es de 130 mm.

También es importante destacar que el grado de afectación y el tiempo de respuesta del bosque templado varía de acuerdo con la zona y la intensidad de las anomalías negativas o positivas que se presenten. Para observar más claramente esta respuesta, se analizaron las series de datos de 1982 a 2002 y de 2000 a 2011, y se seleccionaron periodos de análisis en los que destacan estas diferencias.

3.4 Respuesta de la vegetación a la variabilidad climática (1982-2002)

Es importante conocer el comportamiento de la vegetación y la humedad del suelo respecto a los valores promedio de la precipitación a lo largo del año; sin embargo se ha demostrado que la magnitud del cambio que se está presentando en valores extremos es mayor que en valores medios (Magaña *et al.* 2012) Por esto resulta relevante estimar la sensibilidad del bosque templado a eventos específicos a lo largo de un periodo de análisis.

Si se toma en cuenta que se sabe que la humedad del suelo y la vegetación pueden tener fuertes respuestas a las precipitaciones antecedentes, resulta importante determinar la relación entre las tres variables a lo largo de un periodo en particular, en este caso, a nivel mensual de 1982 a 2002. Las gráficas nos permiten visualizar la capacidad de los ecosistemas de recibir impactos negativos y recuperar sus condiciones normales cuando las anomalías de lluvia desaparecen (Figura 3.9).

Se puede observar una relación entre las tres variables; sin embargo, las respuestas de la vegetación no son inmediatas en todos los casos. En general, la respuesta del verdor del bosque varía de acuerdo a la intensidad del evento que haya afectado la zona. Asimismo, es más intenso el cambio en la anomalía de NDVI si el evento de anomalía de precipitación es precedido por una tendencia de anomalías negativas o positivas.

Se identificaron dos periodos, en uno se ejemplifica la respuesta de la vegetación al superávit de precipitación (1996) y en el otro a un déficit (1998).

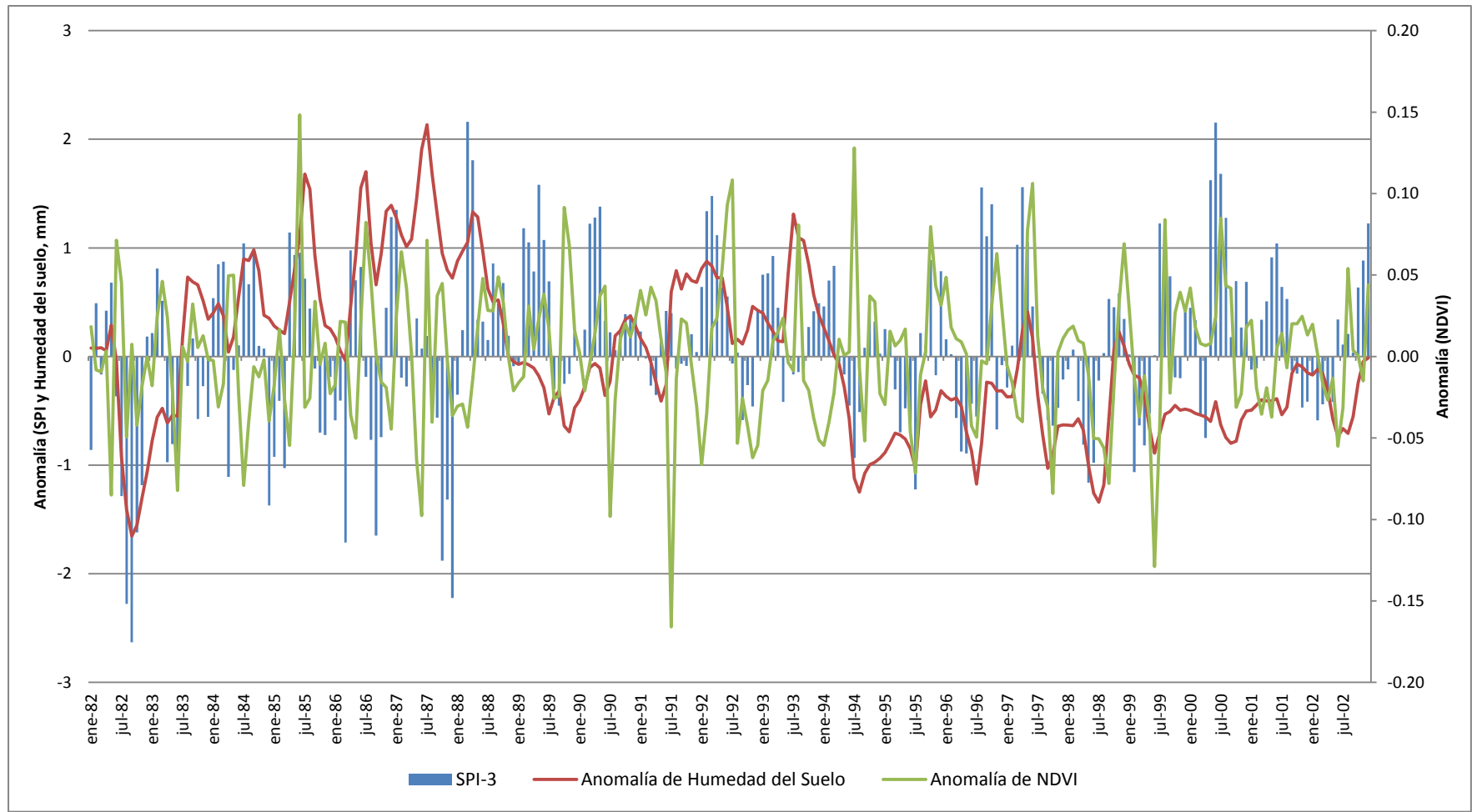


Figura 3.9 Anomalías de NDVI, humedad del suelo y SPI-3 (1982-2002)
 (Los datos de humedad del suelo deben multiplicarse por 100 para obtener el valor real en milímetros)

3.4.1 Periodo 1996

En agosto de 1996, el huracán Dolly afectó la zona, provocó la muerte de 4 personas y dejó a su paso 12,000 damnificados (Figura 3.9). Después de la temporada de huracanes de 1996, la precipitación disminuyó a valores de anomalías negativas durante el invierno, y recuperó valores positivos hacia la primavera de 1997, en donde es visible un aumento considerable de NDVI.

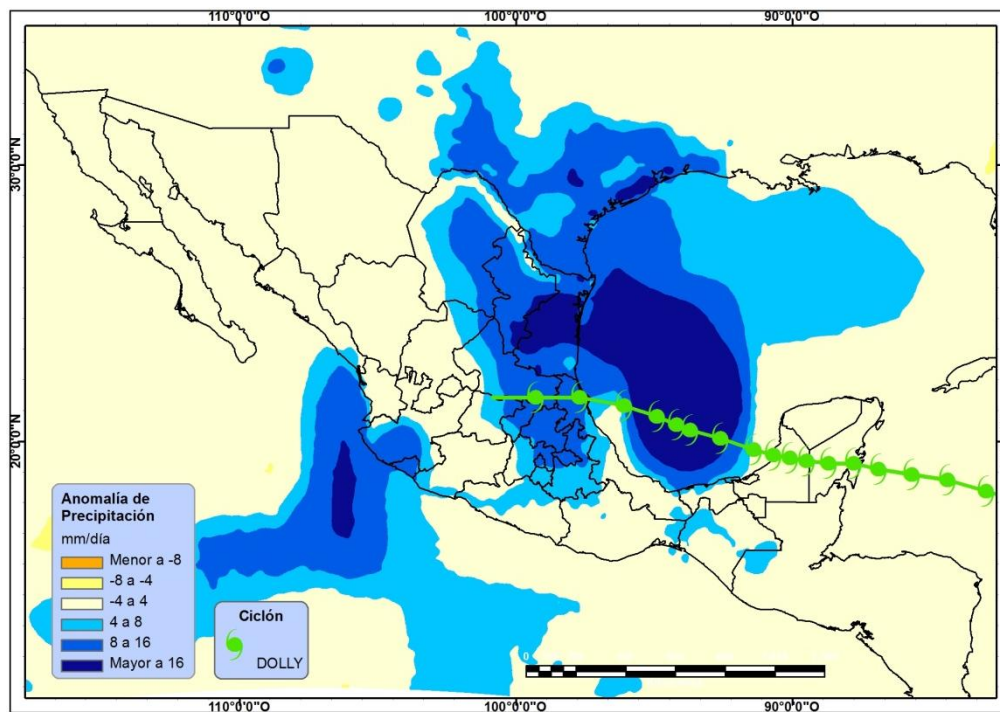


Figura 3.10 Trayectoria del Huracán Dolly, agosto de 1996. Elaboración propia con base en las trayectorias de líneas y puntos de la NOAA en: <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/ibtracs/index.php?name=ibtracs-data> Y la precipitación acumulada de la base de datos del NARR en: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/narr/plotday.pl>

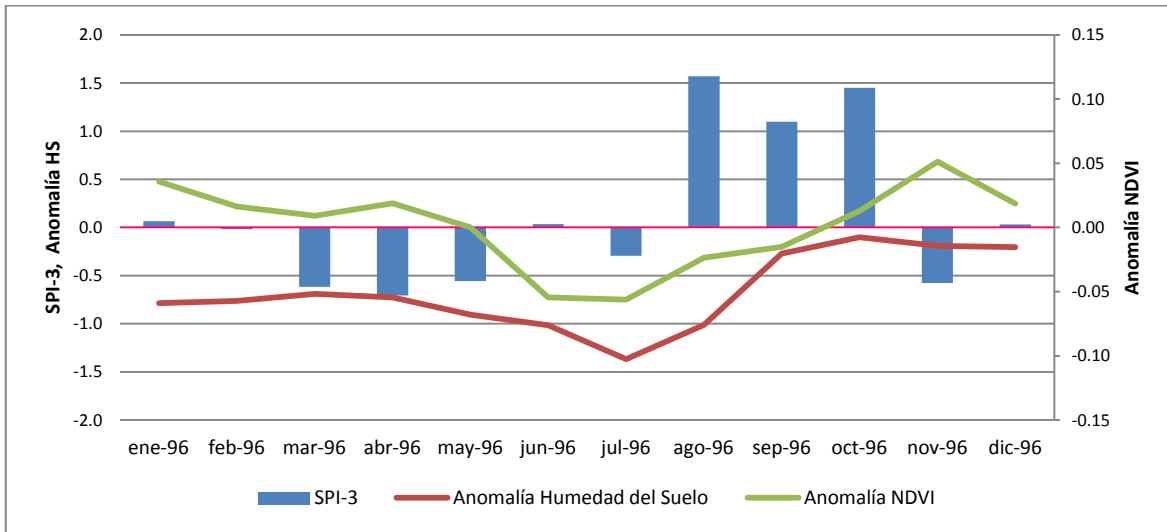


Figura 3.11 Relación SPI-3, anomalía humedad del suelo, anomalía NDVI (1996-1997). Zona 1.

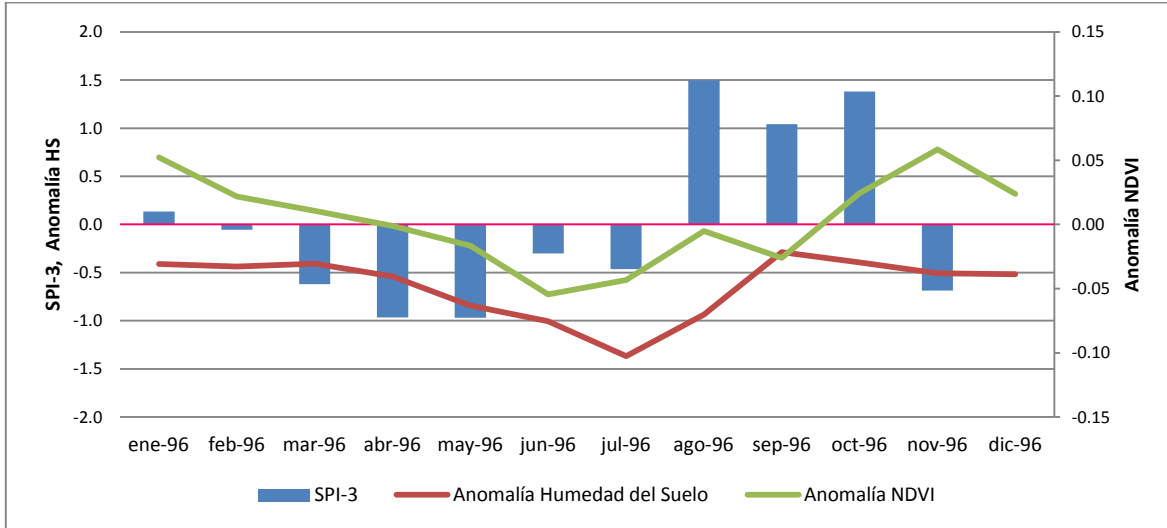


Figura 3.12 Relación SPI-3, anomalía humedad del suelo, anomalía NDVI (1996-1997). Zona 2.

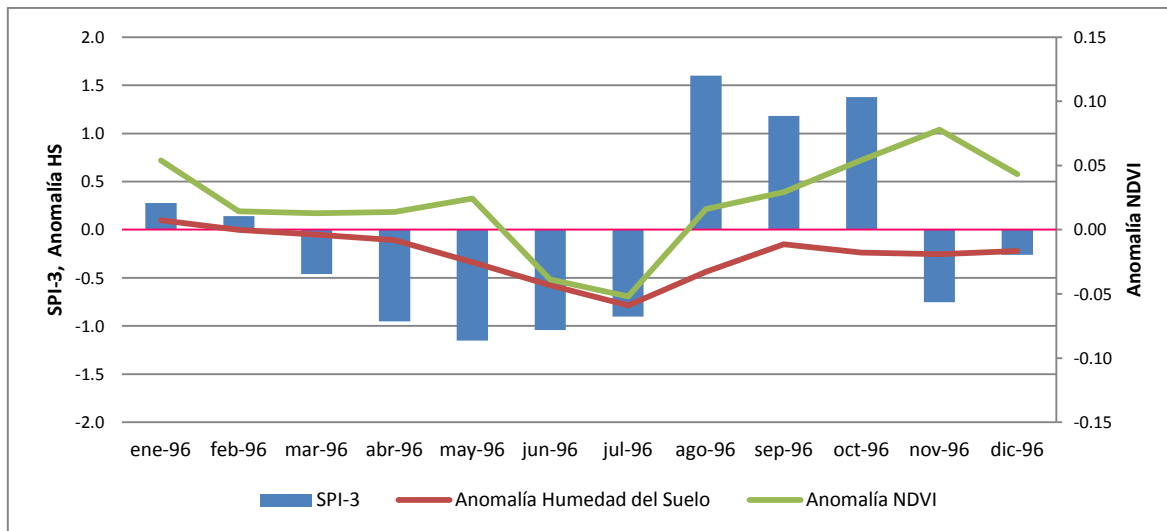


Figura 3.13 Relación SPI-3, anomalía humedad del suelo, anomalía NDVI (1996-1997). Zona 3.

Hacia el final de la temporada de huracanes, en noviembre de 1996, se alcanzó el valor más alto de NDVI del año para las tres zonas, esto en respuesta al aporte continuo de lluvia tres meses atrás. Sin embargo, la humedad del suelo, a pesar de que es notoria su respuesta en la gráfica, no alcanzó valores de anomalías positivas durante ese periodo (Figura 3.11, 3.12 y 3.13). La respuesta de la vegetación se presenta espacialmente tomando en cuenta la fecha de mayor acumulación de precipitación y la respuesta más importante de la vegetación un mes después, es decir, octubre y noviembre (Figura 3.14 y 3.15).

El comportamiento espacial de las variables se explica por la trayectoria del huracán Dolly tres meses antes y por la entrada de humedad del Golfo de México en esas fechas. Sin embargo, se sabe que en meses anteriores a agosto hubo una secuencia de eventos de valores negativos de SPI-3 y por lo tanto el efecto de las lluvias no fue tan importante como pudo haber sido. Esta explicación es claramente apreciable hacia el norte de la zona 2, en donde se observan los valores más altos de SPI-3, pero no son notorios en la vegetación, porque había poca disponibilidad de humedad en el suelo (Figura 3.14 y 3.15). El tiempo de respuesta de la vegetación en este caso fue de un mes a partir del acumulado de lluvias de tres meses antes.

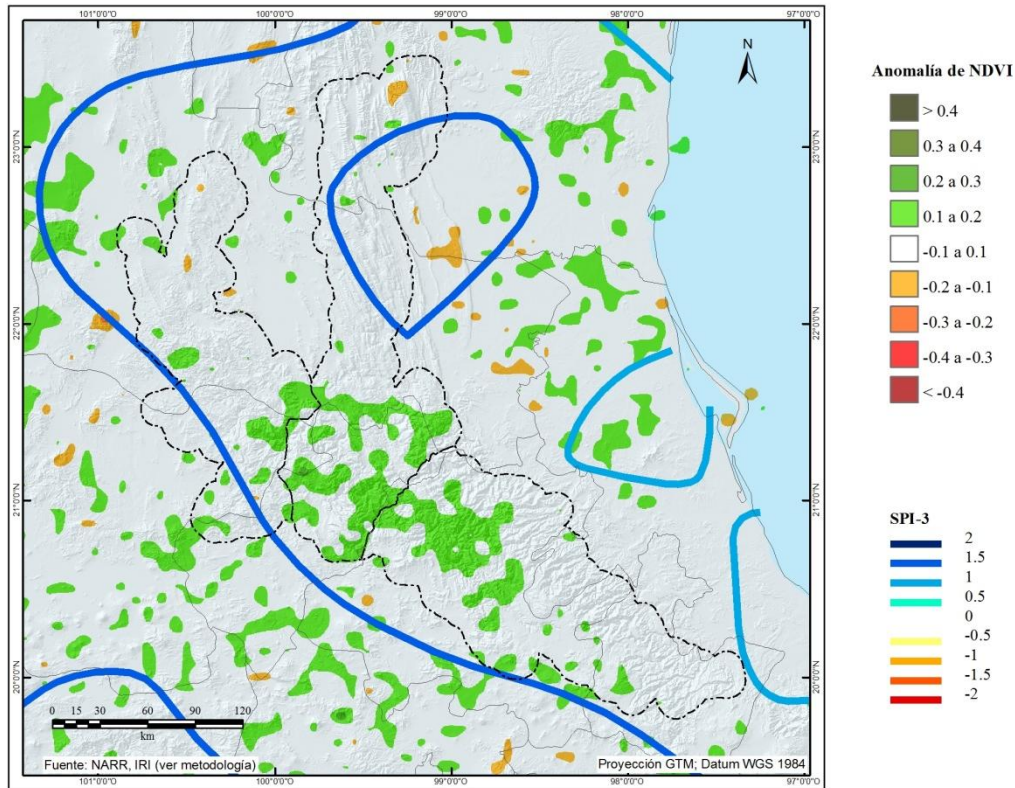


Figura 3.14 Anomalia de NDVI (noviembre 1996) y SPI-3 (octubre 1996)

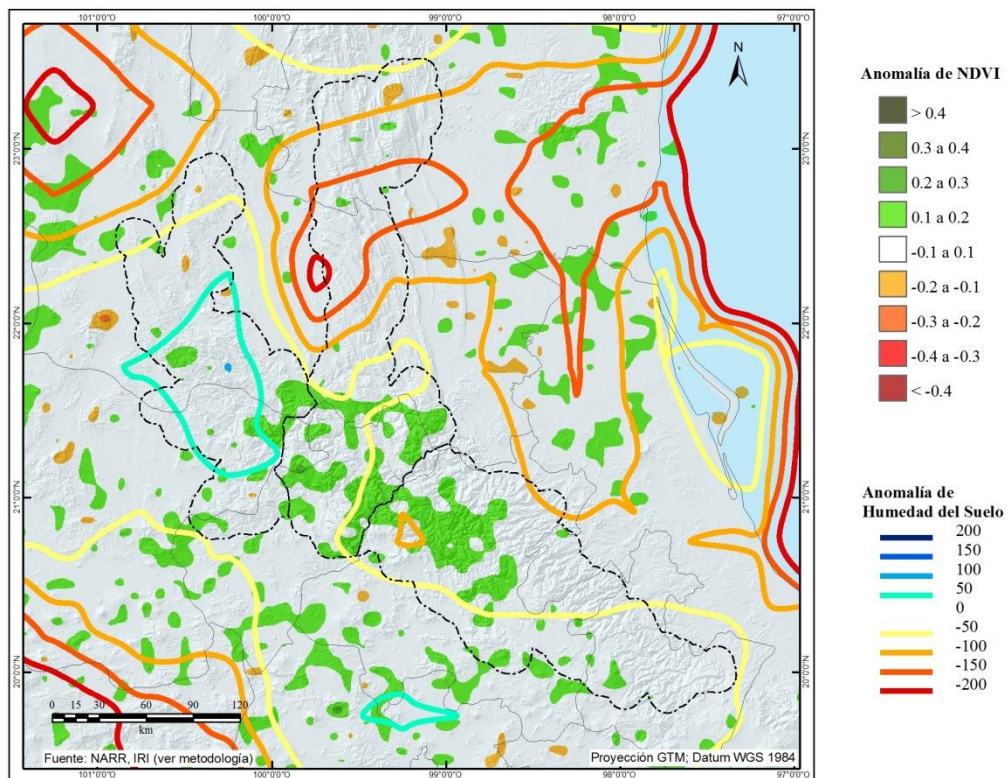


Figura 3.15 Anomalia de NDVI (noviembre 1996) y anomalia de humedad del suelo (octubre 1996)

3.4.2 Periodo 1998

Durante el periodo 1998 se presentó una de las sequías más intensas de los últimos años asociada a un intenso evento de El Niño. En la Sierra Madre Oriental es identificable el efecto que éste tuvo en la vegetación. De acuerdo con información recopilada de noticias, artículos y entrevistas se sabe que durante este año la sequía provocó el aumento en el número de incendios, entre ellos uno que duró tres meses e impidió sembrar e incluso habitar en algunas localidades de la región (Ávalos *et al.* 2012).

Para algunas localidades se reportaron daños en los bosques de pino, especialmente en las comunidades de *Pinus ayacahuite*, y afectando en gran medida las comunidades de *Pinus hartwegii* y *Pinus cembroides* (Avila-Flores *et al.* 2012). Se registraron además una gran cantidad de quemas en las prácticas agrícolas para la preparación de suelos de cultivo y para la ampliación ilegal de la frontera agrícola y pecuaria.

A través de la comparación gráfica, se determinó que en las tres zonas de estudio hay una respuesta casi inmediata ante la falta de agua, tanto en la humedad del suelo como en la vegetación, sin embargo, el mayor impacto (en el verdor de la vegetación) se observa en las zonas 2 y 3, en dónde los efectos de la sequía pueden apreciarse aún hasta septiembre de 1998, tres meses después de que se presentara la anomalía más baja de precipitación (Figura 3.17 y 3.18).

Destaca señalar que la humedad del suelo mantuvo valores negativos durante 16 meses consecutivos, a pesar de la ligera recuperación que hubo en la lluvia durante el invierno de 1997-1998.

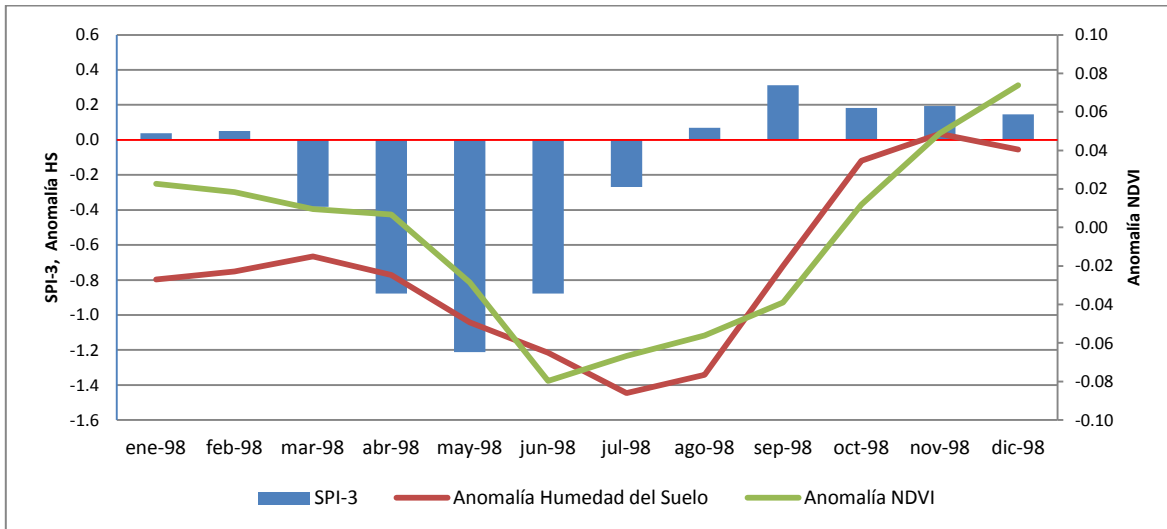


Figura 3.16 Relación SPI-3, anomalía humedad del suelo, anomalía NDVI (1997-1998). Zona 1.

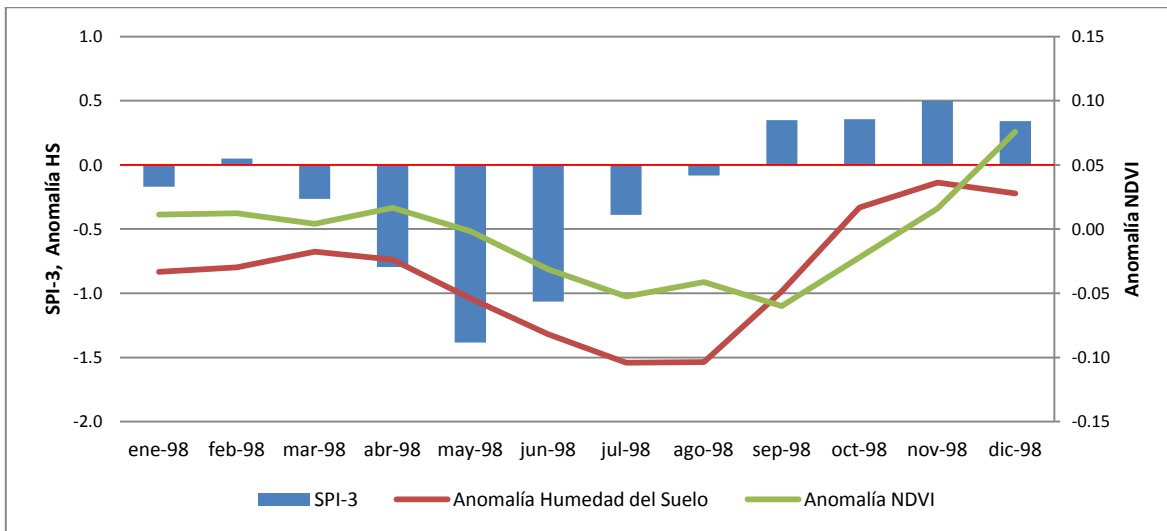


Figura 3.17 Relación SPI-3, anomalía humedad del suelo, anomalía NDVI (1997-1998). Zona 2.

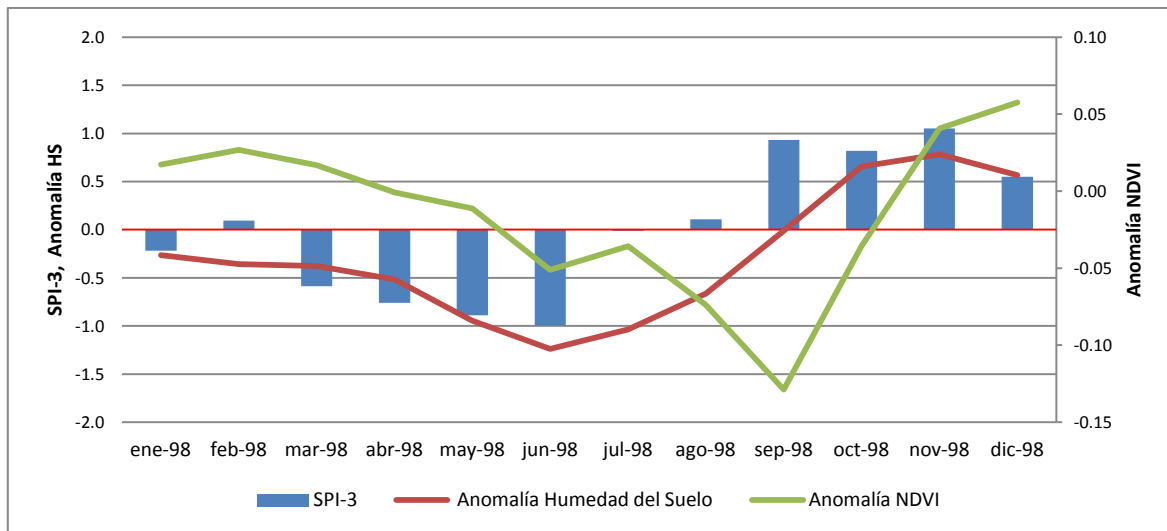


Figura 3.18 Relación SPI-3, anomalía humedad del suelo, anomalía NDVI (1997-1998). Zona 3.

Hacia agosto de 1998 se observa una recuperación en la lluvia, asociada con la temporada de huracanes, y se mantiene esa tendencia hasta el final del año. Cuando la precipitación llegó a valores de anomalías positivas, la vegetación presentó valores más altos también, alcanzando anomalías positivas aproximadamente tres meses después de que comenzara a llover de manera constante, lo cual habla de la resiliencia del bosque templado ante la presencia de sequías.

El comportamiento espacial entre el mes del valor más bajo de SPI-3 y de humedad en el suelo (mayo aproximadamente) y el valor más bajo de anomalía de NDVI (septiembre) presentó un patrón irregular (Figura 3.19y 3.20). La sequía más intensa se presentó hacia el norte de la región, sin embargo los efectos de la falta de agua durante un periodo prolongado fueron más importantes en la zona 3, principalmente en el límite entre Hidalgo, Querétaro y San Luis Potosí, en dónde se documentaron fuertes incendios, lo cual nos habla de la importancia del factor humano en los efectos de la sequía.

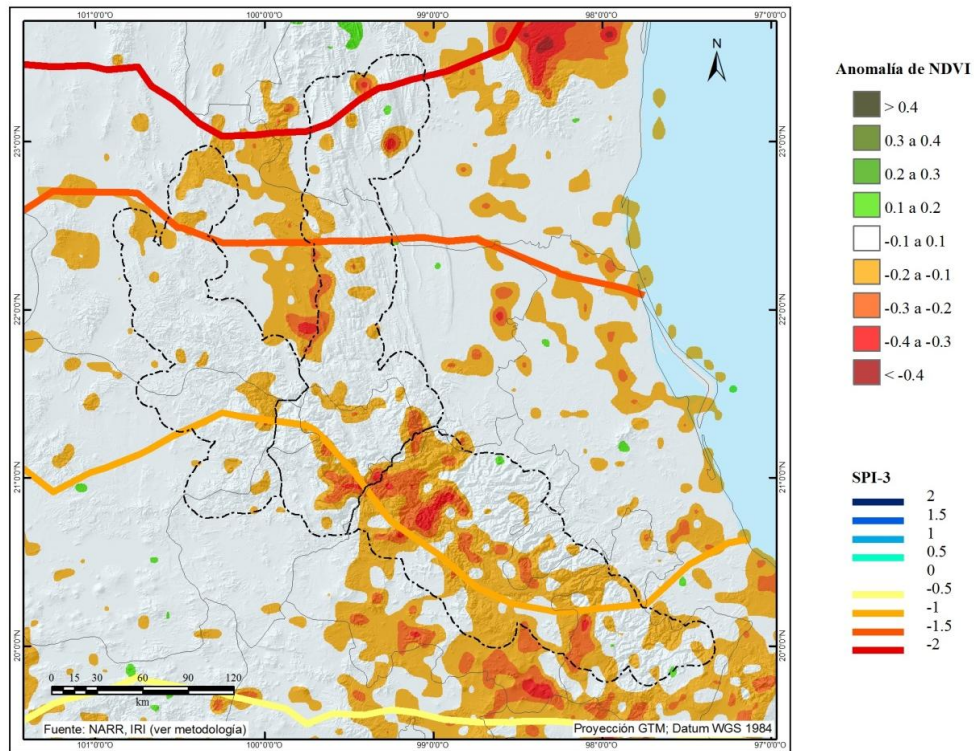


Figura 3.19 Anomalia de NDVI (septiembre 1998) y SPI-3 (mayo 1998)

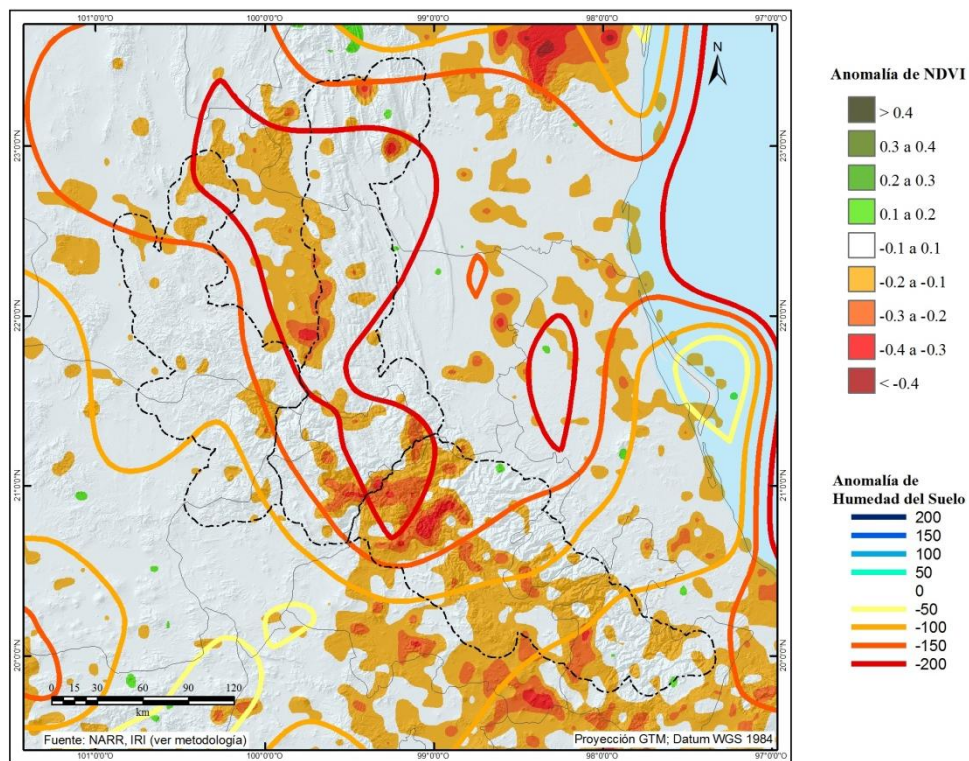


Figura 3.20 Anomalia de NDVI (septiembre 1998) y anomalia de humedad del suelo (mayo 1998)

3.5 Respuesta de la vegetación a la variabilidad climática (2000-2011)

En una segunda etapa de la investigación se determinaron los tiempos de respuesta de la vegetación utilizando datos de mayor resolución espacial para el NDVI, disponibles del año 2000 al 2011, como se explica en la metodología; esto con el fin de hacer una comparación y comprobar la relación entre las tres variables estudiadas.

Los resultados obtenidos muestran que, igual que en el periodo anterior, la respuesta del verdor del bosque varía de acuerdo a la cantidad de precipitación (año húmedo o año seco) que se presenta y a la intensidad del evento que haya afectado la zona, además de que es más intensa si existe una tendencia anterior de eventos de la misma naturaleza. También se observa que la reacción de la vegetación es más rápida si la anomalía negativa de precipitación se presenta en la temporada en la que inician las lluvias. Los datos de NDVI por quincena permitieron encontrar retrasos más específicos, que no eran observables en los datos mensuales, ya que en este caso se aprecia una mayor variabilidad.

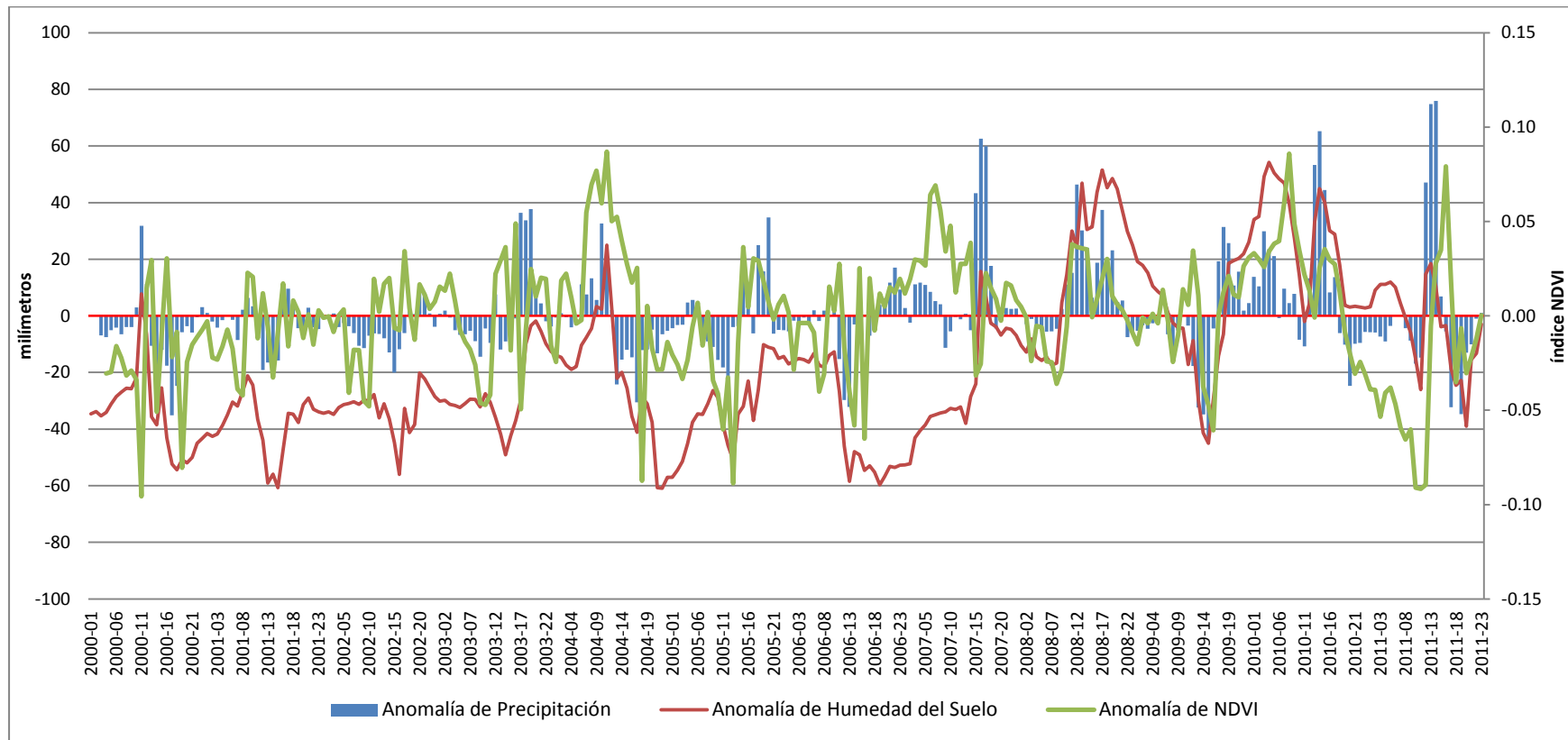


Figura 3.21 Anomalías de precipitación, humedad del suelo y NDVI (2000-2011)
(Multiplicar por dos la anomalía de humedad del suelo para obtener el valor original)

3.5.1 Periodo 2004

Superávit: De acuerdo con los boletines meteorológicos de este periodo, la combinación de lluvias fuertes con altas temperaturas probablemente propició el aumento en la anomalía de NDVI entre las quincenas de abril y agosto de 2004. Desde el inicio de la temporada de lluvias de 2004, las precipitaciones fueron generalmente intensas y se reportó alta nubosidad la mayor parte de los días durante mayo y junio, así como altas temperaturas, debido a la entrada de aire tropical húmedo del Golfo de México (Figura 3.22, 3.23 y 3.24).

Déficit: La tendencia de lluvias fuertes, anteriormente descrita, decayó desde la primera quincena de julio y continuó en valores negativos hasta el mismo mes del siguiente año, dicho efecto es más notorio en las zonas 2 y 3. A pesar de que durante la temporada de huracanes de 2004 se reportó entrada de humedad en la mayor parte del país, no se identificó que llegara a ser importante para la precipitación de la zona de estudio, ya que no se registró que ninguno de los ciclones tropicales afectara la zona.

Hacia el invierno, con la entrada de frentes fríos se observa una tendencia de la precipitación hacia valores normales; sin embargo, vuelven a presentarse anomalías negativas a principios de abril de 2005 y continúan hasta ya estrada la temporada de ciclones tropicales en agosto (Figura 3.22, 3.23 y 3.24). El aumento considerable en las lluvias de este periodo se observa principalmente en la zona 3.

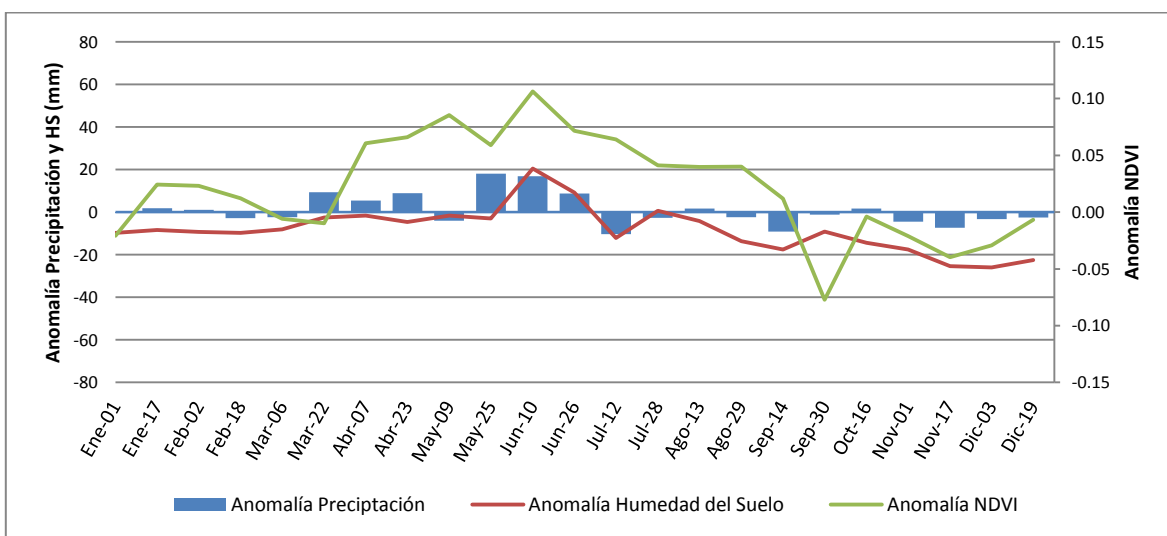


Figura 3.22 Anomalía de precipitación, anomalía humedad del suelo y anomalía NDVI (2004-2005) Zona 1

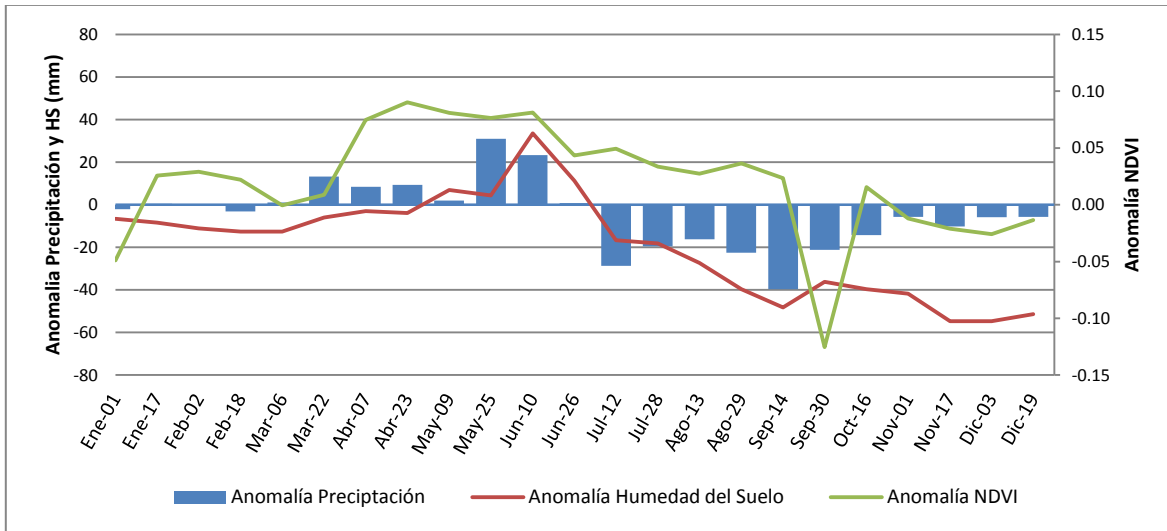


Figura 3.23 Anomalia de precipitación, anomalía humedad del suelo y anomalía NDVI (2004-2005) Zona 2

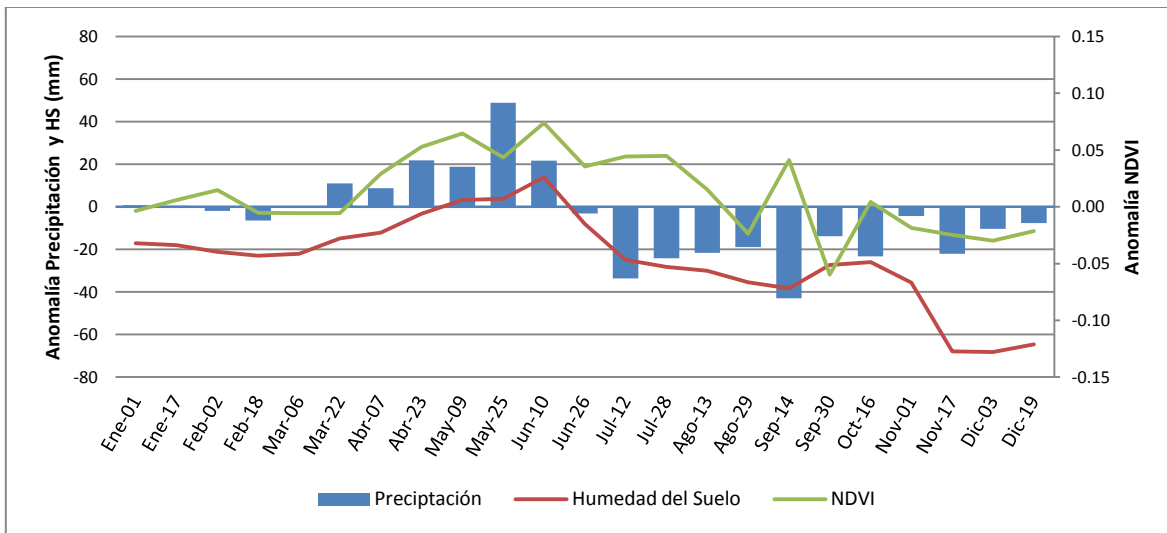


Figura 3.24 Anomalia de precipitación, anomalía humedad del suelo y anomalía NDVI (2004-2005) Zona 3

Se observa la influencia espacial de la anomalía positiva de precipitación durante los meses de estiaje en el inicio de la temporada de lluvias de 2004 (mayo-junio) (Figura 3.25 y 3.26), estas anomalías positivas durante un periodo en el que normalmente no llueve impusieron un reverdecimiento generalizado en las tres zonas, que se observó de manera inmediata en cuanto iniciaron oficialmente las lluvias. El desfase entre la máxima lluvia y el máximo reverdecimiento es de una quincena. Las precipitaciones más fuertes se presentaron hacia la región de las selvas, pero tuvieron influencia en los bosques templados.

En septiembre, la ausencia de ciclones tropicales en la región tuvo un impacto importante en la anomalía de NDVI, principalmente hacia las zonas cercanas a la Sierra Gorda de Querétaro (Figura 3.27 y 3.28). El patrón de la anomalía de precipitación aproximadamente coincide con las zonas 2 y 3, que son las que más comúnmente se ven afectadas por ciclones tropicales, y que por lo tanto son más sensibles si éstos no se presentan.

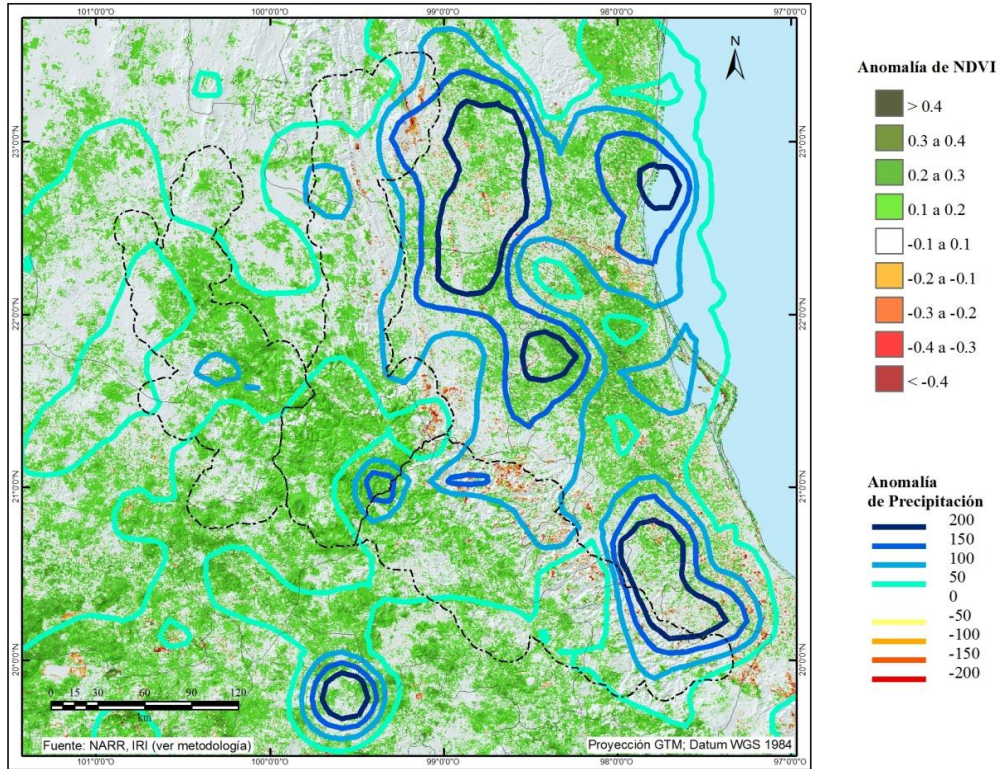


Figura 3.25 Anomalia de NDVI (primera quincena de junio, 2004) y anomalia de precipitación (segunda quincena de mayo, 2004)

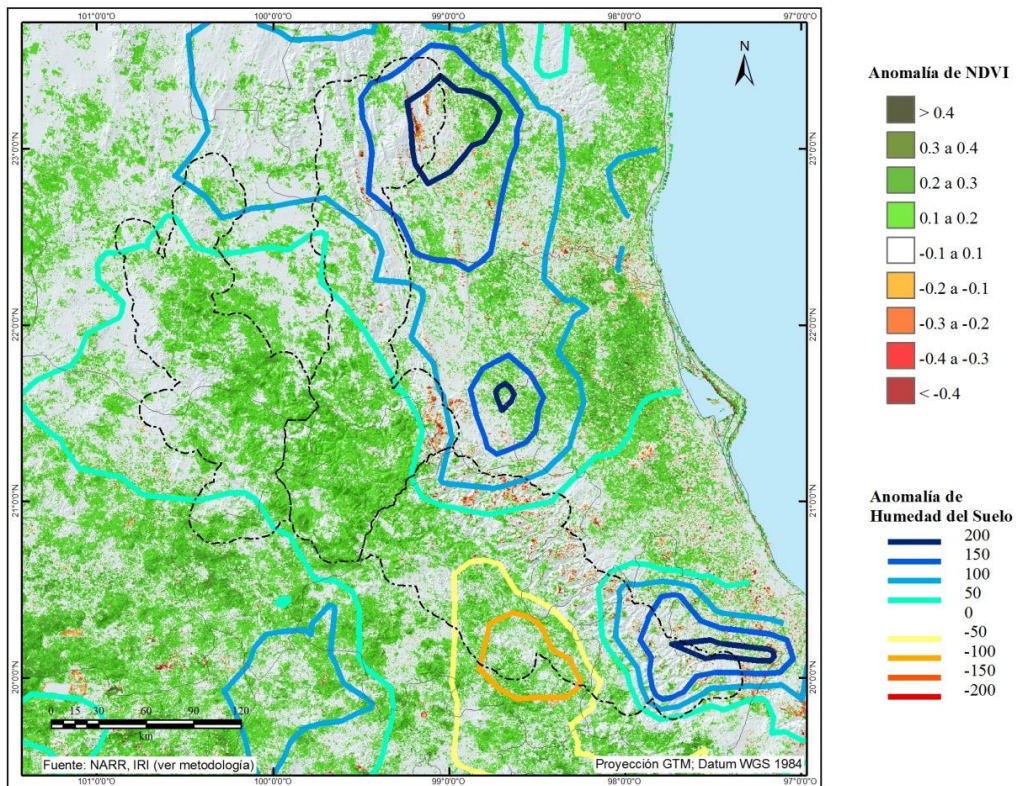


Figura 3.26 Anomalia de NDVI (primera quincena de junio, 2004) y anomalia de humedad del suelo (primera quincena de junio, 2004)

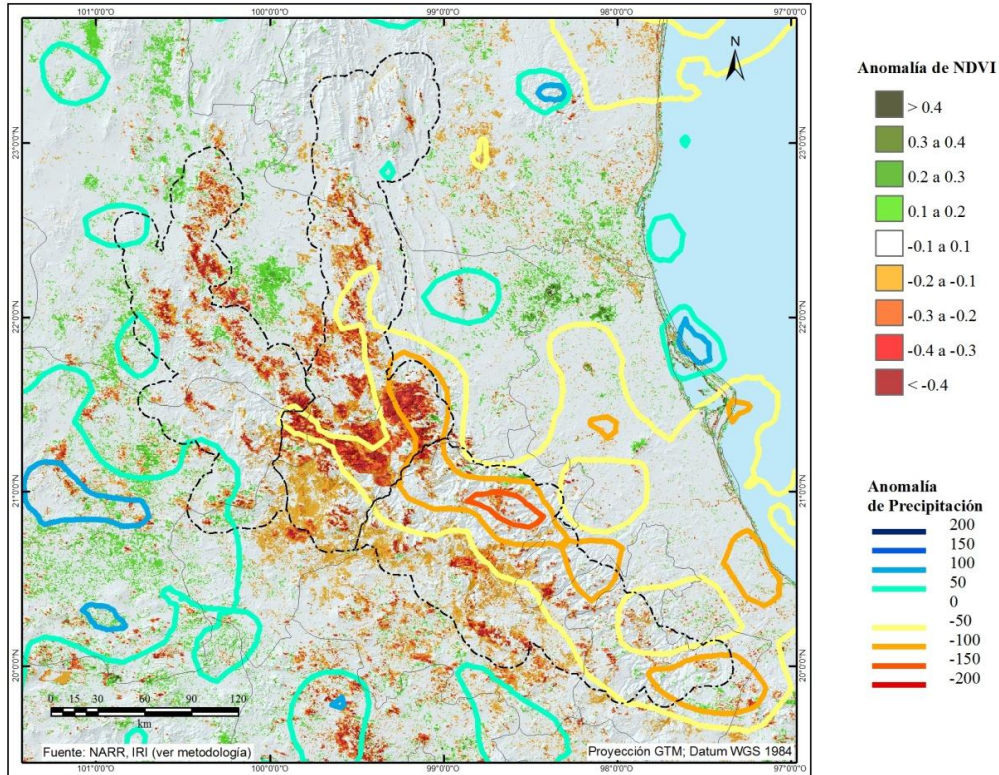


Figura 3.27 Anomalía de NDVI (segunda quincena de septiembre, 2004) y anomalía de precipitación (primera quincena de septiembre, 2004)

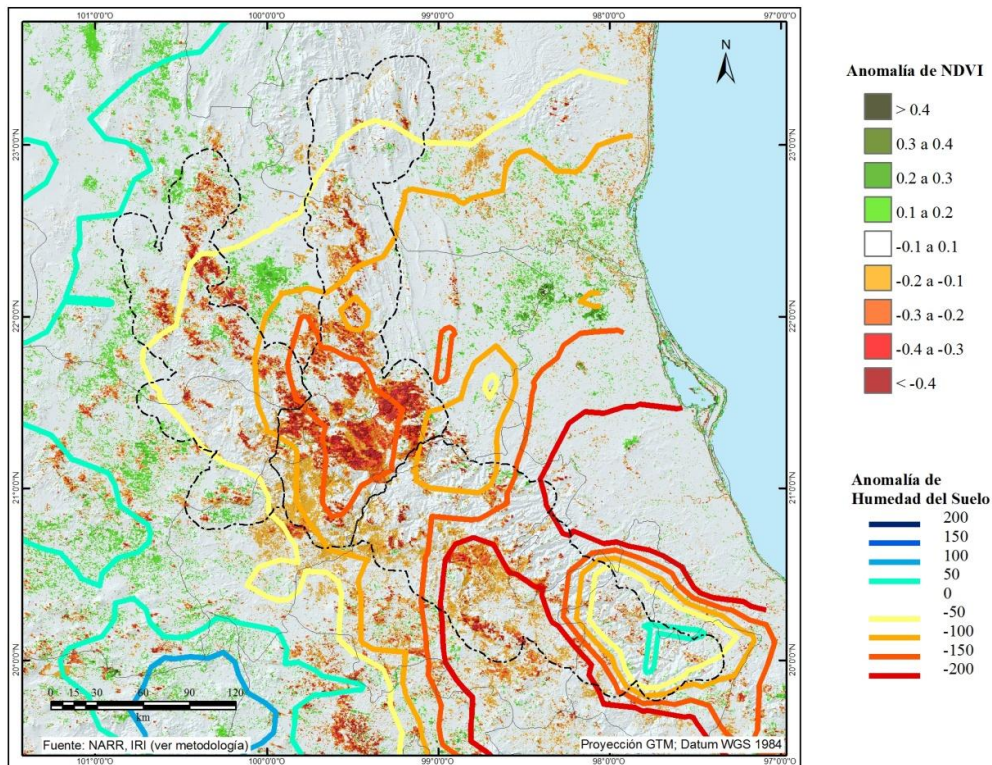


Figura 3.28 Anomalía de NDVI (segunda quincena de septiembre, 2004) y anomalía de humedad del suelo (primera quincena de septiembre, 2004)

3.5.2 Periodo 2011

Hacia principios de 2011 se presentaron valores negativos de anomalías de precipitación, que estuvieron acompañados de altas temperaturas, condición que afectó principalmente a la zona 2, sobre todo en la porción cercana a la Huasteca Potosina.

Ligeras lluvias disminuyeron el calor durante la primera semana de junio, pero rápidamente dejó de llover y el calor volvió a aumentar durante todo este mes. El calor durante esta temporada del año favoreció también la propagación de plagas de gusano descortezador (Figura 3.29).



Figura 3.29 Túneles de gusano descortezador *Dendroctonus*, La Trinidad, Xilitla. Fotografía tomada durante trabajo de campo.

Después del periodo seco de 2011, comenzaron a presentarse ciclones tropicales que tuvieron influencia en la precipitación de la región hacia finales de junio del mismo año, siendo uno de los más relevantes Arlene (Figura 3.30) especialmente para las zonas 2 y 3 (Figura 3.32 y 3.33).

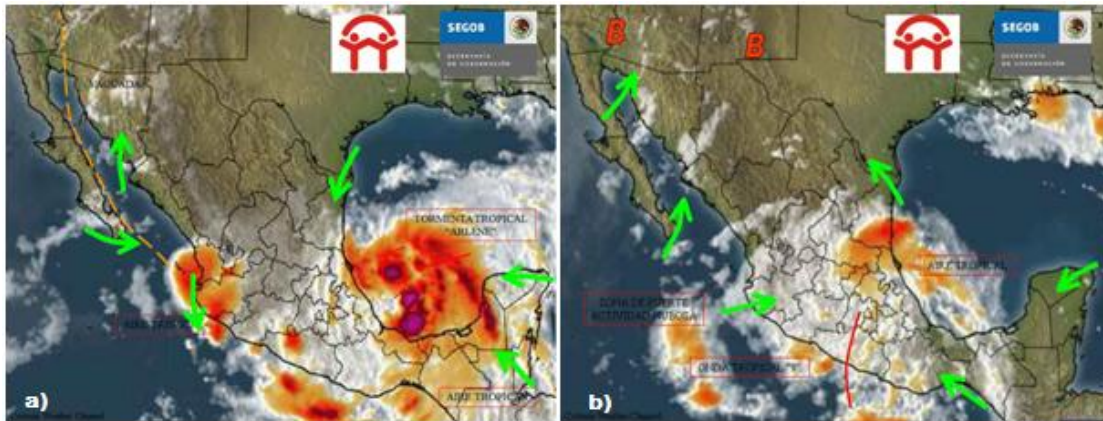


Figura 3.30 a) 29 de junio de 2011. Tormenta tropical Arlene. Boletín No.179. b) 17 de julio de 2011. Aire tropical. Boletín No.01.

En los siguientes meses se observó la entrada de aire tropical con alto contenido de humedad que favoreció nublados importantes y lluvias fuertes. Asimismo el paso de otros huracanes como Don (27-30 de julio), Emily (1-7 de agosto), Harvey (19-22 de agosto), Irene (20-29 de agosto) y Nate (7-11 de septiembre) favorecieron el incremento de la anomalía de lluvia para el verano de 2011.

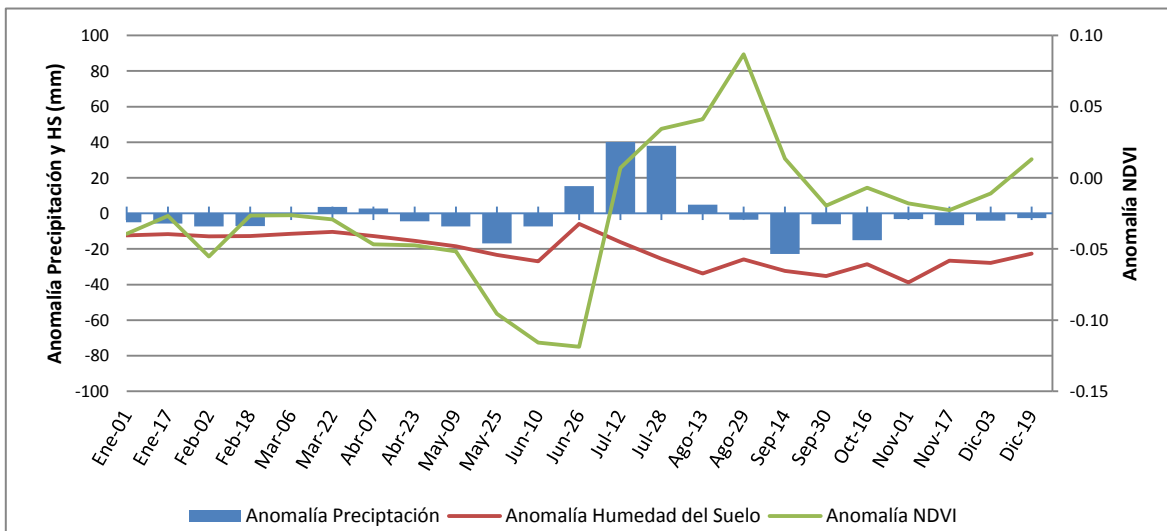


Figura 3.31 Anomalía de precipitación, anomalía humedad del suelo y anomalía NDVI (2010-2011) Zona 1

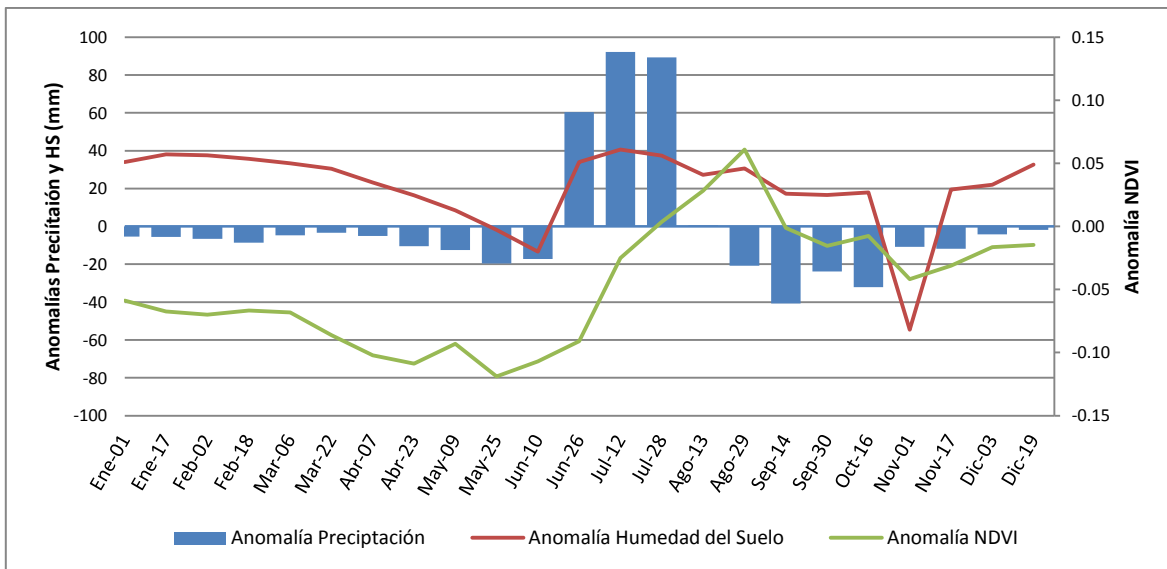


Figura 3.32 Anomalia de precipitación, anomalía humedad del suelo y anomalía NDVI (2010-2011) Zona 2

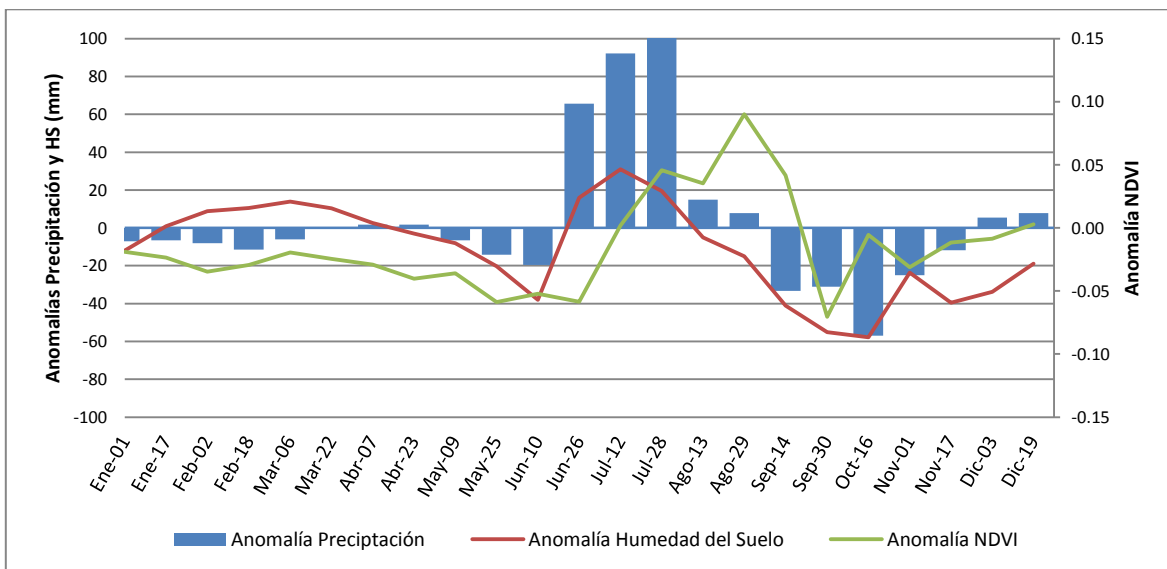


Figura 3.33 Anomalia de precipitación, anomalía humedad del suelo y anomalía NDVI (2010-2011) Zona 3

En la figura 33a y b no se observa que la anomalía negativa de precipitación sea muy importante, sin embargo la afectación en el bosque es sobresaliente, principalmente hacia el norte de la zona 2, en Tamaulipas. Esta afectación, más notoria en el norte que en el sur, tiene que ver con los patrones espaciales de temperatura que afectaron al país, y que fueron más severos hacia el norte del mismo. El calor extremo durante una temporada en la que normalmente no llueve impuso una condición de valores bajos de anomalías de NDVI, además de los incendios que afectaron a la vegetación. El periodo que se muestra en los mapas es hacia el final de la temporada de estiaje y el inicio de las lluvias, en la que se ha observado que un déficit de precipitación tiene consecuencias más significativas en el NDVI.

En la figura 34a y b se observa la relación de la temporada de ciclones tropicales y la vegetación de la región. Las anomalías positivas que se presentaron a partir de la segunda quincena de junio de 2011 influyeron en el reverdecimiento del bosque, que registró el valor máximo de NDVI hacia la segunda quincena de agosto del mismo año, lo cual indica un retraso de 3 quincenas, entre la fecha de máxima anomalía de precipitación y la de NDVI. Es apreciable que las zonas que anteriormente se vieron más afectadas, hacia el norte de la región de estudio, no respondieron con anomalías positivas de NDVI, sino que alcanzaron valores cercanos a lo normal.

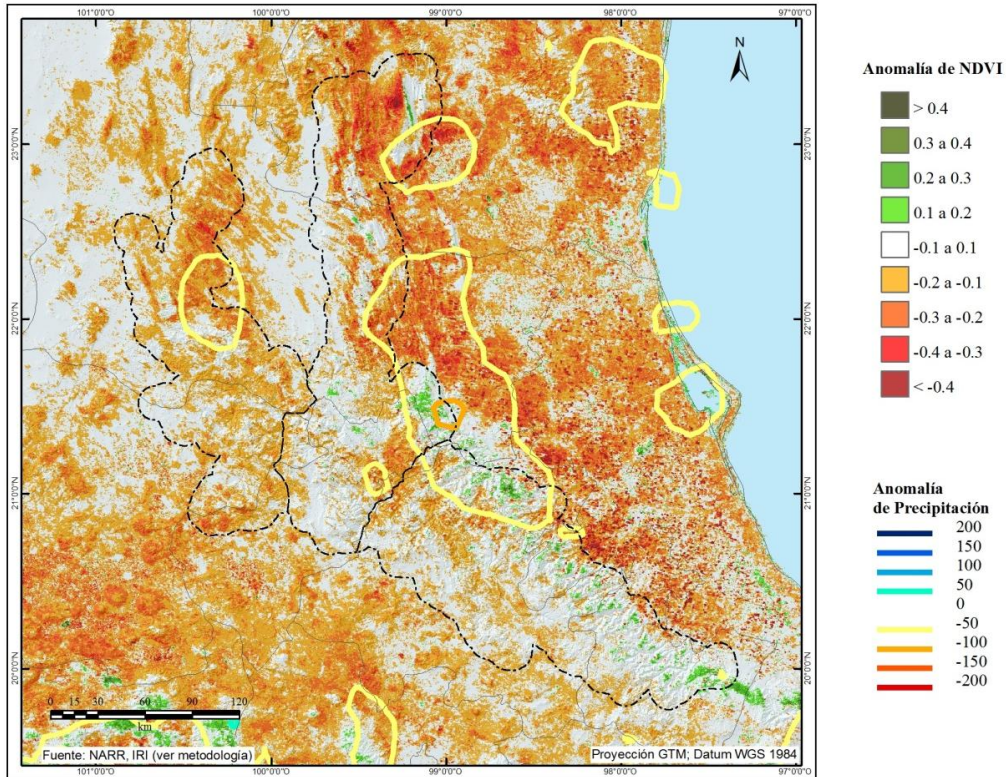


Figura 3.34 Anomalía de NDVI (primera quincena de junio 2011) y anomalía de precipitación (segunda quincena de mayo 2011)

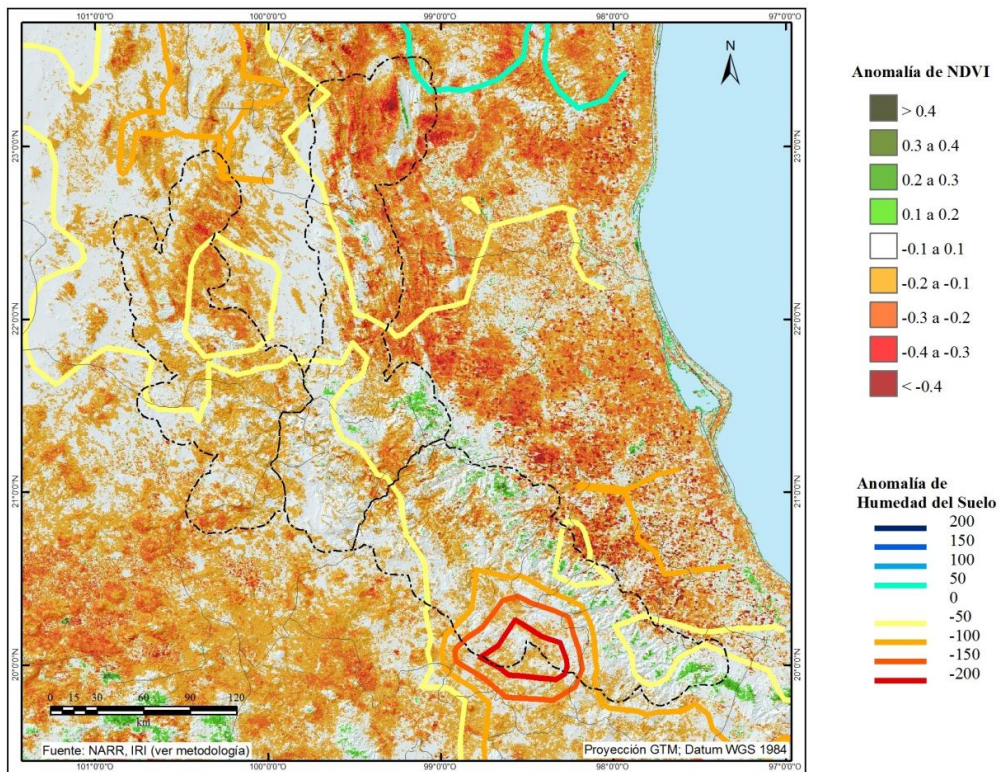


Figura 3.35 Anomalía de NDVI (primera quincena de junio, 2011) y anomalía de humedad del suelo (primera quincena de junio, 2011)

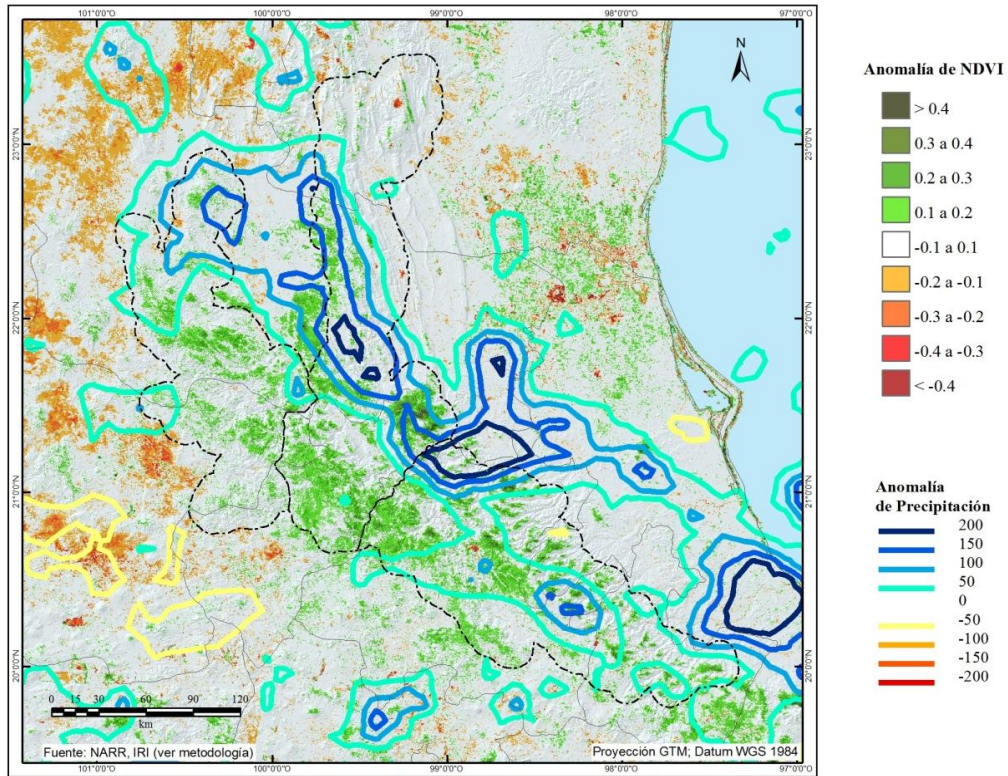


Figura 3.36 Anomalía de NDVI (segunda quincena de agosto, 2011) y anomalía de precipitación (primera quincena de julio, 2011)

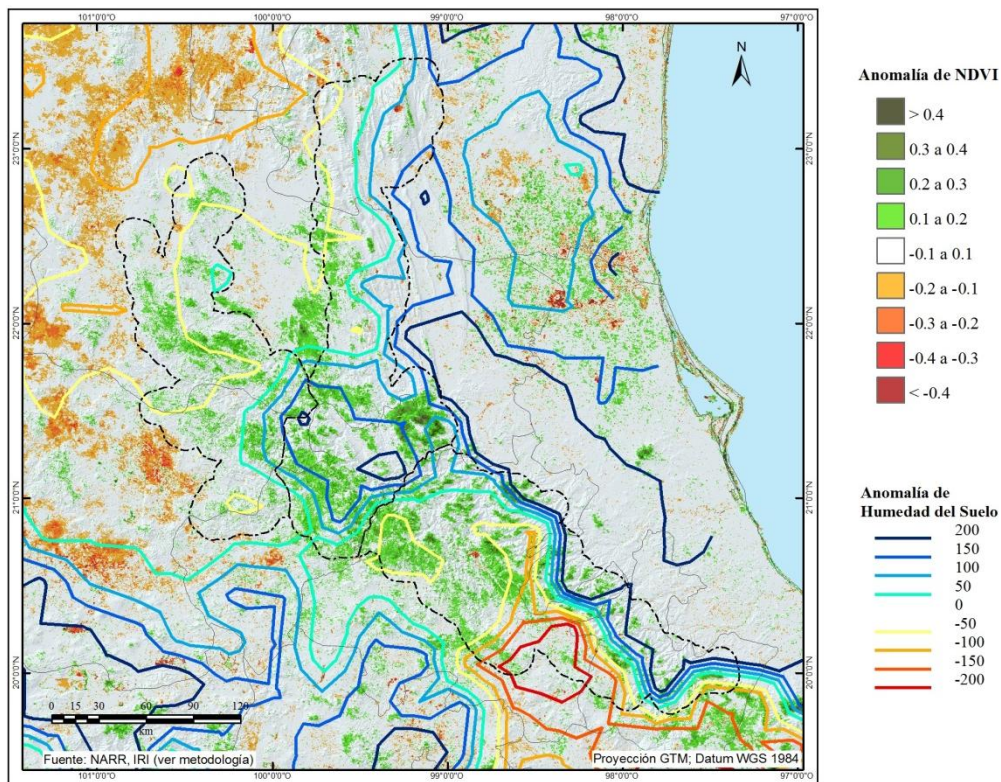


Figura 3.37 Anomalía de NDVI (segunda quincena de agosto, 2011) y anomalía de humedad del suelo (primera quincena de julio, 2011)

3.6 Cambio de uso del suelo

En general, la situación socio-económica en las comunidades ha sido influenciada por diversos factores que han condicionado la configuración del uso del suelo, por ejemplo:

- La apertura comercial – liberalización de los mercados
- Reducción de subsidios y acompañamiento técnico por parte del gobierno
- Destrucción de la economía campesina
- Desregulación del papel del Estado en los apoyos a la agricultura
- Ganaderización

A lo largo del tiempo, estos factores han generado condiciones que tienen como consecuencia el abandono de la producción tradicional campesina, así como eventos de intensificación de la producción agrícola y ganadera, con subsecuentes cambios en el uso de suelo y en la cobertura de vegetación. Dichos cambios se sitúan primordialmente en las secciones de selvas caducifolias y selvas perennifolias hacia la vertiente oriental de la Sierra Madre Oriental, y han tenido un incremento considerable en los bosques de encino. La región con mayor riesgo de deforestación se encuentra entre Hidalgo y Puebla (CONANP-GIZ 2013).

El bosque mesófilo de montaña se ve afectado principalmente por las plantaciones de café de sol (monocultivo), debido a la remoción total de las especies originales y al empleo de tratamientos e insumos químicos (herbicidas, fertilizantes) que impiden el establecimiento de especies nativas de este tipo de vegetación, dicha práctica se lleva a cabo en altitudes inferiores a 1,000 msnm, en los municipios de Xicotepec de Juárez, Huauchinango y Pahuatlán, pertenecientes a Puebla; Xilitla, Tamazunchale y Aquismón, demarcaciones de San Luis Potosí (Puig 1991). No obstante, se encuentran ejemplos de comunidades que han conservado los ecosistemas a través de prácticas agroecológicas, como el cultivo de café bajo sombra.

El uso del fuego es una práctica frecuente que acompaña a la agricultura y la ganadería en México, y su uso inapropiado puede resultar en incendios sin control que afectan extensas

superficies de bosque cada año. Los más afectados por estas prácticas son los bosques de pino y encino (CONABIO 2010).

Se identificaron las tasas de cambio de uso del suelo para cada tipo de vegetación y se determinó que el cambio en las selvas perennifolias y caducifolias tiene una mayor proporción que el de los bosques templados, sin embargo, al encontrarse sólo un piso abajo en altitud, este cambio representa una amenaza a la permanencia del bosque, debido al avance de la frontera agrícola y a la modificación de las condiciones climáticas en esas zonas.

Tabla 3.4 Tasas de cambio de uso del suelo. Zona 1 y área de influencia (10 km).

Tipo de Vegetación	Área Serie I (1976)	Área Serie III (2005)	Tasa de cambio serie I- serie III
Agrupado	Hectáreas	Hectáreas	1980-2005
Agricultura de riego y humedad	15,611	30,149	2.67
Agricultura de temporal	178,497	155,434	-0.55
Área sin vegetación aparente	0	0	ND
Asentamiento humano	0	3,156	ND
Bosque de coníferas	26,144	25,034	-0.17
Bosque de coníferas y latifoliadas	140,111	148,445	0.23
Bosque de latifoliadas	187,742	178,536	-0.20
Bosque mesófilo de montana	0	0	ND
Cuerpo de agua	0	1,513	ND
Matorral xerófilo	664,671	661,914	-0.02
Mezquital	27,376	24,056	-0.52
Otros tipos de vegetación	539	1,423	3.96
Pastizal inducido	88,825	117,092	1.11
Pastizal natural	70,824	65,881	-0.29
Selva caducifolia y subcaducifolia	36,847	24,555	-1.61
Selva perennifolia y subperennifolia	0	0	ND
Total	1,437,188	1,437,188	4.61

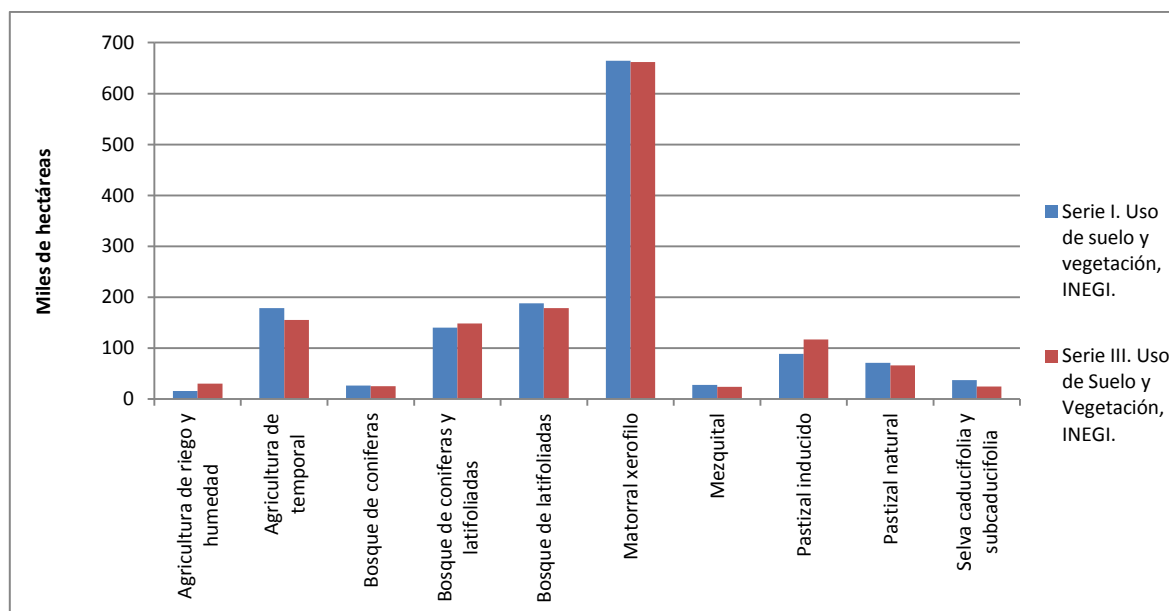


Figura 3.38 Superficie de los principales usos del suelo en la zona 1 para 1976 (Serie I. Uso del suelo y vegetación, INEGI) y 2005 (Serie III. Uso del suelo y vegetación, INEGI)

Tabla 3.5 Tasas de cambio de uso del suelo. Zona 2 y área de influencia (10 km)

Tipo de Vegetación	Área Serie I (1976)	Área Serie III (2005)	Tasa de cambio serie I-serie III
Agrupado	Hectáreas	Hectáreas	1980-2005
Agricultura de riego y humedad	27,113	37,103	1.26
Agricultura de temporal	191,261	286,607	1.63
Área sin vegetación aparente	0	0	ND
Asentamiento humano	0	4,779	ND
Bosque de coníferas	41,717	32,967	-0.94
Bosque de coníferas y latifoliadas	131,703	133,258	0.05
Bosque de latifoliadas	479,909	480,052	0.00
Bosque mesófilo de montana	27,592	26,408	-0.18
Cuerpo de agua	88	1,201	11.04
Matorral xerófilo	432,986	401,101	-0.31
Mezquital	20,551	11,567	-2.27
Otros tipos de vegetación	10,680	4,541	-3.36
Pastizal inducido	72,463	94,214	1.06
Pastizal natural	0	0	ND
Selva caducifolia y subcaducifolia	314,103	265,706	-0.67
Selva perennifolia y subperennifolia	102,731	73,393	-1.34
Total	1,852,897	1,852,897	5.98

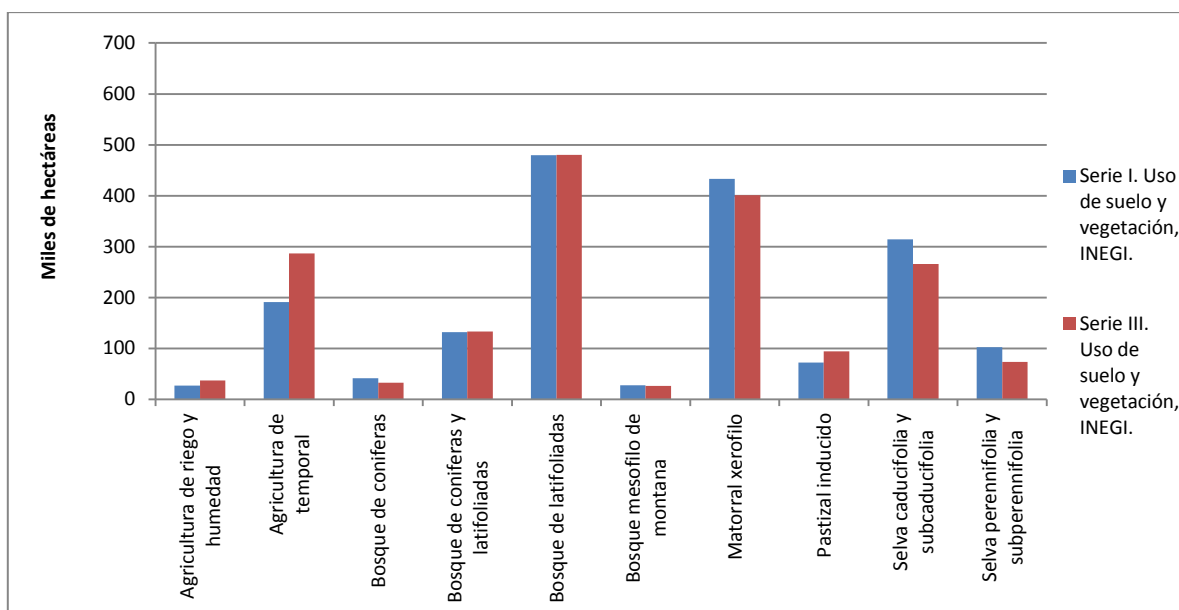


Figura 3.39 Superficie de los principales usos del suelo en la zona 2 para 1976 (Serie I. Uso de suelo y vegetación, INEGI) y 2005 (Serie III. Uso de suelo y vegetación, INEGI)

Tabla 3.6 Tasas de cambio de uso del suelo. Zona 3 y área de influencia (10 km)

Tipo de Vegetación	Área Serie I (1976)	Área Serie III (2005)	Tasa de cambio serie I-serie III
Agrupado	Hectáreas	Hectáreas	1980-2005
Agricultura de riego y humedad	35,142	55,232	1.83
Agricultura de temporal	566,418	697,563	0.84
Área sin vegetación aparente	474	254	-2.47
Asentamiento humano	1,100	7,702	8.10
Bosque de coníferas	165,753	117,945	-1.35
Bosque de coníferas y latifoliadas	126,412	128,041	0.05
Bosque de latifoliadas	118,164	91,989	-1.00
Bosque mesófilo de montana	232,359	196,691	-0.66
Cuerpo de agua	1,839	3,525	2.64
Matorral xerófilo	194,716	138,206	-1.36
Mezquital	592	280	-2.95
Otros tipos de vegetación	272	245	-0.42
Pastizal inducido	200,349	242,308	0.76
Pastizal natural	0	0	ND
Selva caducifolia y subcaducifolia	4,805	2,083	-3.29
Selva perennifolia y subperennifolia	113,384	79,715	-1.40
Total	1,761,778	1,761,778	-0.69

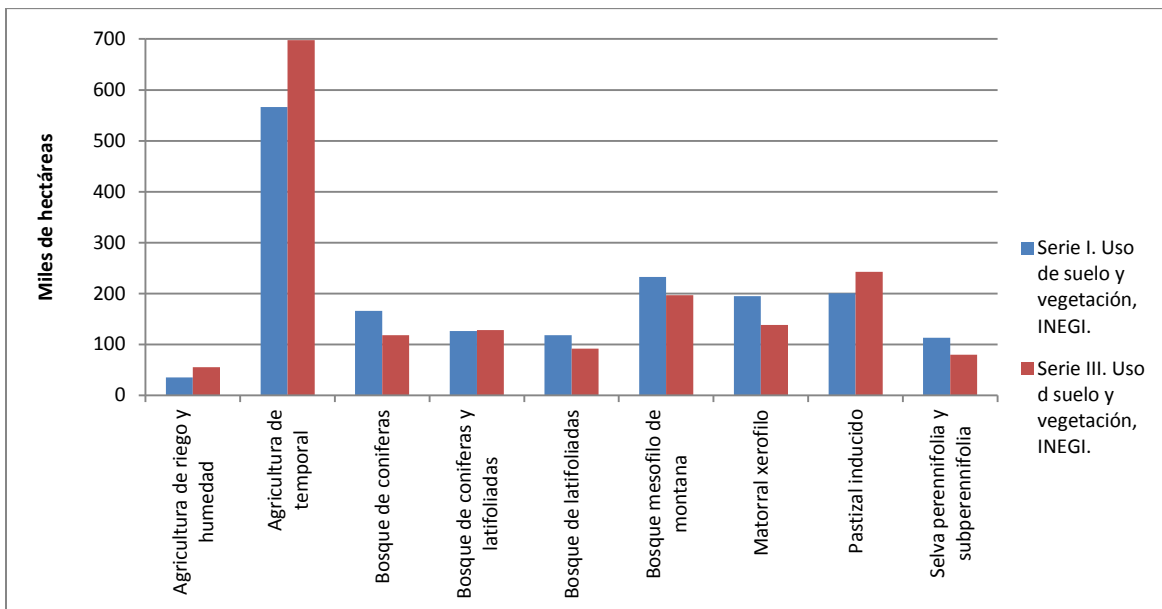


Figura 3.40 Superficie de los principales usos del suelo en la zona 3 para 1976 (Serie I. Uso de suelo y vegetación, INEGI) y 2005 (Serie III. Uso de suelo y vegetación, INEGI)

Por lo anterior resulta relevante profundizar en las causas de las principales afectaciones a la vegetación, y tomar en cuenta que el factor humano puede ser determinante en la búsqueda de posibles soluciones. Una comunidad puede o no ser vulnerable a una crisis climática, y se ha podido ver que en el caso de la región estudiada, aún se cuenta con el germoplasma y con el conocimiento para generar estrategias de adaptación.

Discusión

Estimaciones de la respuesta de la fenología de las plantas al clima a través del NDVI

Se ha demostrado que las estimaciones en la respuesta de la fenología de las plantas tienen el potencial de ser sustancialmente influenciadas por la elección del diseño de estudio y por la metodología estadística utilizada (Parmesan 2007), ya que la limitada información acerca de la vegetación en escalas temporales y espaciales ha significado una dificultad para discernir entre los efectos del cambio ambiental en las especies (Tucker et al. 2005). Dentro de este contexto, la utilización del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), puede ser una de las herramientas que permitan medir el estrés de la vegetación ante condiciones climáticas determinadas.

Antes de llevar los esfuerzos hacia la expansión del monitoreo de la vegetación, a aumentar las bases de datos, la prioridad debería enfocarse en desarrollar consensos de cómo compilar e interpretar los datos, a través de comparar estudios y llegar a conclusiones generales (Parmesan, 2007). Para lograr comprender las relaciones de los ecosistemas con el clima, es importante generar estudios que permitan determinar, de manera regional, el comportamiento de los diferentes tipos de vegetación, a través del análisis de las variables que más influyen en su desarrollo. Para esto, es importante contar con bases de datos climáticas que permitan la comparación entre los valores satelitales y las mediciones en Tierra. En este sentido, los datos que se utilizaron forman parte del proyecto NARR y de las bases de datos disponibles en la página del IRI (ambas fuentes descritas en la metodología). La disponibilidad de estos datos resultó de importancia para la investigación, ya que, a partir de la selección de los píxeles correspondientes al bosque templado, se pudieron determinar las condiciones meteorológicas y climatológicas de las zonas de bosque identificadas a través de la percepción remota.

Las variables que más influyen en la respuesta del bosque templado a la variabilidad climática en la Sierra Madre Oriental

La literatura indica que las variables que más influyen sobre la vegetación son la precipitación, la temperatura y la humedad del suelo. Sin embargo, en el bosque templado

de la Sierra Madre Oriental no fue muy clara la relación del NDVI con la temperatura y se decidió enfocar el estudio a su relación con el aporte de agua y su consecuente aporte en la humedad del suelo como factores que influyen directamente en la actividad fotosintética.

Muchas especies han mostrado patrones estables en su fenología, a pesar del calentamiento (Parmesan, 2007). Una posible explicación a esta teoría en la Sierra Madre Oriental es que la precipitación y la humedad del suelo tienen mayor influencia que la temperatura en el verdor de la vegetación. Esto quiere decir que la vulnerabilidad de la vegetación al cambio climático en la zona de estudio no es clara, porque, de acuerdo con Magaña y colaboradores, 2012, los pronósticos de las tendencias en la precipitación de la región aún son inciertos. Como se demostró en este trabajo, la respuesta de la vegetación en la zona 1 estuvo más estrechamente relacionada con la precipitación que la zona 3, probablemente debido a una mayor disponibilidad de agua en la zona 3, a lo largo del año. Sin embargo, de manera general, el bosque responde más al aporte de agua, que a los cambios en la temperatura.

Respuesta de la vegetación al ciclo anual de precipitación y de humedad del suelo

Existe correlación entre los valores de precipitaciones y el NDVI, y en general este es mayor cuando se lo relaciona con un mes de retraso a las lluvias ocurridas (Iglesias *et al.* 2010). La influencia de las variables sobre el NDVI presenta notables diferencias estacionales. Es más rápida la respuesta al inicio de las lluvias que durante el estiaje.

En el estudio de Wang y colaboradores, 2001, para áreas boscosas las correlaciones fueron mayores con los tiempo de retraso de dos a tres quincenas a inicios del verano, y mejor con tiempos de retraso de cuatro quincenas al fin del verano en Estados Unidos. Los resultados del artículo indican que la influencia de la precipitación en el NDVI dependen de la época en la que se recibe la precipitación.

Lo anterior se corrobora en la región de la Sierra Madre Oriental, ya que en este trabajo se encontró un retraso en la respuesta de la vegetación, que variaba, en promedio, con respecto a la época del año. Se encontró que dicha respuesta es más rápida cuando empieza a llover

y se va retrasando conforme las lluvias son más intensas hasta llegar a 2 quincenas de retraso. Cuando disminuye la cantidad de precipitación, hacia la temporada de invierno, la respuesta del bosque es más lenta (3 quincenas), pero se vuelve más inmediata conforme se acerca a la temporada de estiaje.

En otros trabajos se han reportado también estos retrasos a nivel intra-anual, como en Córdoba, Argentina (retraso de un mes con respecto al inicio de la temporada de lluvias y de 6 semanas para cuando deja de llover) (De la casa y Ovando 2006). Peters y Ji (2003) indican el mismo retraso de aproximadamente un mes. Y en el estudio de Wang y colaboradores (2003), el tiempo de respuesta ante el aumento de precipitación es de 2 a 4 semanas. Estos resultados coinciden aproximadamente con los de esta investigación y confirman que la respuesta es más rápida cuando empieza a llover que cuando cesa la época de lluvias.

En el estudio de Nicholson y Farrar (1994), se demostró que el tipo de suelo, y en especial la porosidad, es la variable más importante que determina la respuesta de la vegetación a la lluvia. A diferencia del ambiente semiárido de Botswana donde se desarrolló este estudio, en la Sierra Madre Oriental no se tomó en cuenta el tipo de suelo, debido a que la estructura del bosque permite que el suelo no tenga mucha influencia en los valores de NDVI. No obstante, se tomó en cuenta la variable de la humedad del suelo. Dicha variable representa el agua disponible para las plantas. Los resultados de humedad del suelo y vegetación en la zona de estudio demostraron que existe una alta correlación entre estas dos variables principalmente a nivel intra-anual en las zonas 1 y 2. La humedad que se almacena en el suelo permite que la vegetación no pierda su verdor tan drásticamente cuando hay un descenso en la precipitación.

Respuesta de la vegetación a la variabilidad interanual de la precipitación y la humedad del suelo

El grado de verdor de la vegetación durante periodos de sequías o lluvias intensas, puede ser un indicador de su resistencia y resiliencia en condiciones de cambio climático (Gómez-Mendoza 2007). Muchos estudios han sugerido una simple relación entre el NDVI y la

lluvia, con el NDVI incrementando con la lluvia generalmente. Sin embargo, esta relación es más compleja, y las dos variables están linealmente relacionadas sólo en un rango limitado de lluvia, generalmente entre los 200 y los 1200 mm anuales y 25 y 200 mm de lluvia mensual (Davenport y Nicholson, 1993; Malo y Nicholson, 1990). Arriba de ese umbral, el índice se satura y el NDVI aumenta sólo muy lentamente con la lluvia o se mantiene constante. EL NDVI claramente incrementa con la lluvia, hasta que la lluvia excede los 400 mm o 500 mm al año.

La mayoría del tiempo, la influencia de la precipitación en una quincena dada se combina con la influencia de los periodos previos y subsecuentes. Esta es una evidencia directa de que la precipitación después de un periodo seco desencadena el rápido crecimiento en las plantas. Los distintos eventos de precipitación tienen un tiempo de retraso distinto antes de la máxima influencia en la vegetación (Wang *et al.* 2001). En esta tesis se muestran estos tiempos de retraso en los mapas, que son variados de acuerdo con el evento que se examinó. En el caso de las sequías, si el evento es más fuerte la respuesta es mayor, mientras que los eventos de exceso de precipitación no tienen la misma respuesta.

En el estudio de Malo y Nicholson (1990), se encontró un descenso de los valores de NDVI, debidos al descenso de la precipitación en el Sahel. En la Sierra Madre Oriental no se encontró una tendencia clara en los datos de anomalías de NDVI, debido probablemente a que tampoco existe una tendencia clara en la precipitación promedio de la zona.

Respuesta de la vegetación a eventos de falta de agua

Debido al estrés hídrico evidenciado en la vegetación, la amplitud del NDVI es en general menor en años secos (Iglesias *et al.* 2010). El NDVI está influenciado más fuertemente por eventos de precipitación discreta que son precedidos o seguidos por periodos relativamente largos de precipitación menor (Wang *et al.* 2001). Es decir, que aprovecha más el agua cuando se presenta después de una sequía, y la sequía le afecta más si es precedida por una serie de eventos de baja precipitación, esto es observable principalmente en las gráficas de la zona 1.

El efecto de las sequías sobre el NDVI depende de su duración y del mes en el que se inicie (Gómez-Mendoza, 2007). En la SMO se encontró que si un déficit de precipitación se inicia en una época en la que normalmente no llueve, la anomalía de NDVI es menor que si la sequía se presenta durante el inicio de la temporada de lluvias, como se observó en el año de 1998 y en el 2011. Estudios recientes que se han generado para la Sierra Madre Oriental, sugieren que en años El Niño, el NDVI tiende a ser menor que en años La Niña, lo que implica una influencia de la oscilación climática regional y eventos extremos en la actividad fotosintética y fenológica de la vegetación.

Respuesta de la vegetación a eventos de exceso de agua

A pesar de la relación positiva entre la precipitación y el NDVI, se encontró un umbral para cada región más allá del cual la vegetación ya no responde a los pulsos de lluvia. Este umbral también fue estudiado por Nicholson y Farrar (1994) en donde se demuestra que hay una relación lineal entre las variables, siempre y cuando no se excedan los 500 mm por año o 50 a 10 mm por mes. Arriba de estos niveles, la saturación impide que el NDVI siga aumentando, sólo lentamente.

Dicha variación puede ser diferente de acuerdo al tipo de vegetación y a la localización geográfica de las diferentes regiones del mundo. Generalmente se ha estudiado que ese rango está entre los 200-1200 mm de lluvia anual y 25-200 mensual. Lo anterior indica que el probable aumento en los ciclones y su categoría en la región de estudio, no implicaría beneficios en los bosques, ya que el aumento en el NDVI presenta con lluvias constantes, no intensas.

Diferencias regionales e influencia del tipo de vegetación en la respuesta del NDVI a la precipitación y la humedad del suelo

Además del diferente impacto que puedan tener las variables climáticas en la dinámica de la vegetación, hay que tener en cuenta que la respuesta puede ser muy diferente en función de las diferentes formaciones vegetales, de sus características fisiológicas, su localización geográfica e incluso debe considerar que el impacto puede variar estacionalmente de forma muy importante en función de las necesidades hídricas y térmicas de la vegetación.

De acuerdo con lo estudiado por Ichii y colaboradores (2002), existe una relación positiva y significativa entre el NDVI y las temperaturas en las latitudes medias y altas de Europa y Asia, mientras que la mayor correlación entre el NDVI y las precipitaciones las registraron en regiones desérticas y subdesérticas. En general ha habido pocos estudios que detecten las variables que influyen mayormente en el ecosistema de bosque templado. En el presente estudio se encontró que la variable a la que responden de manera importante es a la precipitación y a la humedad del suelo, más que a la temperatura.

En la Sierra Madre Oriental el NDVI aumenta regionalmente con la precipitación. La zona 3, por ejemplo, es más lluviosa y el NDVI es más alto. Con la temperatura, sin embargo, no se observa esta relación. Durante los periodos secos, después de precipitaciones significativas, las áreas en las que la precipitación es alta permanecen verdes más tiempo que las áreas con menor precipitación, probablemente por las diferencias en la humedad del suelo.

En la investigación de Gómez-Mendoza (2007) se identificó que el efecto de la variación inter e intra-anual de la relación NDVI-lluvia en la Sierra Norte de Oaxaca era mayor en los tipos de vegetación caducifolia y semicaducifolia que en los perennes. Estos resultados podrían explicar las diferencias en la respuesta de las zonas de estudio en la Sierra Madre Oriental, es decir que la razón por la que la zona 1 mostró más relación con la precipitación que las zonas 2 y 3 fue debido a que la temporada de menor y mayor precipitación es más marcada que en las otras dos.

La misma investigación, determinó que la variabilidad intra-anual del NDVI presenta un retraso con respecto a los ciclos de lluvia, que depende de las fenofases foliares de los tipos de vegetación. Para el caso del bosque templado de la SMO se pudo identificar un retraso en la respuesta intra-anual de la vegetación a la precipitación y la humedad del suelo, pero se determinó que ésta era diferenciada a lo largo del año. Gómez-Mendoza (2007) menciona que el retraso diferenciado en la respuesta de la vegetación a la disminución de la precipitación puede deberse a que el suelo conserva humedad después de finalizar las lluvias en octubre y permite que el valor de NDVI no disminuya drásticamente hasta enero. Esta hipótesis es aplicable en la región de estudio, ya que para el invierno se detecta una disminución lenta en el verdor, a pesar de que las lluvias disminuyen de manera importante.

Cambio de uso del suelo

De acuerdo con el estudio de cambio de uso de suelo, el crecimiento poblacional influye en la conservación, ya que se detectaron tasas de cambio más altas hacia la zona de los bosques mesófilos, en donde se asienta gran parte de la población de ciudades como: Pachuca, Tulancingo y Huauchinango. Sin embargo, no se le puede dar respuesta a este argumento a través de los valores de NDVI, porque, al menos en la región de estudio, éstos se comportaron de manera similar en las tres zonas, lo cual indica que el bosque se comporta como una región.

Cabe resaltar que los cambios de uso del suelo que se identificaron en la región se reportaron principalmente para las selvas caducifolias y perennifolias cercanas al bosque, y se deben principalmente al avance de la agricultura industrial en esas zonas, siendo muy diferente en las regiones ocupadas por pueblos indígenas, en las que se ha registrado un conocimiento avanzado sobre las relaciones del clima con la vegetación, principalmente en estudios realizados sobre la cultura teenek (Ávalos *et al.* 2012). Lo anterior podría ser una explicación de que el bosque templado no haya sufrido cambios tan altos como las selvas en su área de distribución, ya que el manejo de las comunidades indígenas y su conocimiento de los recursos han permitido que estas zonas mantengan buena parte de su diversidad biológica y sean aptas para desarrollar proyectos de conservación. Resulta relevante profundizar en la relación de los pueblos indígenas con su entorno geográfico, ya que buena parte de sus conocimientos podrían ser la clave del adecuado manejo del bosque.

Conclusiones

Se estudió la influencia del clima en el bosque templado con el fin de entender la relación entre la salud de la vegetación y la variabilidad climática, con ello se espera aportar a los trabajos que actualmente se realizan para conservar parte de este ecosistema en la Sierra Madre Oriental, ya que si se conoce el comportamiento actual de un determinado tipo de vegetación, puede predecirse su comportamiento en el futuro ante diferentes escenarios de cambio climático, además de aportar con herramientas metodológicas para futuras evaluaciones sobre resiliencia de la vegetación.

La disponibilidad de agua es el factor más importante en la respuesta en el verdor de la vegetación, respuesta que se refleja con un retraso aproximado de 2 quincenas con relación al aporte de lluvia.

La precipitación si es la variable que más explica el comportamiento de la vegetación, por lo tanto los esfuerzos en la conservación deben ir orientados al monitoreo de este tipo de eventos. Sin embargo, hay muchas otras cosas que influyen en la conservación de un bosque y este trabajo no puede ser concluyente en ese sentido, porque los procesos de cambio de uso de suelo, una baja densidad de población en general, no obstante la presencia de un alto número de poblaciones indígenas, son factores que influyen de igual manera en la conservación.

La respuesta diferenciada a lo largo del año, así como la respuesta ante eventos extremos, significan resultados importantes para la toma de decisiones en cuanto acciones de prevención y mitigación en zonas de bosques templados. Si se conoce el ciclo que tiene el verdor de la vegetación, y se tiene el pronóstico de una sequía o un evento de extrema humedad, pueden generarse acciones precautorias ante la presencia de incendios, planificar calendarios de reforestación o pronosticar plagas. Los estudios sobre la influencia del clima en la vegetación de bosques templados son escasos en México. Por ello resulta necesario ampliar la red de análisis en un área donde se llevan a cabo estudios de conservación.

A pesar de las limitaciones, los resultados muestran algunas de las relaciones fundamentales entre los parámetros evaluados y sugieren áreas en donde se requiere mayor investigación.

Los proyectos de conservación para este tipo de ecosistema están siendo encaminados a preservar las técnicas de agricultura y manejo del bosque de las comunidades indígenas, como se menciona en el capítulo 1, ya que han demostrado tener un amplio conocimiento de la relación del clima con los ecosistemas a lo largo de cientos de años, y puede especularse que serán capaces de adaptarse al paso de eventos extremos y al cambio climático si se impulsan políticas de desarrollo social y apoyo al campo en sus comunidades.

La creación de nuevos espacios de conservación en la región es justificable, debido a la baja fragmentación y buena interconectividad que presenta el bosque templado de toda la región. El proyecto de corredores biológicos pretende conectar los espacios ya protegidos, con el fin de tener un mayor alcance de preservación de ecosistemas y permitir el flujo genético entre las diferentes comunidades de animales y plantas amenazadas o en peligro de extinción, como el jaguar, el oso negro, los helechos arborescentes o el liquidámbar.

La mayor vigilancia de las actividades dentro de estos sitios de conservación, podría permitir su subsistencia, siempre y cuando esto implique un beneficio para las comunidades humanas locales, que tendrán que adaptarse a las condiciones que podrían enfrentar si se presentan cambios en los valores climáticos, principalmente los referidos a valores extremos mayores o iguales a los que les han afectado en el pasado.

Referencias

- Agnew, C. T. (2000) Using the SPI to identify drought. Drought Network News. Universidad de Nebraska-Lincoln. Vol. 12, pág. 6-12.
- Ávalos, J.A., L. Gómez-Mendoza y M.A. Espinoza (2012) Estudio de línea base macro del Corredor Biológico Sierra Madre Oriental. Tarea 6. Proyecto: Análisis de vulnerabilidad en la Sierra Madre Oriental. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Agencia Alemana de Cooperación Técnica. México. 146pp.
- Bonan, G. (2008) Ecological climatology: concepts and applications. Cambridge University Press. 550 pp.
- Castro, C., A. Beltrán y R. Pielke (2009) Spatiotemporal Variability of Precipitation, Modeled Soil Moisture, and Vegetation Greenness in North America within the Recent Observational Record. American Meteorological Society. Vol. 10, pág. 1355-1378.
- Challenger, A., y J. Soberón (2008) Los ecosistemas terrestres, en Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. Conabio, México, pág. 87-108.
- Challenger, A., R. Dirzo et al. (2009) Factores de cambio y estado de la biodiversidad, en Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. Conabio, México, pág. 37-73.
- CONABIO (2010) El Bosque Mesófilo de Montaña en México: Amenazas y Oportunidades para su Conservación y Manejo Sostenible. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F. 197 pp.
- CONANP (2012) Cambio Climático en Áreas Naturales Protegidas, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, SEMARNAT. México. Consultado en: <http://cambioclimatico.conanp.gob.mx/index.php>
- CONANP-GIZ (2013) Programa de adaptación al Cambio Climático Corredor Ecológico de la Sierra Madre Oriental. Comisión Nacional de áreas Naturales Protegidas CONANP y Agencia Alemana de Cooperación Técnica GIZ. México.
- Cuadrat-Prats, J.M., S.M. Vicente-Serrano y A. Romo (2005) Análisis estacional de la influencia climática sobre la variabilidad espacio-temporal del NDVI en el centro del valle del Ebro. Revista de Teledetección. Vol. 23, pág 51-64.
- Davenport y Nicholson (1993) On the relation between rainfall and the normalized difference vegetation index for diverse vegetation types in East Africa. International Journal of remote Sensing. Vol. 12, pág. 2369-2389.
- De la casa y G. Ovando (2006) Relación entre la precipitación e índices de vegetación durante el comienzo del ciclo anual de lluvias en la provincia de Córdoba, Argentina. INTA, Argentina. Vol. 35(1), pág. 67-86.

- Domínguez Sarmiento, C. (2012) El papel de los ciclones tropicales en el clima de México. Tesis de maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra. UNAM. 89pp.
- ECCAP (2010) Estrategia de Cambio Climático para Áreas Protegidas. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, SEMARNAT. México.
- Fan Y. y Van den Dool, H. (2008) A global monthly land surface air temperature analysis for 1948-present. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, pág. 1 a 18.
- Fang J., S. Piao, L. Zhou, J. He, F. Wei, R. B. Myneni, C. J. Tucker y K. Tan (2005) Precipitation patterns alter growth of temperate vegetation. *Geophysical Research Letters*. Vol. 32, pág. 4485-4498.
- Galicia, L., L. Gómez-Mendoza y R. Aguilar-Santelises (2008) Sensibilidad de grupos funcionales al cambio climático en la Sierra Norte de Oaxaca, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. Núm. 67
- Galván, L. (2011) Impacto de la sequía meteorológica en la vegetación de distintas regiones climáticas de México (1982-2006). Tesis de maestría. Instituto de Geografía. UNAM. 60 pp.
- Gómez Mendoza, L. (2007) Variabilidad climática y cambio de uso del suelo en la sierra norte de Oaxaca: implicaciones en los escenarios de cambio climático. Tesis de doctorado. Instituto de Geografía. UNAM. 212 pp.
- Gómez-Mendoza, L. y L. Arriaga (2007) Modeling the Effect of Climate Change on the Distribution of Oak and Pine Species of México. *Conservation Biology*. Vol. 21, pág. 76-100.
- Gómez-Mendoza, L. y L. Galicia (2004). Variabilidad climática y los ecosistemas terrestres. *Revista ciencia y desarrollo*. CONACYT.
- Gunderson, L., C. Allen y C.S. Holling (2010). *Foundations of ecological resilience*. Island Press. Washington. 496 pp.
- Hannah, L. J. (2011) *Climate change biology*. Academic Press Elsevier. San Diego, California. 402 pp.
- Hellmuth M.E., D.E. Osgood, U. Hess, A. Moorhead y H. Bhojwani (2009) Seguros en base a índices climáticos y riesgo climático: Perspectivas para el desarrollo y la gestión de desastres. *Clima y Sociedad* No. 2. Instituto Internacional de Investigación para el Clima y la Sociedad (IRI), The Earth Institute at Columbia University, Nueva York, EEUU.
- Hernández, M. y M. Sánchez (2010) Conceptualizaciones en torno al riesgo y vulnerabilidad agrícola ante la variabilidad climática. En: *Conocimiento para el desarrollo de Tlaxcala. Sociedad y medio ambiente* vol. II. Vázquez, J., M. Sánchez y M. Hernández (coordinadores). CONACYT, Colegio de Tlaxcala, A.C. México.
- Ichii K., A. Kawabata y Y. Yamaguchi (2001) Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 22 (7), pág. 1377-1382.

- INEGI (2002). Síntesis Geográfica del Estado de San Luis Potosí y anexo cartográfico. INEGI, Aguascalientes, México.
- IPCC (2007) Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104pp.
- Juárez, J. y B. Ramírez (2006) Productores indígenas del café de la sierra Nororiente de Puebla. Problemas y alternativas. Colegio de postgraduados. Puebla. México.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, R. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Jenne and D. Joseph (1996) The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bulletin of the American Meteorological Society. Pág. 437-472.
- Klausmeyer, K., R. Shaw, J. B. MacKenzie y D.R. Cameron (2011) Landscape-scale indicators of biodiversity's vulnerability to climate change. Ecosphere. Vol. 2(8).
- Llorente-Bousquets, J., y S. Ocegueda (2008) Estado del conocimiento de la biota. En: Capital natural de México. vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. CONABIO. México. Pág. 283-322.
- Lugo-Hubp, J. y M.T. García-Arizaga (2003) El relieve mexicano en mapas topográficos. Instituto de Geografía. UNAM. 148 pp.
- Magaña, V. (2004) El Cambio Climático Global. En: Cambio Climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 523pp.
- Magaña, V. (2013) Guía Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad ante Cambio Climático. Instituto Nacional de Ecología y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. México, DF. 61 pp.
- Magaña, V., L. Gómez y L. Galván (2012) Clima (variabilidad y cambios) en la región de Sierra Madre Oriental, México. Tarea 5. Proyecto: Análisis de vulnerabilidad en la Sierra Madre Oriental. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Agencia Alemana de Cooperación Técnica. México. 27 pp.
- Martínez, M. (2008) Grupos funcionales. En: Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. CONABIO, México, pág. 365-412.
- McKee, T.B., N. J. Doesken, y J. Kliest (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, CA. American Meteorological Society. Boston, MA. Pág 179-184.
- Mestre, A. y J.A. de Cara (2008) Impactos del cambio climático en los ecosistemas forestales ibéricos. Agencia Estatal de Meteorología. Área de Aplicaciones Climatológicas y Medioambientales. Gobierno de España.

- Nahed, J. (2012) Animales domésticos y agroecosistemas campesinos. Revista LEISA. Junio 2012. México. Pág. 10-11.
- Nicholson, S. E. y T. J. Farrar (1994) The Influence of Soil Type on the Relationships between NDVI, Rainfall, and Soil Moisture in Semiarid Botswana. I. NDVI Response to Rainfall. Elsevier science. Remote Sens. Environ. Vol. 50, pág. 107-120.
- Parmesan, C. (2007) Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming. Vol. 13(9), pág. 1860-1872.
- 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. Vol. 25, pág. 721-733.
- Peters, A. y L. Ji (2003) Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. Universidad de Nebraska-Lincoln, Estados Unidos. Remote Sensing of Environment. Vol. 87, pág. 85-98.
- Puig, H. (1991) Vegetación de la Huasteca de México. Estudio fitogeográfico y ecológico. Instituto de Ecología, A.C. Xapala, México. 625 pp.
- Rouse J. W., R.H. Haas, J.A. Schell y D.W. Deering (1974) Monitoring vegetation system in the Great Plains with ERTS Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt. NASA SP-351, pág. 3010-317
- Rzedowski, J. (2006) Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504 pp.
- SEMARNAT, CONABIO (2012) Logros 2012. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Primera edición. México.
- Schultz, P. A. y M.S. Halpert (1995) Global analysis of the relationships among a vegetation index, precipitation and land surface temperature. International Journal of remote Sensing. Vol. 16, pág. 2755-2777
- Tucker, J. Compton, J. E. Pinzon, M. E. Brown, D. A. Slayback, E.W. Pak, R. Mahoney, E. F. Vermote y N. Saleous (2005) An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. International Journal of Remote Sensing. Vol. 26, pág. 4485-4498.
- Turner *et al.* (2007) The emergence of land change science for global environmental change and sustainability, Harvard University, Cambridge. Vol. 105, pág. 20666-20671.
- Vidal Zepeda, R. (2005) Las regiones climáticas de México. Instituto de Geografía. UNAM. 212 pp.
- Villaseñor, J.L. (2010) El bosque húmedo de montaña en México y sus plantas vasculares: catálogo florístico-taxonómico. Instituto de Biología. UNAM. México. 42pp.
- Villers, L. e I. Trejo (2004) Evaluación de la vulnerabilidad en ecosistemas forestales. En: Cambio Climático: una visión desde México. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 523pp.

Wang, J., K. P. Price y R. M. Rich (2003) Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 24, pág. 2345-2364.

Weier, J. y D. Herring (2013) Measuring Vegetation (NDVI and EVI). En línea:
http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_1.php

Wilks, D. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Tercera edición. Elsevier Inc. Oxford. 676 pp.

Yu, F., K.P. Price, J. Ellisc y P. Shid (2003) Response of seasonal vegetation development to climatic variations in eastern central Asia. Elsevier. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 87, pág 42–54.

Zunino, M. y A. Zullini (2003) *Biogeografía: la dimensión espacial de la evolución*. Fondo de Cultura Económica. México D. F., México. 359 pp.