

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
División de Estudios de Posgrado
Departamento de Geografía

**Análisis de las tendencias de la precipitación pluvial en la
Región de las Grandes Montañas del Estado de Veracruz,
México**

TESIS QUE PARA OPTAR AL GRADO DE
MAESTRA EN GEOGRAFÍA
PRESENTA
CLARA EMILIA PUCHET ANYUL

México, D. F.

2007



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.

**A todos los que creyeron que algún día
este sueño se haría realidad**

Agradecimientos

Quiero agradecerle especialmente a mi tutor, el Dr. Víctor L. Barradas Miranda, su calidad humana, su paciencia y su entusiasmo para llevar a buen término la imprescindible y valiosa dirección de esta investigación, así como a los miembros del jurado: Dra. Laura Elena Maderey Rascón, Dra. Rebeca Granados Ramírez, Dra. Teresa Reyna Trujillo y Dra. Marta Cervantes Ramírez, por la revisión en detalle de este trabajo y por las aportaciones y sugerencias que me hicieron para enriquecerlo.

Deseo también agradecer al Mtro. Horacio Catalán por su asesoría en relación al manejo del paquete estadístico de cómputo; a la Dra. Gloria Herrera por haberme proporcionado algunas de las bases de datos; y a la Lic. Karina Álvarez por su apoyo para conseguir los mapas de la zona en los inicios de este largo periplo.

Asimismo agradezco con mucho cariño a quienes me apoyaron en la elaboración de la tesis de muy diversas maneras:

a Marduk por la elaboración del programa para las bases de datos,
a Sirio por la edición final de las gráficas y figuras,
a Nuri por sus valiosas ideas y revisiones,
a Rebeca por la edición final de los mapas,
a Martín por sus detalladas explicaciones de estadística,
a Ana por escuchar mis cuitas y apoyarme durante todo el trayecto.

Este trabajo se realizó en el contexto del proyecto 36892-B "Interacción planta-atmósfera, balance hídrico local y uso del agua por la vegetación en la región de las Grandes Montañas del Estado de Veracruz."

Índice

Resumen.....	5
1. Introducción.....	6
2. Antecedentes.....	15
3. Marco conceptual.....	18
3.1 Relación clima-vegetación.....	18
3.2 Cambio de uso del suelo.....	22
3.3 Situaciones sinópticas que provocan la precipitación en la zona en estudio.....	27
4. Metodología.....	29
4.1 Planteamiento del problema y justificación del tema de estudio.....	29
4.1.1 Hipótesis.....	30
4.1.2 Objetivo general.....	30
4.1.3 Objetivo particular.....	30
4.2 Características de la zona en estudio.....	31
4.2.1 Localización.....	31
4.2.2 Clima.....	33
4.2.3 Vegetación.....	35
4.3 Materiales y métodos.....	38
4.3.1 Datos de precipitación pluvial.....	38
4.3.2 Análisis estadístico.....	42
5. Resultados.....	44
6. Discusión.....	61
6.1 Recursos hídricos, población y actividades económicas.....	63
6.2 Cambio de uso del suelo.....	66
6.3 Deforestación y cambio climático.....	69
7. Conclusiones.....	71
8. Referencias bibliográficas.....	73
9. Apéndice.....	81

Resumen

En esta investigación se realizó un análisis de las tendencias de la precipitación pluvial en la región de las Grandes Montañas del Estado de Veracruz, con el propósito de saber si ésta ha aumentado o disminuido a través del tiempo. Los análisis se derivaron de los datos de precipitación pluvial en un conjunto de estaciones climatológicas localizadas en las laderas de barlovento, en Veracruz, y en las laderas de sotavento en la zona sureste del Estado de Puebla. Las tendencias de la precipitación pluvial fueron analizadas mensual y anualmente, tanto para la época húmeda como para la seca.

Los resultados sugieren la posibilidad de que se esté presentando un proceso de cambio climático en la región de las Grandes Montañas del Estado de Veracruz, dado que las precipitaciones han disminuido a barlovento y aumentado a sotavento del sistema montañoso, de manera más acentuada en la época seca.

Las evidencias de un posible cambio climático a escala regional indican que puede estar siendo provocado por la deforestación.

1. Introducción

El estudio del clima es particularmente importante en la investigación geográfica debido a la interacción dinámica que establece con los componentes bióticos y abióticos de los ecosistemas. Esta peculiaridad resulta válida tanto en el plano global, con expresión clara en la zonalidad geográfica, como en la escala regional, asociada al estudio del paisaje.

Riabchikov (1972, en Barranco 1994) señala que en el estudio del medio ambiente los componentes del clima desempeñan un papel importante, fundamentalmente aquellos que guardan relación con el balance de energía y la dinámica de las masas de aire. Estos componentes (temperatura y precipitación, entre otros) se manifiestan a través de la diferenciación del calor y la distribución de la humedad, conforme a su ritmo estacional.

De acuerdo con la Asociación Española de Climatología (2006): “El comportamiento del clima incide de modo directo sobre el medio natural y prácticamente en todas las parcelas de la actividad del hombre, y es necesaria la colaboración entre distintos campos del saber para su comprensión y estudio: la dependencia geográfica del clima, la naturaleza física de los fenómenos atmosféricos, las repercusiones biológicas, sociales, económicas y ambientales del clima son tan evidentes que negar uno de ellos supone empobrecer el avance del conocimiento y la aplicabilidad de los resultados”.

De tal manera que hoy en día los estudios sobre clima no sólo lo consideran como parte del sistema natural, sino también como parte de un sistema que incluye lo económico y lo social (Borisenkov 1982, en Barranco 1994), constituyendo una temática netamente geográfica.

En las investigaciones climatológicas se pueden observar tres líneas fundamentales de trabajo:

- la obtención de información climática y su empleo en el conocimiento del clima de cada localidad,
- las investigaciones sobre la influencia del clima en el hombre (bioclimatología),
- y el estudio de los cambios climáticos como resultado de la acción conjunta de factores naturales y antrópicos (Barranco, 1994).

En relación a este último punto, el fenómeno conocido como calentamiento global o cambio climático global (CCG) ha cobrado singular importancia debido, principalmente, a la toma de conciencia acerca de sus consecuencias negativas. De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (2001), conocido por sus siglas en inglés como IPCC, se entiende por cambio climático “la variación estadísticamente significativa, ya sea de las condiciones climáticas medias o de su variabilidad, que se mantiene durante un período prolongado (generalmente durante decenios o por más tiempo) ... y puede deberse a procesos naturales internos, a un forzamiento externo, o a cambios antropogénicos duraderos en la composición de la atmósfera o en el uso de la tierra”.

Dentro del CCG tiene particular importancia el llamado efecto invernadero. El efecto invernadero es un proceso natural que ocasiona el calentamiento de la superficie terrestre y de la baja atmósfera (troposfera). Este efecto se origina por la presencia en la atmósfera de gases que tienen la capacidad de absorber y reemitir la radiación terrestre, de modo que actúan como los vidrios de un invernadero, de ahí proviene la denominación.

De acuerdo con Masera (2006), en ausencia de esos gases la temperatura de equilibrio de la Tierra sería de -20°C en lugar de 13°C (o sea 33°C más baja de lo que es), haciendo imposible la existencia de las formas de vida que habitan el planeta. Hasta hace poco tiempo, los cambios en el clima se asociaban solamente a forzamientos externos naturales. Sin embargo, hoy está claro que las actividades humanas pueden cambiar el clima terrestre (Centella *et al.* 1997; Stenseth & Hurrell, 2005; IPCC 2007), produciendo un reforzamiento del efecto invernadero. Es importante hacer notar que el efecto invernadero es un proceso natural, y que el cambio climático a consecuencia de las actividades humanas se asocia no con su existencia sino con su intensificación.

El efecto invernadero antropogénico se debe a la emisión a la atmósfera de gases como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), los clorofluorocarbonos (CFC), el ozono (O_3) y el monóxido de carbono (CO), entre otros, que reflejan y atrapan una buena parte del calor que el planeta emite, conservándolo cerca de la superficie. Cuanto mayor es la concentración de los gases de efecto invernadero (GEI),

aumenta la cantidad de calor atrapado en las capas inferiores de la atmósfera y la temperatura superficial tiende a elevarse. La concentración en la atmósfera del principal gas de efecto invernadero, el dióxido de carbono, no ha dejado de aumentar: pasó de 280 partes por millón (ppm) en los albores de la Revolución Industrial, a más de 379 ppm en la actualidad (IPCC,2007). Las estimaciones para fines del siglo XXI las sitúan entre 540 y 970 ppm (UNESCO, 2001).

La Primera Conferencia Mundial sobre el Clima se celebró en Ginebra, Suiza, en 1979. Nueve años más tarde, en 1988, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) crearon el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Esta red mundial de centenares de expertos en todo el mundo ha publicado cuatro informes (en 1990, 1995, 2001 y 2007), que se han convertido en obras de referencia ampliamente utilizadas por científicos, estudiantes y algunos sectores gubernamentales.

El objetivo del IPCC es evaluar la información científica disponible acerca del impacto y las consecuencias del cambio climático, así como los aspectos socioeconómicos y las opciones para mitigar dichos cambios o bien la necesidad de adaptarse a ellos.

En 1990, la Segunda Conferencia Mundial sobre el Clima, celebrada nuevamente en Ginebra, Suiza, adoptó las conclusiones del Primer Informe Científico del IPCC, y recomendó que se iniciaran las negociaciones para elaborar un tratado internacional que permitiera mitigar el posible cambio

climático mundial. En ese año, la Asamblea General de la ONU estableció un comité intergubernamental encargado de negociar la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMCC).

El texto de la Convención fue presentado para su firma a los jefes de estado y representantes de gobiernos que participaron en la Cumbre de la Tierra, celebrada en Río de Janeiro, Brasil, en junio de 1992, siendo aprobado por un total de 154 países.

La Convención, que entró en vigor el 21 de marzo de 1994, define el cambio climático como “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial, y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”, estableciendo una distinción entre el “cambio climático” atribuible a las actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera y la “variabilidad natural del clima”.

En su Artículo 2 establece que “el objetivo último de la Convención, y de todo instrumento jurídico conexo que adopte la Conferencia de las Partes, es lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático. Ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos

no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible” (IPCC, 2001).

La Convención también reconoce que:

- los principales responsables de las emisiones pasadas y presentes de GEI son los países industrializados, y en consecuencia deben estar a la vanguardia en la lucha contra el cambio climático,
- la prioridad de los países en desarrollo es su desarrollo económico y social y por lo tanto las emisiones originadas por ellos aumentarán a medida que se industrialicen,
- los países con ecosistemas frágiles (pequeños Estados insulares y países áridos) son particularmente vulnerables a los efectos previstos del cambio climático.

En 1995, la Primera Conferencia de las Partes, celebrada en Berlín, Alemania, reconoció que los compromisos de reducción adoptados, es decir la reducción de las emisiones de GEI para el año 2000 a los niveles de 1990, eran insuficientes para estabilizar las concentraciones de GEI en la atmósfera a fin de satisfacer el objetivo último de la Convención. Como resultado se adoptó el Mandato de Berlín, que puso en marcha la negociación de un protocolo que estableciera compromisos de limitación y reducción de emisiones antropogénicas de GEI, con el objetivo de mitigar la influencia de las actividades humanas que provocan el calentamiento global

de la atmósfera y el consecuente cambio climático. Para negociar el texto de dicho protocolo, se estableció el Grupo Especial del Mandato de Berlín, que sometió a consideración un borrador, aprobado finalmente el 11 de diciembre de 1997, con el nombre de Protocolo de Kyoto.

El Protocolo de Kyoto establece compromisos específicos, con el objetivo de reducir colectivamente los niveles de emisiones de GEI en un 5.2% con respecto a los existentes en 1990, en un período de 5 años, comprendido de 2008 a 2012. Cubre seis gases de efecto invernadero: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs) y hexafluoruro de azufre (SF₆). Para los tres primeros gases, que son los principales, el año de referencia es 1990 y para los tres últimos 1995.

El proceso de negociación del Protocolo de Kyoto duró más de siete años y concluyó con su entrada en vigor el 15 de febrero de 2005, luego de que Rusia lo ratificara. Sin embargo, Estados Unidos, responsable de la cuarta parte de las emisiones, y Australia, principal exportador mundial de carbón mineral, decidieron no ratificarlo, siendo consecuentes con su política de no reducir el consumo de combustibles fósiles (Masera, 2006).

Si bien en 1995 el IPCC escribía en uno de sus Informes: "el conjunto de evidencias sugiere un cierto grado de influencia humana sobre el clima global" (IPCC, 1995), actualmente existe consenso entre la comunidad científica dedicada al estudio del clima acerca de que la continua

adición de gases de invernadero a la atmósfera está produciendo un calentamiento global del planeta (Gay, 2003).

El Cuarto informe del IPCC, publicado en febrero de 2007, reconoce que el aumento de la temperatura media registrado desde mediados del siglo XX es muy probablemente una consecuencia del aumento de los GEI emitidos por el hombre, existe un 90% de certeza de que la causa es antropogénica (IPCC, 2007).

Los modelos de simulación del clima mundial predicen que entre los efectos más importantes del CCG estarían (Masera, 1991):

- a) un aumento de la temperatura media superficial de 1.5 a 6° C, en los próximos cien años,
- b) cambios en los patrones de la precipitación pluvial mundial, con diferencias significativas en el plano regional,
- c) elevación del nivel del mar de 0.2 a 1.5 metros,
- d) cambios en la humedad del suelo al aumentar la evaporación.

En el IV Foro Mundial del Agua, Mario Molina Pasquel, Premio Nobel de Química, aseveró que de mantenerse las tendencias actuales, al final de este siglo la temperatura se incrementará de 2 a 8° C, lo cual significa un riesgo intolerable. La relación entre agua y cambio climático global, es un fenómeno ocasionado sin duda por las actividades humanas. El impacto físico que genera el cambio climático en el agua es la intensificación del ciclo hidrológico, que aumentaría los flujos del líquido hacia los continentes y afectaría la disponibilidad del recurso. Los glaciares

ya se están derritiendo, las lluvias se intensificarán y también las sequías. Aunque no se puede decir que un huracán sea ocasionado por el cambio climático, lo que sí se sabe es que éste tiene relación con la cantidad y frecuencia de los mismos. El año 2005 ha sido el más caluroso de los pasados mil años, con un aumento de temperatura de 1° C respecto al promedio. El calentamiento global se está dando más rápido de lo previsto (Molina, 2006).

2. Antecedentes

En numerosas regiones del mundo se han llevado a cabo múltiples investigaciones acerca de las tendencias de la precipitación pluvial, debido a que el cambio climático global está afectando de maneras diferentes las precipitaciones en diversas partes del globo. En algunas regiones la precipitación pluvial se ha incrementado, en otras se ha reducido sensiblemente, con las consecuencias respectivas para las actividades agropecuarias y la vida humana en general.

Cada día nos llegan noticias de inundaciones o sequías en el orbe, se afirma incluso que el clima se está volviendo extremoso, debido a que las precipitaciones muy abundantes o las sequías extremas se han vuelto más frecuentes. Lo mismo sucede con la temperatura.

Dado que existe una gran cantidad de artículos publicados relacionados con el tema de esta investigación hemos seleccionado sólo aquéllos que constituyen un antecedente interesante porque ayudan a esclarecer la relación entre el cambio de uso del suelo y las variaciones de la precipitación pluvial.

En cuanto al cambio de la cubierta forestal y su repercusión en la precipitación pluvial, Meher-Homji (1988) analiza las evidencias a favor y en contra de que los cambios en el área forestal influyan en la precipitación en India. Concluye que, al parecer, la intensidad de las tormentas tropicales y el número de días secos son probablemente más sensibles al grado de cobertura vegetal, lo cual resulta significativo tanto para la hidrología local como para la conservación del suelo.

Reale & Shukla (2000) hicieron una investigación con el propósito de cuantificar la sensibilidad del clima regional a los cambios en la vegetación en la cuenca del Mediterráneo durante el período Clásico Romano. Durante esa época aparentemente se dio un incremento de la precipitación al norte de África, en la Península Ibérica y en la región Armenia, lo cual es consistente con los datos palinológicos, históricos y geográficos. Encontraron que el cambio en el albedo provocado por la deforestación altera significativamente la circulación atmosférica, lo cual explica que el clima actual

sea más seco como resultado de la deforestación de la región del Mediterráneo durante los últimos 2000 años.

Las tendencias de la precipitación pluvial en otras regiones del mundo se ponen de manifiesto en trabajos como el que realizaron Serrano y colaboradores (1999). Estos investigadores estudiaron la precipitación pluvial en cuarenta estaciones climatológicas distribuidas por la Península Ibérica con el propósito de analizar las tendencias. Si bien no hubo tendencias en las series de precipitación total anual, encontraron una tendencia hacia el decremento de la precipitación total del mes de marzo, en veintiuna de las cuarenta estaciones seleccionadas.

Achberger & Chen (2006) realizaron un estudio para determinar la estructura espacial de las tendencias de las precipitaciones extremas en la región escandinava y encontraron que las precipitaciones tienden hacia un incremento en numerosas localidades, aún cuando la magnitud varía dependiendo de la estación del año y de la región. La distribución espacial está ligada a ciertas características fisiográficas como la topografía y la forma de la costa.

En un estudio realizado por Tian y colaboradores (2000) en la cuenca del Amazonas se encontró que la precipitación durante los meses más secos parece ejercer el mayor control sobre la tasa neta anual de captura de carbono. Los cambios en la precipitación, en combinación con los cambios en la temperatura, afectan la captura de carbono debido a su influencia en la humedad del suelo y la disponibilidad de nutrientes.

De acuerdo con Jáuregui (1997) R. Escobar fue el primer meteorólogo que intentó realizar un análisis de las tendencias de la precipitación en México, en el año 1903. Escobar encontró que durante 1878-1901, el período más seco en el centro y norte del país correspondió a los años de 1892-1896.

Lamentablemente los estudios de variabilidad climática y su tendencia sólo son posibles cuando se cuenta con información climatológica confiable generada por la red del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), y a partir de la década de los ochenta

dicha red ha sufrido un deterioro considerable en cuanto al número de estaciones en operación.

3. Marco conceptual

La climatología es el estudio del estado físico de la atmósfera, su estado instantáneo o tiempo atmosférico y su variabilidad estacional o interanual, así como su condición promedio a largo plazo denominada clima y los cambios que experimenta a través del tiempo (Centella *et al.* 1997).

El clima de la Tierra no sólo está asociado con lo que sucede en la atmósfera, sino que es el resultado de la interacción de ésta con otros componentes que conforman el sistema climático, y que son: la superficie sólida de la Tierra (geósfera), el conjunto de todos los seres vivos que la habitan (biósfera), los glaciares, hielos continentales y marinos (criósfera) y los cuerpos de agua (hidrósfera), particularmente los océanos.

3.1 Relación clima-vegetación

Alexander von Humboldt, al inicio del siglo XIX, reconoció que la apariencia y las características principales de los grupos de plantas están relacionadas con el clima, de tal manera que regiones muy distantes tienen una vegetación estructural y funcionalmente similar si sus climas son semejantes.

Posteriormente Alphonse de Candolle, mientras estudiaba la distribución de las principales formaciones de plantas, se dio cuenta de la existencia de zonas latitudinales de vegetación (tropical, templada y fría), y en 1874 propuso una serie de zonas de vegetación asociadas a límites de temperatura.

A partir de entonces se tuvo una base objetiva para mapear las zonas climáticas, y en 1884, Wladimir Köppen utilizó mapas de distribución de la vegetación para generar mapas de clima.

Hoy en día la vegetación no se utiliza para hacer mapas de clima, sin embargo, es uno de los principales medios para reconstruir los climas del pasado. Esto se realiza a

partir de la relación entre la temperatura y la precipitación con el ancho de los anillos de los árboles que los forman, con la abundancia de polen o con la forma de las hojas.

Los modelos climáticos basados en los intercambios de energía, agua y gases entre la superficie de la Tierra y la atmósfera han demostrado el papel preponderante de los ecosistemas terrestres en el sistema del clima. Es hoy ampliamente reconocido que los cambios en la cobertura vegetal, tanto naturales como generados por las actividades humanas, alteran el clima y constituyen un elemento importante de retroalimentación en el sistema climático (Bonan, 2002).

La vegetación juega un papel muy importante en el ciclo hidrológico ya que intercepta el agua de lluvia y regula la velocidad de escurrimiento que favorece la infiltración superficial y profunda. Adicionalmente, algunos elementos climáticos son directamente alterados por la deforestación e influyen en el ciclo hidrológico (Giambelluca *et al.*, 1999; Rowntree, 1988), de manera que la temperatura del aire aumenta y la humedad disminuye, incrementándose la demanda evapotranspirativa de las plantas en algunos casos hasta el 50% (Barradas, 1991). Además, la vegetación en general, y en particular los árboles, son capaces de captar o interceptar agua a partir de la niebla contribuyendo con una cantidad importante dentro del balance hídrico de una región (Barradas, 1983). El cambio climático está íntimamente ligado a la modificación de los ecosistemas terrestres y en particular a la deforestación, debido a que los bosques influyen en los climas locales y regionales (Barradas y Fanjul, 1986; Adem *et al.* 1995; Henderson-Sellers & McGuffie, 1995).

La temperatura del sistema formado por la superficie terrestre y la atmósfera está determinada por el balance entre la radiación solar entrante y la radiación saliente o radiación neta. En largas escalas de tiempo (diez o más años) existe un balance entre la energía entrante y saliente. Esto significa que la temperatura del sistema superficie terrestre-atmósfera permanece aproximadamente constante.

Si este balance es alterado, se produce un forzamiento radiativo y el sistema intenta restablecer el balance cambiando su temperatura. Los procesos que producen este fenómeno son conocidos como factores de forzamiento externo y pueden ser naturales o antropogénicos. Un forzamiento externo natural puede ser, por ejemplo, un

cambio en la energía emitida por el Sol o la influencia de la actividad volcánica sobre la atmósfera; en este tipo de cambios el ser humano no puede ejercer ninguna influencia. Un forzamiento externo antropogénico es, por ejemplo, el reforzamiento del efecto invernadero, ya que sí podemos influir en la composición de la atmósfera o en la naturaleza de la superficie terrestre mediante cambios en el uso del suelo que modifican la cubierta natural (Centella *et al.* 1997).

En la relación superficie terrestre-atmósfera, el calor y la humedad se intercambian cuando la radiación neta de la superficie (Q_N) es regresada a la atmósfera como calor sensible (Q_H), calor latente (Q_L), o bien es almacenada en el suelo (Q_S), de modo que el balance de energía en la superficie es igual a (Bonan, 2002):

$$Q_N = Q_H + Q_L + Q_S$$

A nivel local los intercambios de calor, humedad y gases con la atmósfera, regulan y son regulados por el microclima, la fisiología de las plantas y el flujo de calor del suelo. En particular los estomas se abren para absorber CO_2 durante la fotosíntesis y al hacerlo el agua se difunde hacia afuera de la hoja durante la transpiración. La fisiología de los estomas está regulada por el microclima que provee el dosel vegetal, el agua del suelo y la nutrición de las hojas.

El balance hidrológico a largo plazo es igual a:

$$P = ETP + R + I$$

donde P es la precipitación, ETP la evapotranspiración, R los escurrimientos e I la infiltración profunda.

Cambios a largo plazo en la temperatura, la precipitación, la concentración de bióxido de carbono atmosférico y en las características químicas de la precipitación (lluvia ácida), alteran las condiciones para que se lleven a cabo procesos fisiológicos como la fotosíntesis, la respiración y la reproducción. Es por ello que las actividades humanas como la tala para explotación forestal o la apertura de tierras para la ganadería y la agricultura, la introducción de especies invasoras y el cambio climático global alteran los ecosistemas.

3.2 Cambio de uso del suelo

Durante el período colonial el sector forestal sirvió de soporte a la minería. Posteriormente se continuó cortando madera para hacer leña o carbón, utilizado como combustible en el transporte ferroviario. En tiempos más recientes hemos sido testigos de la tala de los bosques para la construcción, la manufactura de muebles y la fabricación de papel y celulosa. Como consecuencia de todo ello la deforestación ha sido muy intensa en la región centro del país y en las altas cordilleras de Veracruz, Oaxaca e Hidalgo, en lo que concierne a bosques de coníferas (pino, oyamel entre otras) y bosques mixtos (pino-encino), sin mencionar las vastas regiones de bosques tropicales que han sido taladas por completo (Bassols, 1970).

El valor económico y ambiental de los recursos forestales de México ha sido ignorado, o subestimado, en las políticas de desarrollo del campo desde la época de la Colonia. Con la promulgación de la Constitución de 1917, y principalmente después del impulso otorgado a la reforma agraria en 1934, las políticas se orientaron a promover la agricultura y la ganadería como actividades prioritarias, haciendo a un lado las actividades silvícolas.

La primera Ley Forestal se promulgó en 1884 y se orientó a regular las actividades de aprovechamiento comercial, con el objetivo de asegurar un rendimiento a largo plazo. El gobierno otorgó concesiones de áreas forestales extensas a empresas extranjeras, que se concentraron principalmente en el norte del país. Esta época se caracterizó por el uso extensivo y poco regulado del recurso; fue entonces que se explotaron los bosques con arbolado de mayores dimensiones. Después de la Revolución Mexicana, se eliminaron las concesiones a empresas extranjeras, se expropiaron las industrias y las áreas forestales comenzaron a ser transferidas al sector social. El reparto continuó hasta los años setenta.

Como consecuencia de la reforma al artículo 27 Constitucional, se promulgó en 1992 la actual Ley Forestal, en la que se reduce la intervención del Estado y se regulan las actividades del proceso productivo. La evolución de la legislación en materia

forestal muestra cambios significativos: de ser un instrumento de regulación rígida y con amplia intervención del Estado en todo el proceso productivo, pasó a promover una mayor participación de los sectores social y privado (nacional y extranjero), limitando el papel estatal al ámbito normativo y abriendo las puertas a la inversión transnacional.

En los últimos 30 años nuestro país ha experimentado una de las tasas de deforestación más altas de Latinoamérica, asociada a cambios de uso del suelo fundamentalmente relacionados con actividades agropecuarias. Las estimaciones varían de 370 mil hectáreas al año (Ponce-Nava, 1992) hasta un millón quinientas mil hectáreas al año de acuerdo con Toledo, 1989 (citado por Palacio *et al.*, 2002).

En el caso particular del estado de Veracruz las áreas forestales se redujeron de 2,130,000 hectáreas que había en 1960, a 544,744 hectáreas para el año de 1970 (Salgado, 1976), y a 363,360 hectáreas para 1993, según la Comisión Nacional para la Biodiversidad (CONABIO). De acuerdo con el Plan Veracruzano de Desarrollo 2005-2010, el estado de Veracruz perdió el 36% de sus bosques entre 1984 y 2000, y más del 40% del territorio de la entidad padece erosión grave. El Estado ha perdido la mayor parte de su cubierta forestal porque pastizales, potreros y cultivos de caña de azúcar han sustituido a la vegetación original. La cantidad de agua disponible ha disminuido sensiblemente, ya sea por sequías o por escurrimientos superficiales violentos, y su calidad se ha reducido por arrastre del suelo, fertilizantes, insecticidas, desechos industriales y urbanos (Gobierno del Estado de Veracruz, 2005).

Las áreas boscosas –que son habitadas por campesinos, en su mayoría afectados por la pobreza extrema y la marginación– han sido taladas para abrir espacios a las actividades agrícolas y ganaderas, porque las actividades forestales no han sido capaces de satisfacer las necesidades de subsistencia, ni de mejorar las condiciones de vida de los pobladores.

Por otro lado, la apertura comercial iniciada con el ingreso de México al Acuerdo General sobre Aranceles Aduaneros y Comercio (GATT), en 1985, puso en evidencia la precaria competitividad del sector forestal mexicano, cuya crisis se manifiesta en una disminución de la producción nacional y un aumento considerable de las importaciones.

Además los costos de extracción, transformación y comercialización son muy altos comparados con los de otros países. El rendimiento promedio de los bosques mexicanos es 40% menor que el promedio mundial, debido a que la mayor parte de la producción proviene de bosques y selvas naturales, en los que el rendimiento por hectárea es menor que el obtenido en plantaciones (Ponce-Nava, 1992).

Sin embargo, es ampliamente reconocido que México cuenta con un importante potencial de recursos silvícolas, por lo que un sector forestal bien manejado podría suplir la creciente demanda local e incidir significativamente en los mercados internacionales de productos forestales.

El sector agrícola mexicano experimentó un acelerado crecimiento entre 1940 y 1960, que promovió el avance de la frontera agrícola. La actividad creció a una tasa mayor al 4% anual, sobrepasando la tasa de crecimiento poblacional (2.8%); sin embargo, este crecimiento no pudo ser sostenido debido a que las mejores tierras para la agricultura ya habían sido ocupadas.

Entre 1965 y 1980 el crecimiento del sector agrícola cayó a una tasa inferior al 2.5%, que fue menor a la tasa de crecimiento poblacional, y México se convirtió en un importador neto de productos agrícolas (CONAF, 1997).

El sector pecuario creció también aceleradamente, principalmente entre 1970 y 1985; durante este período, el número de cabezas de ganado se incrementó en 15%, lo que representó un aumento de 100% del área dedicada al pastoreo. Al igual que las áreas agrícolas, gran parte fueron creadas a expensas de la eliminación de bosques y selvas, a través de programas oficiales de desmontes. Entre 1983 y 1987, el 57% de los créditos se destinó a la agricultura, el 28% a la ganadería y sólo el 15% a las actividades forestales (CONAF, 1997).

La consecuencia más importante de estas políticas sobre el sector forestal fue que incentivaron la conversión de grandes extensiones de bosques y selvas en áreas de cultivo y pastoreo, donde prevalecen condiciones inapropiadas para estas actividades, haciéndolas no sustentables económica y ambientalmente hablando. Éste es el caso de

áreas agrícolas de montaña, con pendientes mayores de 15%, y terrenos tropicales con suelos no aptos para la agricultura, que pierden su productividad en unos cuantos años.

3.3 Situaciones sinópticas que provocan la precipitación en la zona en estudio.

La región en estudio se localiza en la zona donde dominan los vientos alisios del noreste, que tienen su origen en el borde sur de la celda anticiclónica de Las Azores-Bermudas, y que al atravesar el océano recogen humedad (Vidal, 2005).

Durante el verano, debido al desplazamiento hacia el norte de dicha celda, los vientos alisios soplan con dirección noreste-suroeste en superficie, o de este a oeste en las alturas; asimismo incrementan su contenido de humedad al recorrer grandes distancia sobre las cálidas aguas del océano.

Al encontrarse con las cadenas montañosas se ven obligados a ascender y se enfrían adiabáticamente (sin transferencia de calor) depositando su abundante humedad en forma de lluvia en la ladera de barlovento. La cantidad de lluvia aumenta más aún por la presencia, en el seno de la corriente de los alisios, de las ondas del este que ocasionan abundantes precipitaciones sobre el territorio nacional, alternadas con períodos secos (Vidal, 2005).

Por otro lado, las perturbaciones ciclónicas que se originan en el Mar de las Antillas y el Golfo de México, más frecuentes a fines del verano y comienzos del otoño, introducen abundante humedad en la troposfera media y su influencia se hace notar en el aumento de la cantidad de lluvia, particularmente durante septiembre y octubre (Vidal, 2005).

Durante los meses fríos del año la influencia de los alisios queda relegada a algunas áreas bajas del sur, ya que la faja de los alisios se encuentra desplazada hacia

este punto a consecuencia del desplazamiento de la zona subtropical de alta presión. Ello se traduce en una disminución de la precipitación.

Sin embargo, durante el invierno soplan los “nortes” que se originan por el desplazamiento hacia el sur de masas de aire polar provenientes de Estados Unidos y Canadá, los cuales al pasar sobre las aguas relativamente más calientes del Golfo de México recogen humedad y modifican su temperatura, de modo que al llegar a la región se producen precipitaciones que son más abundantes sobre las laderas orientales de las sierras (Vidal, 2005).

En la región se presentan dos regímenes pluviométricos: el de verano, y el intermedio con lluvias en todas las épocas del año. Por otra parte, también se presenta la canícula o sequía intraestival. Este fenómeno no representa una sequía absoluta sino la disminución del número de días con lluvia en los meses veraniegos, principalmente en julio y agosto. Ello se traduce en una merma de la cantidad media mensual de precipitación que se marca notablemente en las estadísticas climáticas (Vidal, 2005).

4. Metodología

4.1 Planteamiento del problema y justificación del tema de estudio

El tema de estudio se centra principalmente en el análisis de las tendencias de la precipitación pluvial, puesto que existe un cambio sistemático y extensivo del uso del suelo en la región, que se observa principalmente en la disminución de la superficie boscosa debido al uso forestal, agrícola y de ganadería extensiva, lo cual podría estar provocando una disminución significativa de la precipitación pluvial en la zona.

Lara-García (2000) y Cervantes-Pérez y colaboradores (2000) han reportado durante el período que va de 1923 a 1997 una reducción de la precipitación pluvial de 3.13 mm en Xalapa, y de 4.4 mm en Las Vigas, Veracruz, lo cual significaría una reducción de la lluvia del 30% y el 50% respectivamente, hacia el año 2023.

En esta investigación se llevó a cabo el análisis de los cambios en los patrones de la precipitación pluvial en la región de las Grandes Montañas, considerando que el deterioro del bosque y la tala inmoderada a la que ha estado sujeta esta región pueden traer como consecuencia una pérdida de agua, tanto en el balance hidrológico como en el abastecimiento a las zonas urbanas aledañas (Barradas, 1983), así como también cambios en la precipitación a escala local y regional.

Los patrones de lluvia en la región se ven afectados por el llamado efecto sombra o de sombra orográfica. La principal razón es que los vientos húmedos del noreste (alisios) ascienden al contacto con la topografía del continente y el enfriamiento consecuente produce una alta precipitación en la zona montañosa, a barlovento, y una escasa precipitación al otro lado de las montañas, a sotavento (Gómez-Pompa, 1977). Este patrón podría estarse modificando a causa de la deforestación, el incremento del flujo de calor sensible y la elevación de la base de las nubes.

4.1.1 Hipótesis

El deterioro y la tala inmoderada del bosque ocasionan cambios en los patrones de precipitación pluvial en la región debido a que se incrementa el flujo de calor sensible y la base de las nubes se eleva, por lo cual llueve menos a barlovento y más a sotavento.

4.1.2 Objetivo general

Determinar las tendencias de la precipitación pluvial en la región de las Grandes Montañas del estado de Veracruz.

4.1.3 Objetivo particular

Analizar las tendencias de la precipitación pluvial, en un período de por lo menos 25 años, para conocer si se han modificado los patrones de lluvia en la región, mostrando un incremento o un decremento significativo.

4.2 Características de la zona en estudio

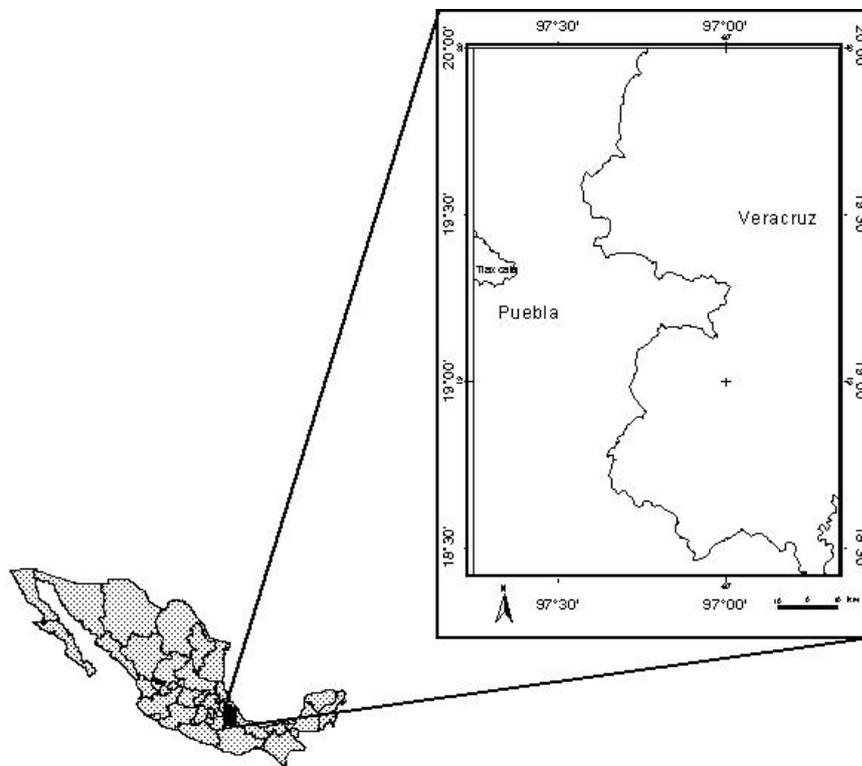
4.2.1 Localización

La zona está localizada entre los paralelos 18° 25' y 20° 00' de latitud norte, y los meridianos 96° 40' y 97° 45' de longitud oeste, comprendiendo la región de las Grandes Montañas del estado de Veracruz y la zona sureste del estado de Puebla (Mapa 1).

La región de las Grandes Montañas del estado de Veracruz es parte del sistema montañoso donde confluyen el Sistema Volcánico Transversal y la Sierra Madre Oriental, colinda con la zona sureste del Estado de Puebla. La regionalización corresponde a Francisco Ramírez Ramos y fue elaborada en los años setenta (Gobierno del Estado de Veracruz, 1999). Una de sus características es la presencia de un gradiente altitudinal muy pronunciado, ya que en una distancia de apenas 100 km de la costa se pueden encontrar altitudes de hasta 5,500 msnm (Barradas *et al.* 2004).

Esta región tiene particular importancia porque es una de las regiones montañosas consideradas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales para el otorgamiento de pagos por servicios ambientales hidrológicos. El 3 de octubre

de 2003 se aprobó un acuerdo en el cual se reconocen los servicios ambientales que prestan los bosques en cuanto a la realización de actividades productivas y de consumo, entre las que se encuentran: la conservación de la biodiversidad; el mantenimiento de los recursos genéticos; la captura de carbono atmosférico para evitar el cambio climático; la atracción de turismo por paisaje y ecoturismo; la protección de las cuencas hidrográficas, así como la reducción de desastres hídricos y la recarga de acuíferos (SEMARNAT, 2003).



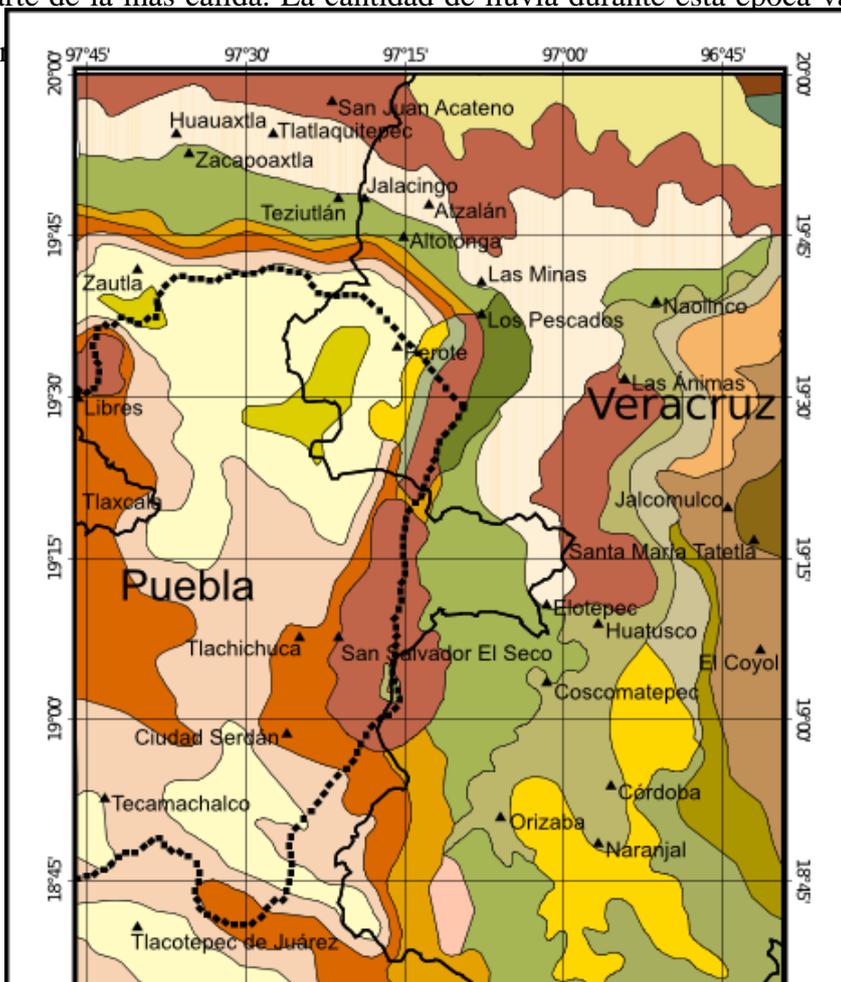
Mapa 1. Localización de la zona en estudio, se indican las coordenadas extremas y los límites estatales.

4.2.2 Clima

La mayor parte de la zona en estudio, localizada a barlovento, en el estado de Veracruz, tiene clima templado húmedo con lluvias en verano (Cw) o templado húmedo con lluvias todo el año (Cf), llega a tener temperaturas promedio mayores a 18° C, no obstante, las temperaturas muy frías, por debajo de 0° C, son frecuentes en las partes más elevadas (Gómez-Pompa, 1977). En la porción sureste del estado de Puebla, a sotavento, el clima es semiseco o seco estepario, con régimen de lluvias de verano e invierno seco (BSw).

El clima de esta región (Mapa 2) es el resultado de la compleja interacción de los sistemas sinópticos predominantes: sistemas tropicales en verano y de latitudes medias en invierno, debido al desplazamiento del anticiclón de Las Azores-Bermudas, de las variantes topográficas y orográficas, de la interacción vegetación-atmósfera y de la cercanía al litoral del Golfo de México (Barradas *et al.*, 2004).

En cuanto a la precipitación pluvial existen dos épocas muy marcadas: la húmeda o de lluvias y la de secas. En la mitad de la época de lluvias existe una disminución temporal de la precipitación en donde se presentan algunos días secos y calientes (canícula). Los patrones de lluvia total anual, a barlovento, varían desde 1000 mm a 1500 mm (Gómez-Pompa, 1977). La época de sequía abarca la estación más fría y parte de la más cálida. La cantidad de lluvia durante esta época varía grandemente y es p



blar.

Mapa 2. Distribución de climas en la zona en estudio, se indican los límites estatales, el parteaguas y las estaciones meteorológicas seleccionadas.
Fuente: CONABIO (1998).

4.2.3 Vegetación

La vegetación es muy variada por razones relacionadas con las variaciones topográficas, orográficas y climáticas, encontrándose desde comunidades de bosque templado y de niebla hasta comunidades semiáridas y áridas (García-García y Montañez, 1991; Barradas, 1983; Gómez-Pompa, 1977).

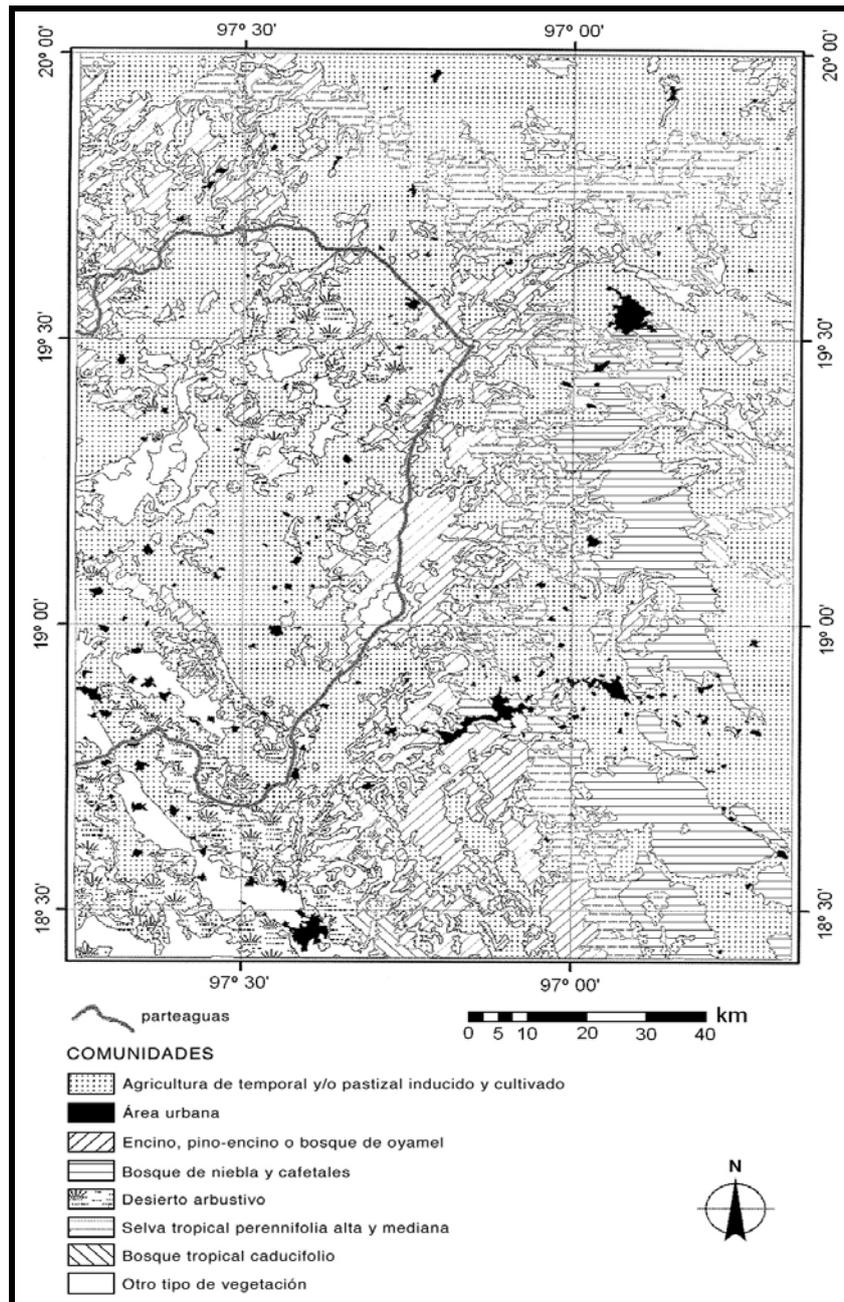
El bosque de pino, dominado por *Pinus hartwegii*, se encuentra en la zona alta y fría, entre los 3000 y 4000 msnm. En las zonas más protegidas de las grandes altitudes, cerca del límite arbolado, se puede encontrar un bosque de *Abies religiosa*. Este tipo de bosque ha sido localizado en el Pico de Orizaba y en el Cofre de Perote. A medida que disminuye la altitud, entre los 2000 y 3000 msnm, se encuentran bosques de pinos mezclados con bosques de encino. Varios bosques de pinos se han desarrollado también en los derrames de lava en los alrededores de la ciudad de Xalapa, siendo las especies dominantes *Pinus teocote* y *Pinus pseudostrobus*.

En los límites entre el estado de Puebla y el de Veracruz, cerca de Perote, que corresponde al contacto entre la zona templada húmeda y la zona templada con vegetación árida, se ha encontrado una pequeña población de *Pinus cembroides* a una altitud de 2500 msnm, que en las zonas más protegidas crece junto con *Quercus*

microphila y *Sophora secundiflora*; también en esa área se encuentran pequeños manchones de bosque dominado por *Juniperus deppeana*, que vive en esta zona transicional. En la región de Tlapacoyan, a 500 msnm, existe un bosque de *Pinus strobus* var. *chiapensis*, en un área muy restringida.

Los bosques caducifolios se encuentran en las áreas templadas y húmedas de las montañas, donde son frecuentes las neblinas, razón por la cual han sido denominados bosques de niebla o bosque mesófilo de montaña. Estos bosques se encuentran entre los 1200 y los 1000 msnm. En la sierra de Chiconquiaco, al sur de Misantla, los bosques caducifolios están dominados principalmente por *Liquidambar macrophylla*, mezclados con varias especies de *Quercus*. En el Cerro de San Cristóbal, cerca de Orizaba, a una altitud de aproximadamente 1200 msnm, se encontró un bosque caducifolio de *Engelhardia mexicana* (Gómez-Pompa, 1977).

Además de la vegetación natural se encuentran en la región áreas de pastizales y zonas de agricultura de temporal, así como cafetales sembrados bajo la sombra de los árboles. El cambio de uso del suelo es producto de las actividades agropecuarias en la zona y ha implicado una explotación forestal intensiva para abrir terrenos a la ganadería extensiva y a los cultivos. La cobertura forestal se ha reducido casi a la mitad, quedan algunas extensiones boscosas muy fragmentadas, que han estado sometidas desde hace mucho tiempo a la extracción de madera. En la zona suroeste predomina una comunidad de desierto arbustivo. El uso actual del suelo en la zona en estudio puede apreciarse en el Mapa 3.



Mapa 3. Vegetación natural de la región en estudio y uso actual del suelo, que comprende zonas de cultivo y áreas urbanas. Fuente: CONABIO (1998).

4.3 Materiales y métodos

4.3.1 Datos de precipitación pluvial

Los datos de precipitación pluvial se extrajeron de la base de datos diaria del programa ERIC II (Extractor Rápido de Información Climatológica), del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2000), los cuales fueron cotejados con otras bases de datos (CLICOM, 2000 y SICLIM, 2002).

Al comienzo de este trabajo se manejó la base mensual del programa ERIC II y se detectó que presenta graves errores en la cuantificación de la precipitación pluvial mensual, por lo cual no recomendamos su utilización como fuente confiable. Por este motivo se realizó la suma de los datos diarios de precipitación, mediante la elaboración de un macro en un programa de computación (Excel, Microsoft, USA) para obtener la base de datos mensual a partir de la base de datos diaria.

Las estaciones meteorológicas (Tabla 1), situadas tanto a barlovento como a sotavento del sistema montañoso, se seleccionaron tomando en cuenta los siguientes criterios:

- 1) que cuenten con registros de 25 años o más, tomando en cuenta que la Organización Meteorológica Mundial (OMM) recomienda utilizar las series más largas disponibles y de preferencia tomar períodos de 30 años para que sean representativas (Mossmann *et al.* 1999).
- 2) que exista continuidad en las series temporales, considerando no más de tres años consecutivos sin datos,
- 3) que el porcentaje de datos faltantes no sea superior al 5%; los datos faltantes fueron reemplazados por los promedios de precipitación pluvial de la serie de tiempo mensual.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas seleccionadas por su representatividad espacial y temporal.

Puebla	Clave Estaciones	Altitud	Latitud	Longitud	Período	Años c/datos	Datos faltantes
	21070 San Antonio Cañada	1600	18° 30'	97° 17'	1955-1979	25	1.30%
	21043 Huauaxtla	1625	19° 55'	97° 36'	1955-1990	35	1.90%
	21083 Tehuacán	1648	18° 29'	97° 24'	1963-1997	34	4.40%
	21074 San Juan Acateno	1656	19° 58'	97° 22'	1957-1989	33	0%
	21111 Zautla	1940	19°42'	97° 40'	1956-1989	34	1.00%
	21093 Tlacotepec de Juárez	1950	18° 41'	97°40'	1944-1985	42	2.40%
	21091 Teziutlán	1990	19° 49'	97° 21'	1961-1997	28	6.80%
	21098 Tlatlauquitepec	2025	19° 55'	97° 27'	1954-1989	36	2.30%
	21103 Zacapoaxtla	2045	19° 53'	97°35'	1945-1987	43	2.10%
	21082 Tecamachalco	2055	18° 53'	97° 43'	1944-1987	44	3.40%
	21026 Ciudad Serdán	2278	18° 59'	97°26'	1946-1986	41	2.00%
	21080 San Salvador El Seco	2425	19° 08'	97° 39'	1966-1997	29	9.50%
	21095 Tlachichuca	2590	19° 08'	97° 25'	1940-1976	36	2.10%

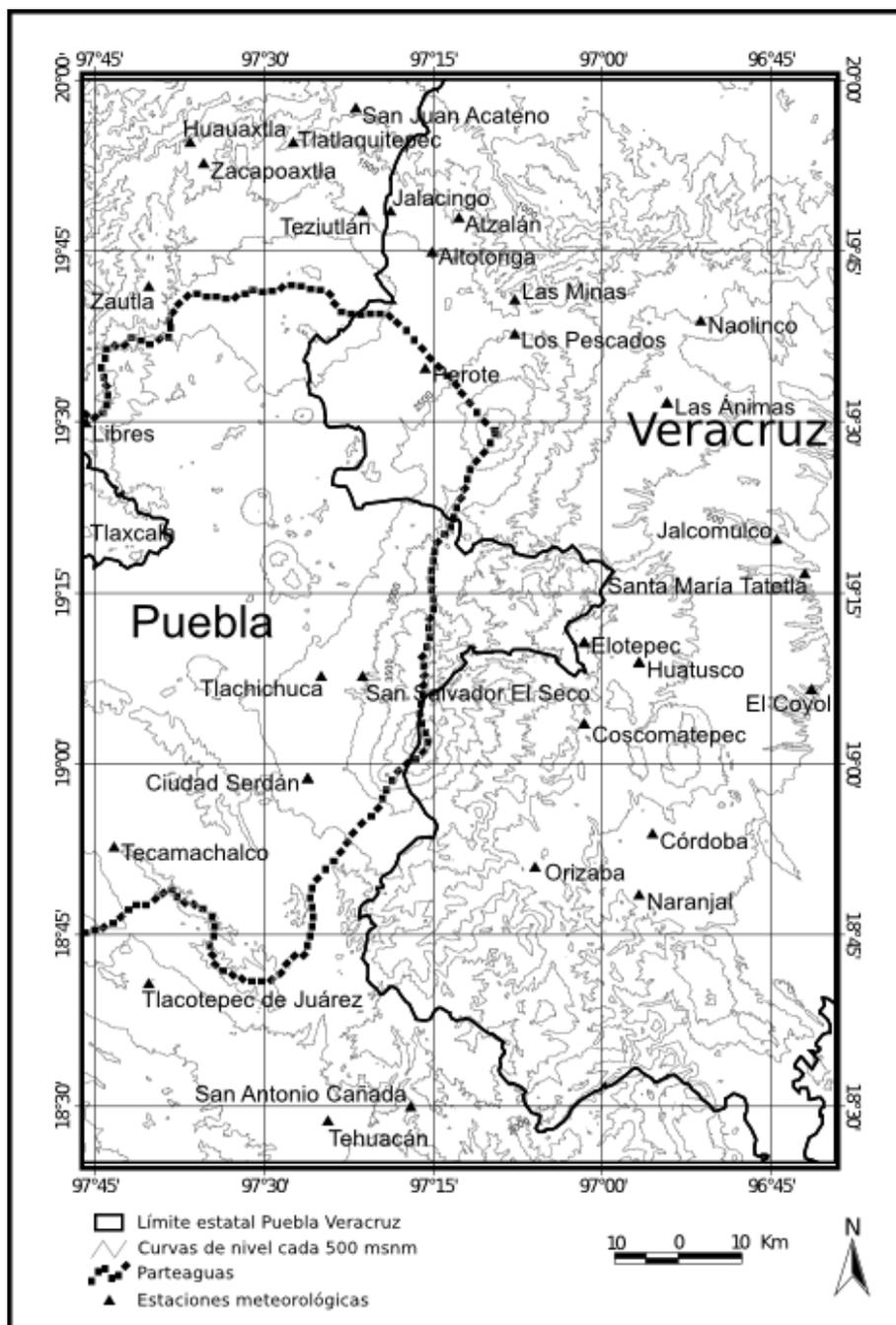
Veracruz							
Clave Estaciones	Altitud	Latitud	Longitud	Período	Años c/datos	Datos faltantes	
30076 Jalcomulco	330	19° 20'	96° 45'	1961-1997	36	0.20%	
30157 Santa María Tatetla	350	19° 17'	96° 43'	1964-1996	32	1.30%	
30047 El Coyol	610	19° 07'	96° 42'	1964-1997	34	1.50%	

30115 Naranjal	697	18° 49'	96° 57'	1964-1997	33	1.00%
30066 Huatusco	1344	19° 09'	96° 57'	1961-1997	36	1.40%
30089 Las Minas	1365	19° 41'	97° 08'	1961-1997	35	0%
30087 Las Ánimas	1399	19° 32'	96° 52'	1961-1991	30	1.90%
30032 Coscomatepec	1588	19° 04'	97° 02'	1961-1997	37	1.60%
30114 Noalincó	1605	19° 39'	96° 52'	1961-1997	34	1.50%
30012 Atzalan	1842	19° 48'	97° 13'	1961-1997	35	1.90%
30052 Elotepec	1860	19° 11'	97° 02'	1964-1996	30	0.55%
30008 Altotonga	1899	19° 45'	97° 15'	1961-1997	35	0.20%
30074 Jalacingo	1944	19° 49'	97° 19'	1961-1997	34	1.20%
30128 Perote	2394	19° 35'	97° 16'	1966-1997	29	2.90%
30097 Los Pescados	2938	19° 38'	97° 08'	1964-1997	34	0.50%

Respecto a la precipitación pluvial se consideró: 1) la precipitación media anual, 2) su distribución a lo largo del año o precipitación estacional, ya que existen dos períodos muy marcados: una época húmeda o "de lluvias" de mayo a octubre, y otra "de secas" de noviembre a abril, y 3) su distribución mensual.

Es importante señalar que en nuestro país, el estudio de las variaciones climáticas tiene el inconveniente de que los registros periódicos de los elementos climáticos con los que se cuenta datan de hace tan sólo algunas décadas, y además a partir de los años ochenta varias estaciones meteorológicas han dejado de operar. La primera tarea para poder realizar la presente investigación fue conjuntar una base de datos completa, o casi completa, para cada una de las estaciones, que obedeciera a los criterios establecidos, ya que para que el periodo de tiempo sea representativo no sólo debe ser largo sino que los datos deben ceñirse a reglas comunes.

A continuación se presenta la localización de las estaciones meteorológicas seleccionadas para este estudio (Mapa 4), las curvas de nivel trazadas cada 500 msnm, así como el parteaguas de la cadena montañosa y los límites estatales.



Mapa 4. Localización de las estaciones meteorológicas seleccionadas para este estudio, se señalan las curvas de nivel cada 500 msnm, así como el parteaguas y los límites estatales. Fuente: CONABIO (1998). Topografía de México (modificado).

4.3.2 Análisis estadístico

Para realizar el análisis estadístico de los datos de precipitación pluvial es necesario considerar que se trata de series de tiempo, es decir, una secuencia de observaciones ordenadas en el tiempo. En el caso que nos ocupa las series de tiempo

están conformadas por datos discretos, ya que se tienen observaciones a intervalos espaciados, generalmente regulares. En todas las gráficas el tiempo es representado en el eje horizontal y la serie de valores de la variable precipitación pluvial en el eje vertical. El tiempo es la variable independiente.

La detección de una tendencia en series de tiempo climatológicas se realiza a partir de una hipótesis nula que establece que no existe tendencia en los datos. Una “tendencia” se define como la dirección subyacente en una serie de tiempo, puede ser positiva o negativa. Las “tendencias” son cambios graduales en el tiempo, de incremento o decremento de la variable estudiada. La existencia de una tendencia nos señala que la serie no contiene observaciones aleatorias sino que los datos tienen una cierta dependencia entre ellos.

En el caso de la precipitación pluvial la variabilidad natural puede llegar a ser considerable, de modo que los datos no están por lo general distribuidos de manera normal, estadísticamente hablando, por lo cual se recomienda utilizar pruebas no paramétricas o de distribución libre porque no asumen que los datos tienen una distribución en particular.

La información es extraída de los propios datos, comparando cada valor con los demás, de modo que los datos se ajustan a la curva que tiene la mejor bondad de ajuste. Los residuos son los valores que resultan de la substracción del modelo ajustado a los datos, de acuerdo con la ecuación: $\text{residuos} = \text{datos} - \text{ajuste}$

Para el análisis de las tendencias de la precipitación pluvial se utilizó la prueba de Mann-Kendall (Mossmann *et al.* 1999) pues tiene un conjunto de ventajas importantes: es una prueba no paramétrica; se puede utilizar para evidenciar la existencia de una tendencia en la serie; la prueba rechaza calificar a una serie con una tendencia estadísticamente significativa a no ser que ésta permanezca hasta la finalización del período; y se puede calcular mediante los programas estadísticos convencionales. En el presente estudio se utilizó el paquete estadístico EViews 3.1, de Quantitative Micro Software, Irvine, California, E.U.A.

La prueba consiste en asociar a la serie de tiempo una función de distribución, establecer el valor del parámetro teórico basado en la función asociada y comparar los valores del parámetro de la prueba y el teórico para conocer si existe una tendencia. Mediante una regresión simple se obtiene el valor de la pendiente de la recta ($y = a + bx$), donde a es el valor de la variable al inicio de las mediciones y b representa la pendiente de la recta que relaciona la precipitación y su evolución temporal, es decir la medida de cuánto ha aumentado o disminuido la precipitación, expresada en mm/mes.

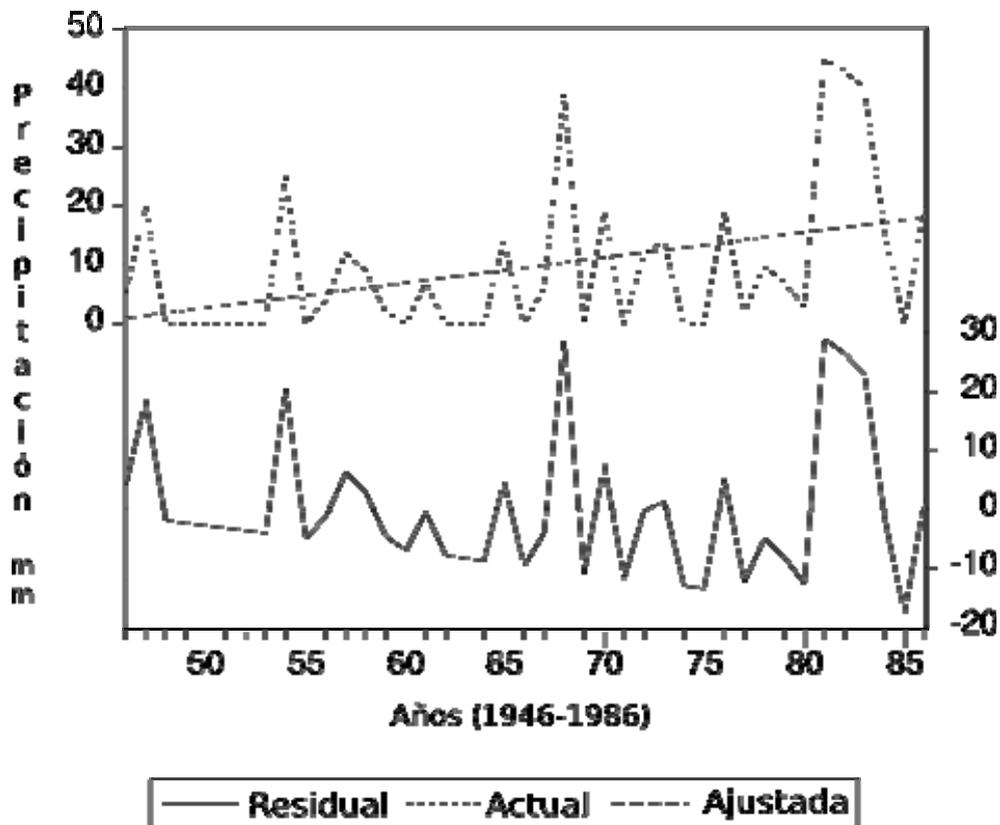
5. Resultados

Para cada una de las estaciones escogidas, de acuerdo con los criterios enunciados en el inciso 4.3.1, se elaboraron gráficas de precipitación media anual, promedio mensual y total mensual, además de una con los datos acumulados mes a mes para la época de lluvias (de mayo a octubre) y otra para la época de secas (de noviembre a abril). El volumen del trabajo realizado –más de 400 gráficas y el análisis de tendencias respectivo– hace imposible incluirlas todas en este documento.

Por este motivo, al realizar la descripción y discusión de los resultados, se tomaron en cuenta únicamente las tablas y gráficas de las estaciones que presentaron tendencias.

No obstante en el Apéndice aparece una recopilación de las gráficas correspondientes a algunas de las estaciones más representativas: de la zona de sotavento, Ciudad Serdán; y de la zona de barlovento, Elotepec.

La parte medular del análisis estadístico está representada en las gráficas correspondientes a las estaciones que presentan tendencias tanto positivas como negativas. Estas gráficas (Figuras 1 a 17) de precipitación pluvial contra tiempo se explican a continuación:



En la parte superior de cada gráfica están representados los datos de precipitación media anual para el período indicado en el eje de las equis, que aparece como la línea punteada actual, asimismo se representa la línea de tendencia ajustada, que es la que tiene la mejor bondad de ajuste con los datos e indica si la tendencia es positiva o negativa.

En la parte inferior aparecen graficados los residuos, que son los valores que resultan de la substracción del modelo ajustado a los datos, de acuerdo con la ecuación: $\text{residuos} = \text{datos} - \text{ajuste}$.

Cada serie de tiempo climatológica incluye una línea de tendencia, así como la validez estadística de la misma. En la Tabla 2 se muestra el nivel de significancia de las tendencias de la precipitación pluvial para las estaciones meteorológicas que las presentaron. En la mayoría de los casos el nivel de significancia fue de 5% o más. Ello significa que la validez estadística de la tendencia es correcta 95 de 100 veces. Sólo en tres casos (Naranjal, Naolinco y Los Pescados) el nivel de significancia fue menor (5.5 a 8%), no obstante se consideró satisfactorio.

El análisis de tendencias se realizó mensual y anualmente, y para las épocas húmeda y seca. En la Tabla 3 se muestran las tendencias de la precipitación pluvial para las series analizadas. Las tendencias están dadas por el signo: (+) positivo, tendencia significativa hacia el incremento de la precipitación pluvial; (-) negativo, tendencia significativa hacia el decremento de la precipitación pluvial. La cantidad representa la pendiente de la regresión simple y es la medida de cuánto ha aumentado o disminuido la precipitación.

Al analizar los resultados se presentan las siguientes situaciones :

- a. Por un lado, algunas de las estaciones localizadas a sotavento, como son Ciudad Serdán (Fig.1) y Tecamachalco (Fig.2), así como Tlacotepec de Juárez (Fig. 3) ubicada a barlovento muy cerca del parteaguas, presentan tendencias significativas hacia el incremento de la precipitación pluvial en el mes de febrero; las precipitaciones pluviales han aumentado en Ciudad Serdán 0.4 mm/año, y en Tecamachalco y Tlacotepec 0.3 mm/año. Tlacotepec de Juárez presentó también tendencia positiva en el mes de marzo.
 - b. Asimismo a barlovento, en el mes de febrero, El Coyol (Fig. 4), Elotepec (Fig. 5), Naranjal (Fig. 6) y Naolinco (Fig. 7) presentan tendencias significativas hacia la disminución de la precipitación pluvial; las precipitaciones han disminuido: 0.6 mm/año en El Coyol y Elotepec, 1 mm/año en Naranjal y 0.8 mm/año en Naolinco.
 - c. No obstante, en la estación de Elotepec hay una clara tendencia hacia el incremento de la precipitación pluvial durante los meses de verano (junio, julio y agosto) y para la época de lluvias en su conjunto (Figuras 8, 9, 10 y 11); con valores de 6 mm/año y 29 mm/año, respectivamente.
- Por otra parte, en la zona norte de la región de estudio, del lado de barlovento:
- d. Altotonga (Fig. 12) y Jalacingo (Fig. 13) presentan tendencias hacia el incremento de la precipitación pluvial en el mes de febrero, con valores de 1.1 mm/año y 0.8 mm/año, respectivamente.
 - e. Las Ánimas (Fig. 14) y Naolinco (Fig. 15) también presentan tendencias hacia el incremento de la precipitación pluvial al final de la época seca (abril y mayo); en Las Ánimas 1.6 mm/año en abril y 3.2 mm/año en mayo; en Naolinco 2.1 mm/año en abril y 2 mm/año en mayo.
 - f. Asimismo Los Pescados (Fig. 16) y Perote (Fig. 17) presentan tendencias hacia el incremento de la precipitación pluvial en la época seca en su conjunto; con valores de 1.4 mm/año y 2.4 mm al año respectivamente.

Algunas de estas estaciones son las que están a mayor altitud y más cerca del parteaguas , por lo cual se incrementa el patrón de la lluvia a consecuencia de la barrera montañosa y de la elevación de la base de las nubes. También allí la niebla se ha

modificado, aumentando en las partes altas de las montañas en poblaciones como Altotonga y Atzalan (Barradas, 2005).

La mayoría de las estaciones presentaron tendencias significativas durante el mes de febrero, en noviembre o diciembre, o durante la época de secas en su conjunto. En términos generales las estaciones no presentaron tendencias durante la mayor parte del año y ninguna presentó tendencias anuales. Asimismo durante los meses de enero y septiembre ninguna estación presentó tendencias.

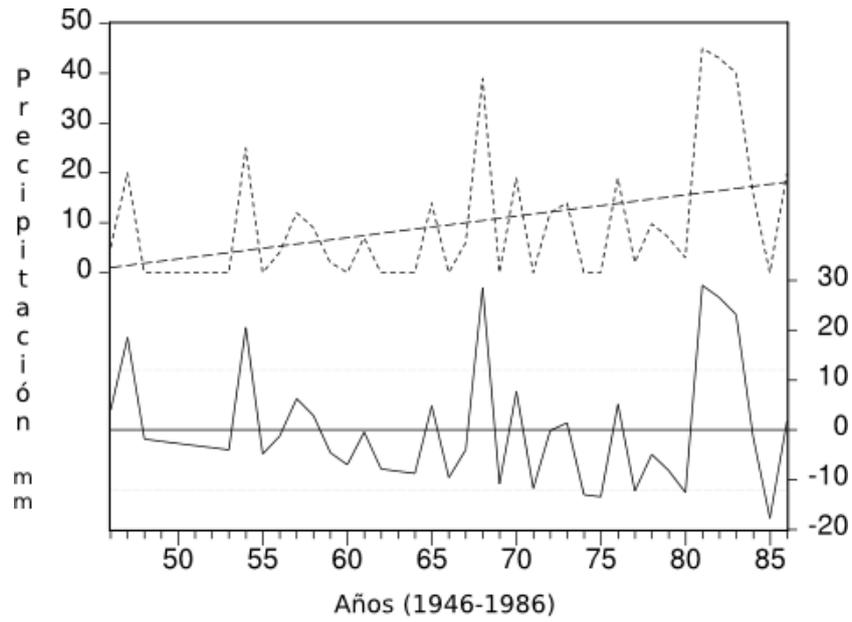


Fig. 1 Tendencia de la precipitación pluvial en febrero, Cd. Serdán.

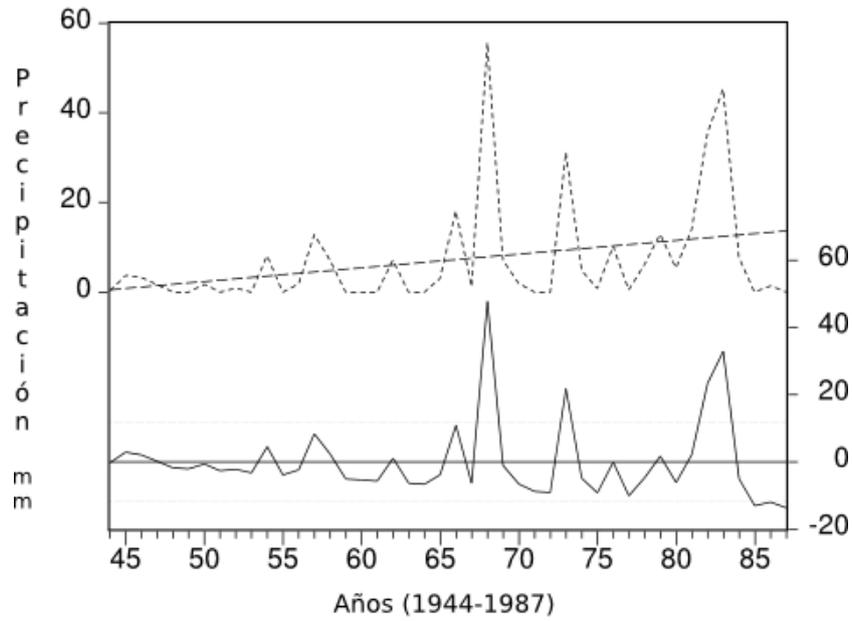


Fig. 2 Tendencia de la precipitación pluvial en febrero, Tecamachalco.

— Residual - - - - Actual - · - · - Ajustada

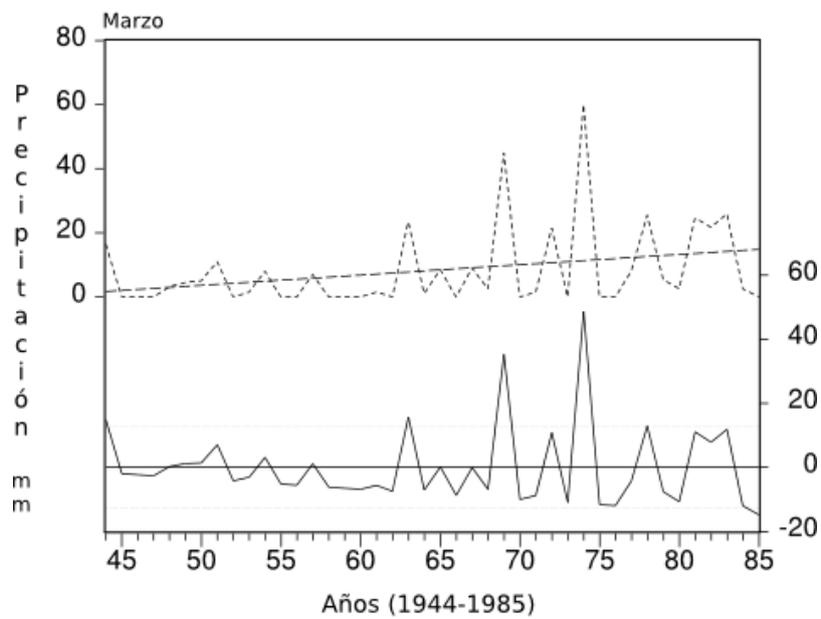
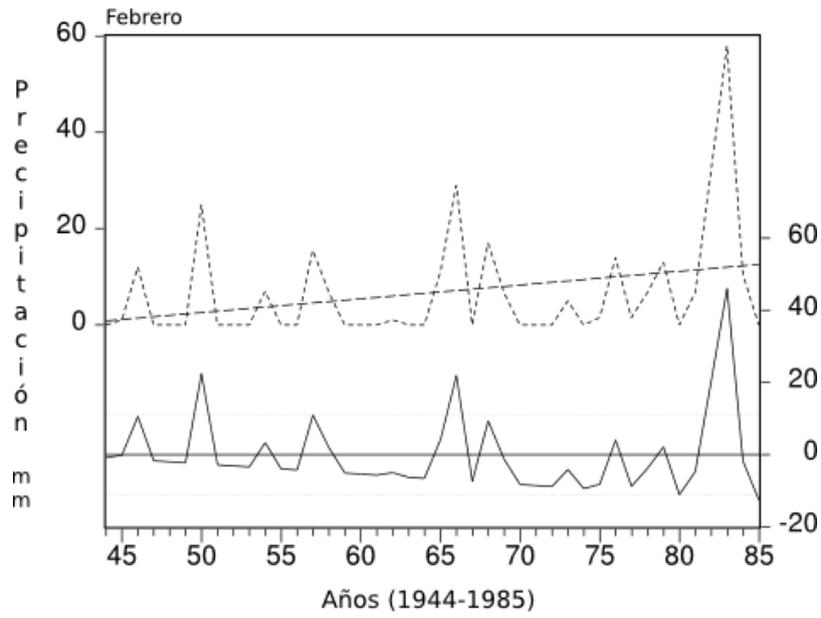


Fig. 3 Tendencias de la precipitación pluvial en febrero y marzo, Tlacotepec de Juárez

— Residual - - - Actual ····· Ajustada

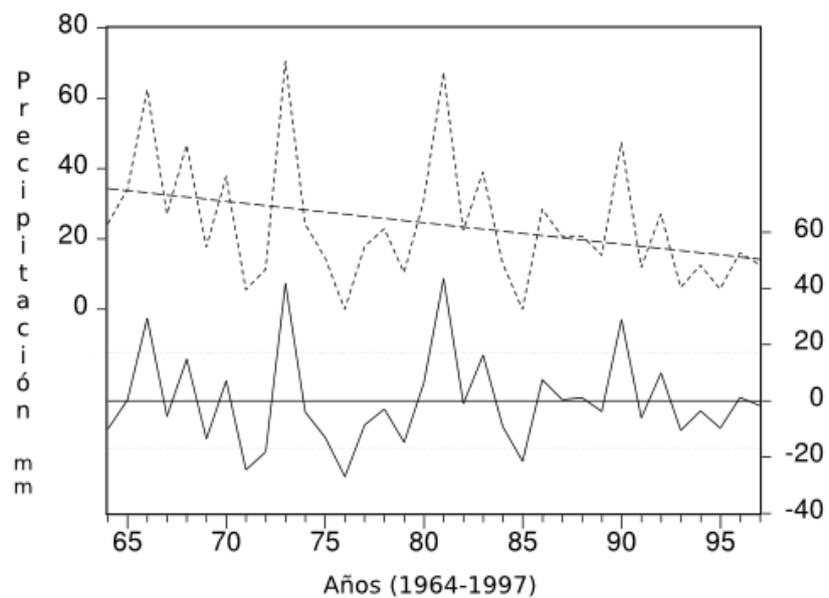


Fig. 4 Tendencia de la precipitación pluvial en febrero, El Coyol.

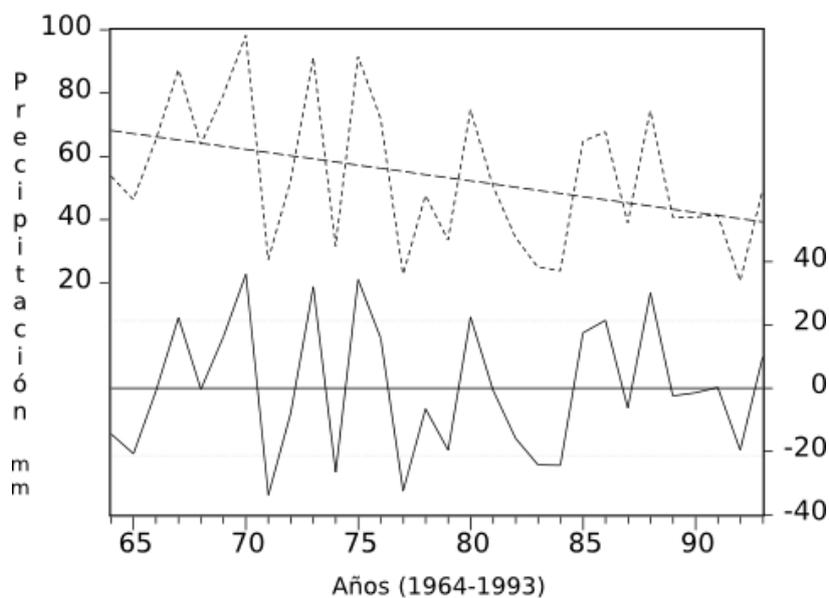


Fig. 5 Tendencia de la precipitación pluvial en febrero, Elotepec.

— Residual - - - - Actual - · - · - Ajustada

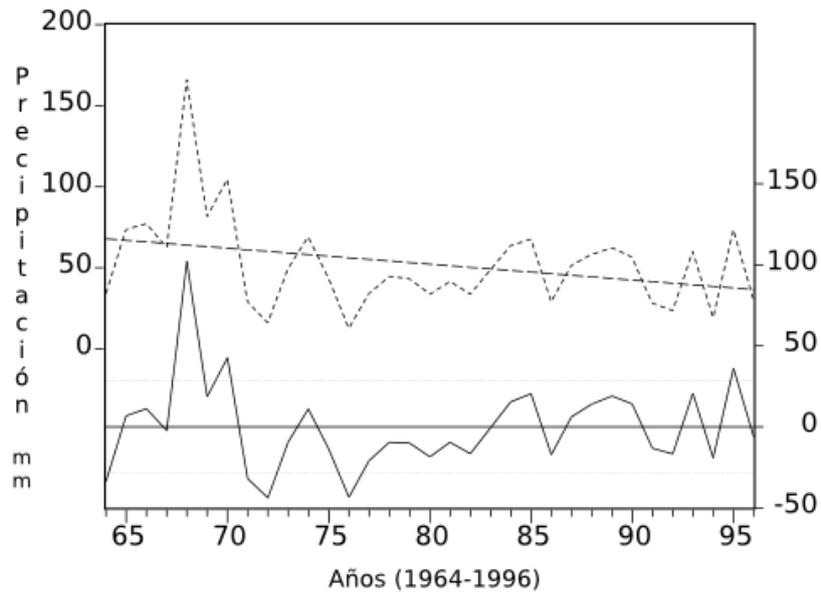


Fig. 6 Tendencia de la precipitación pluvial en febrero, Naranjal.

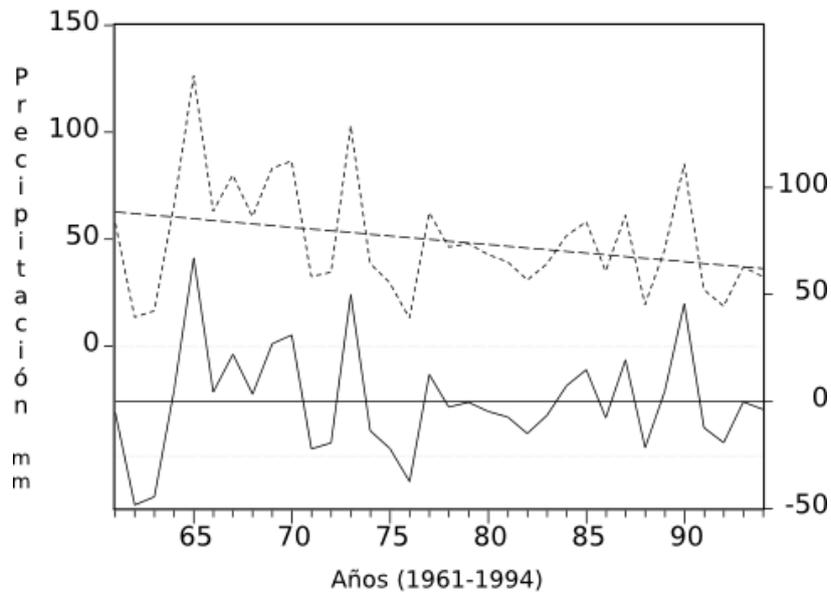


Fig. 7 Tendencia de la precipitación pluvial en febrero, Naolinco.

— Residual - - - Actual ····· Ajustada

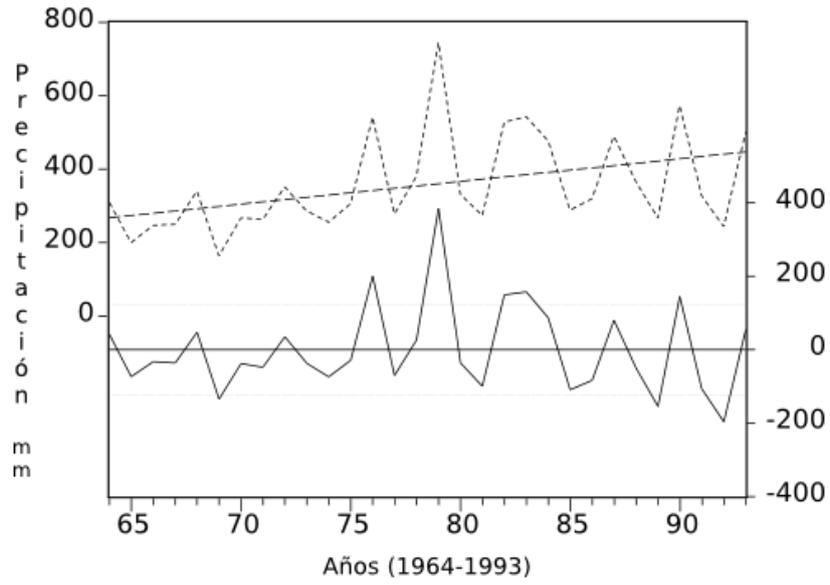


Fig. 8 Tendencia de la precipitación pluvial en junio, Elotepec.

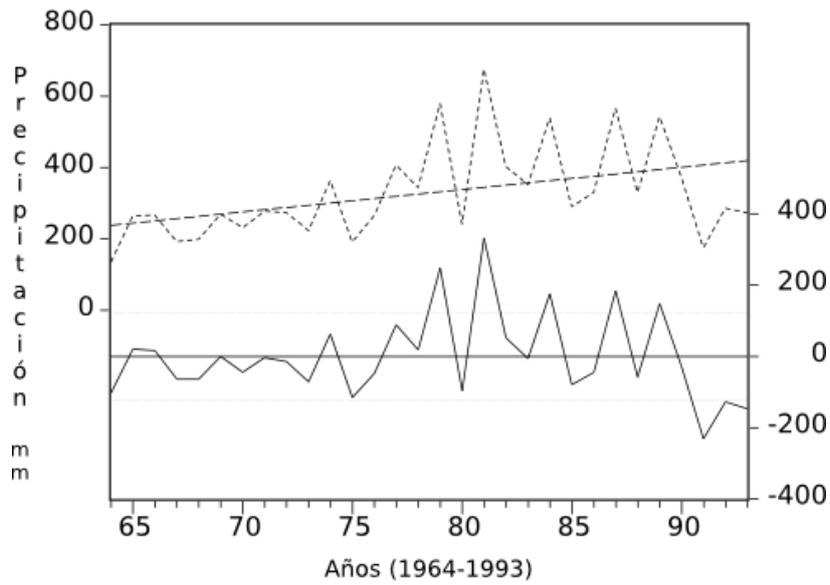


Fig. 9 Tendencia de la precipitación pluvial en julio, Elotepec.

— Residual - - - - Actual - · - · - Ajustada

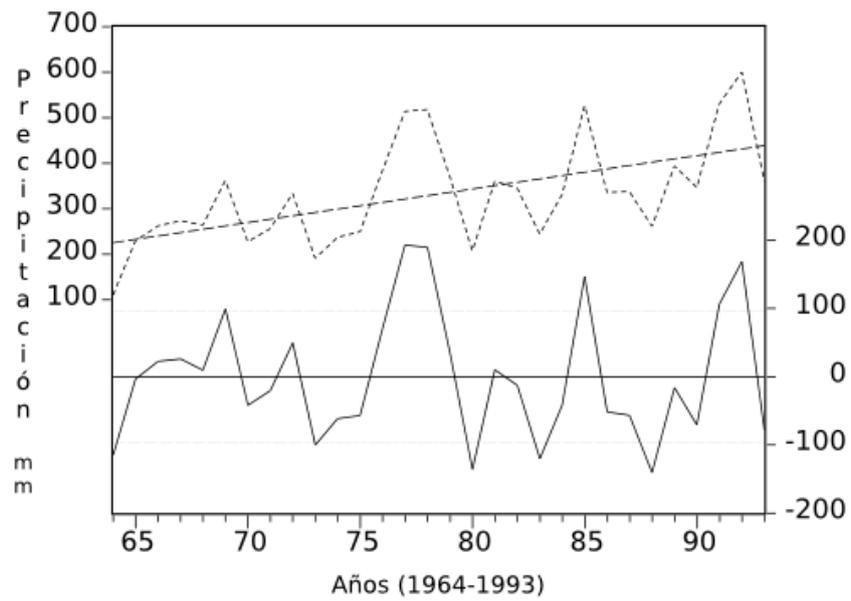


Fig. 10 Tendencia de la precipitación pluvial en agosto, Elotepec.

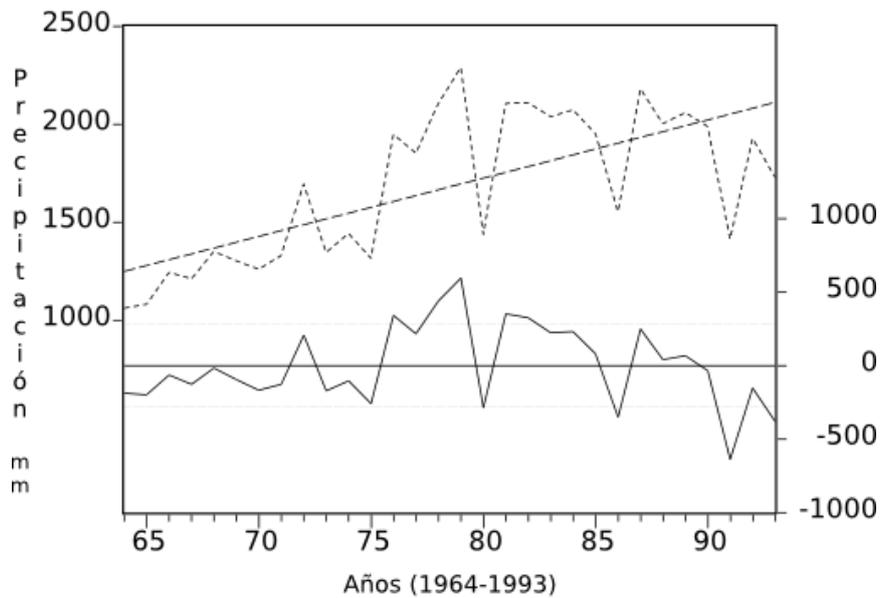


Fig. 11 Tendencia de la precipitación pluvial en época de lluvias, Elotepec.

— Residual - - - Actual ····· Ajustada

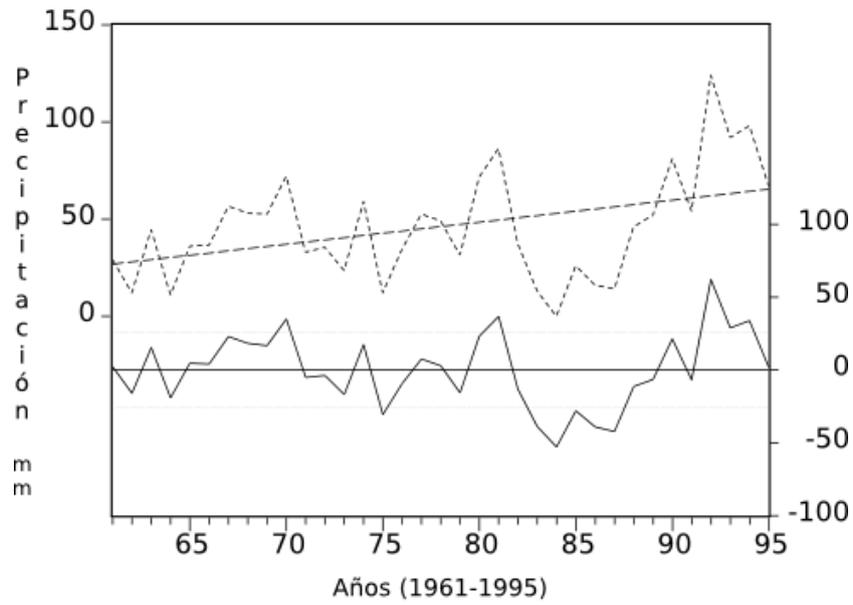


Fig. 12 Tendencia de la precipitación pluvial en febrero, Altotonga.

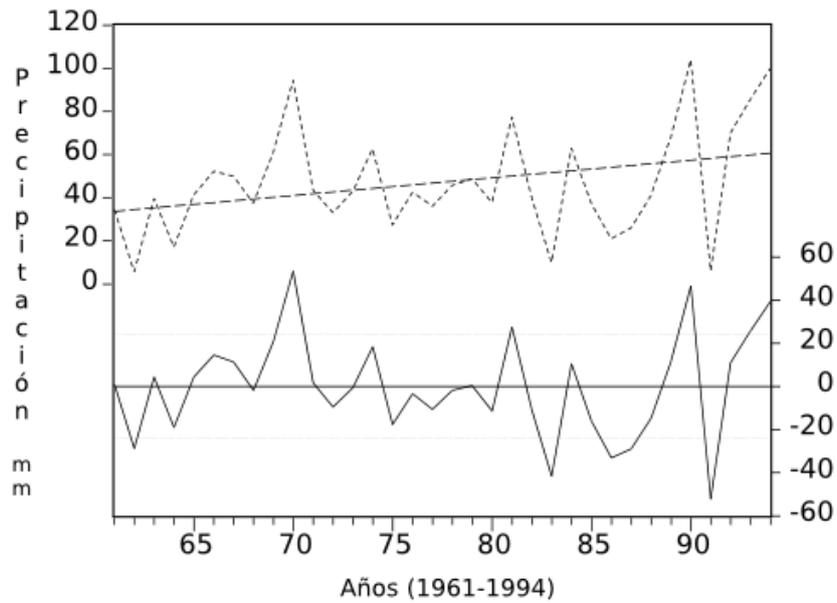


Fig. 13 Tendencia de la precipitación pluvial en febrero, Jalacingo.

— Residual - - - - Actual ····· Ajustada

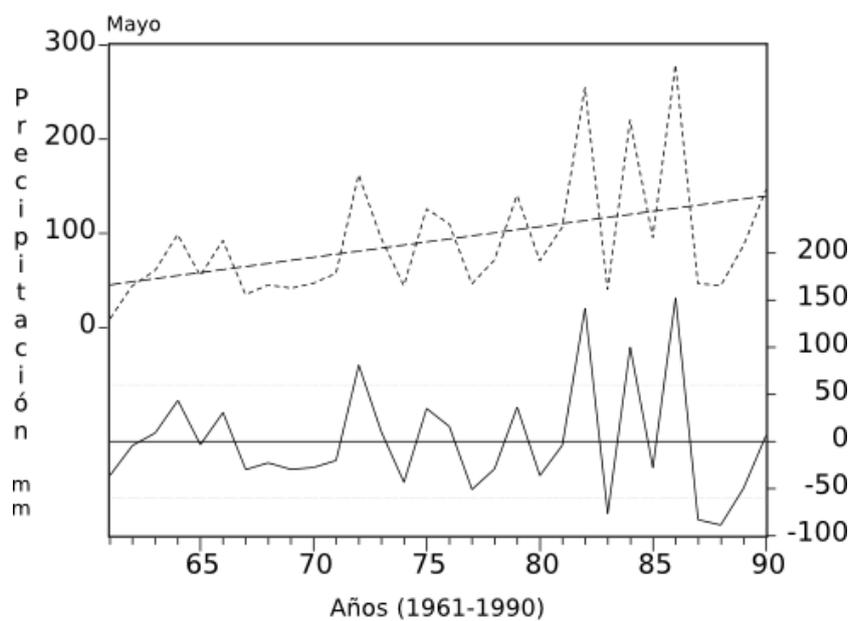
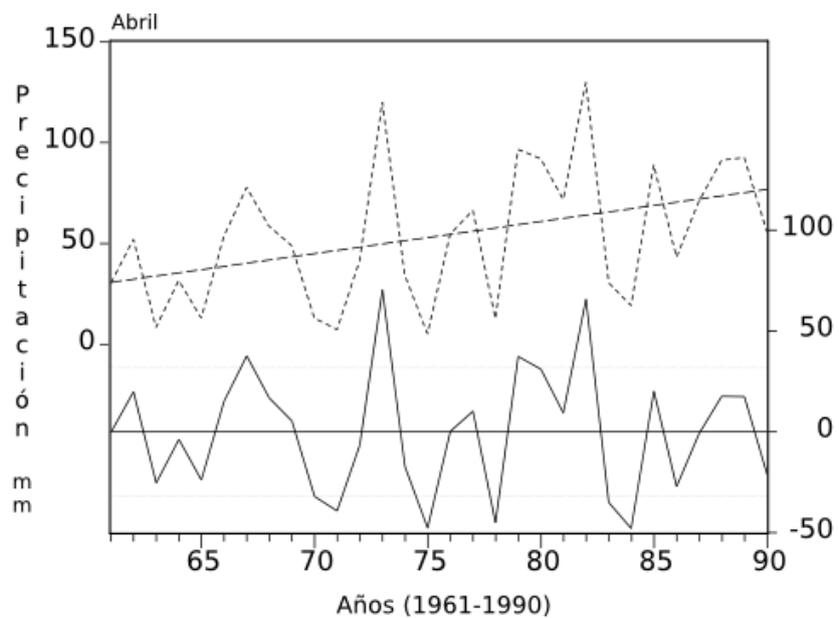


Fig. 14 Tendencias de la precipitación pluvial en abril y mayo, Las Ánimas

— Residual - - - Actual - · - Ajustada

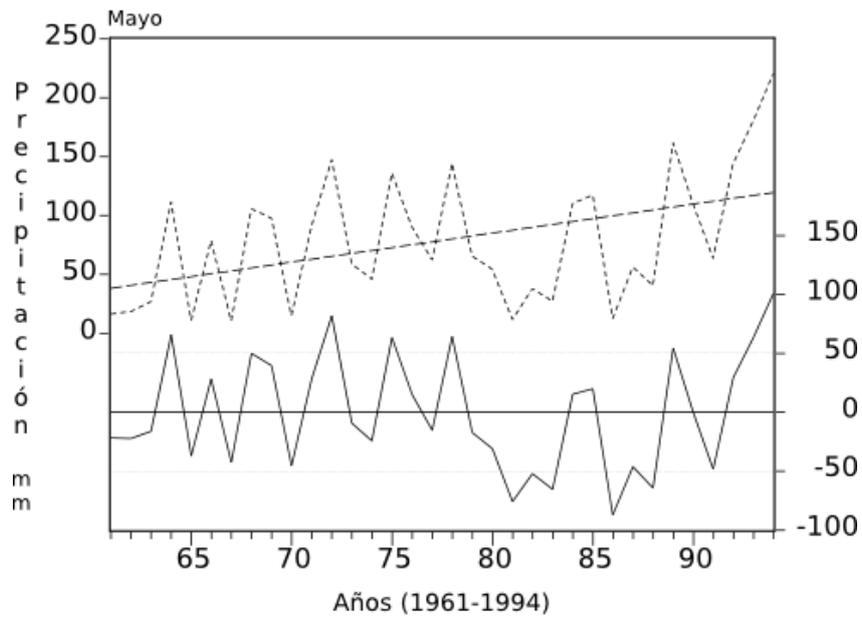
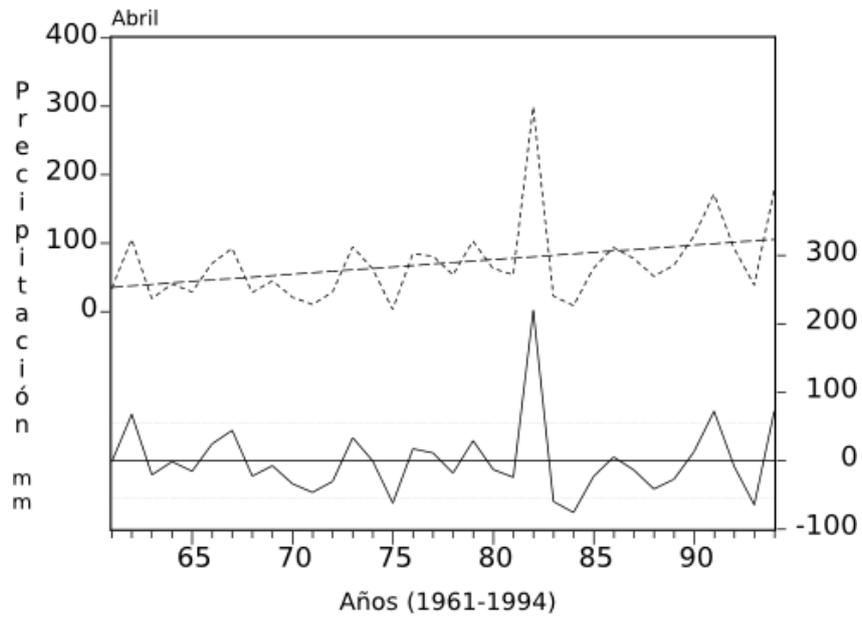


Fig. 15 Tendencias de la precipitación pluvial en abril y mayo, Naolinco

— Residual - - - Actual - · - Ajustada

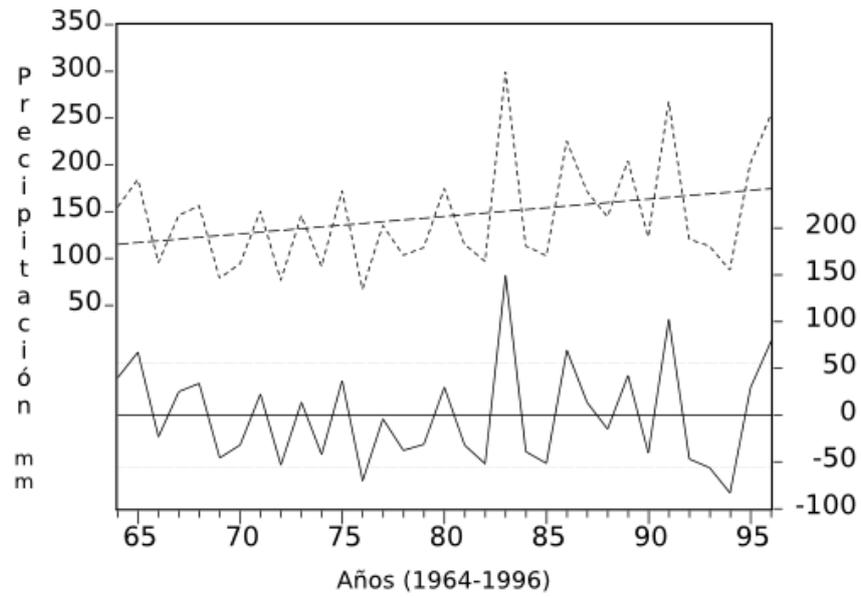


Fig. 16 Tendencia de la precipitación pluvial en época de secas, Los Pescados.

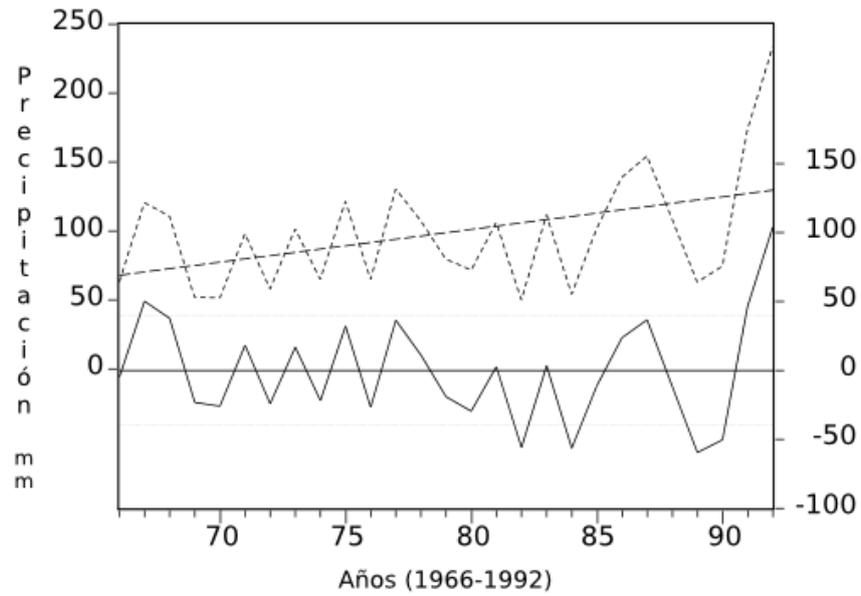


Fig. 17 Tendencia de la precipitación pluvial en época de secas, Perote.

— Residual - - - - Actual Ajustada

6. Discusión

En el presente estudio se ha observado un corrimiento aparente de los patrones de lluvia en la época de secas y particularmente en el mes de febrero. Las tendencias de la precipitación pluvial registradas en la zona parecen indicar que, efectivamente, hay un aumento en el flujo de calor sensible que influye en el levantamiento de la base de las nubes, lo cual hace que llueva menos a barlovento y más a sotavento de la cadena montañosa. Ello implicaría que el levantamiento de la capa de mezcla es suficiente como para que la humedad que antes se depositaba a barlovento pase ahora a sotavento.

En la Fig. 18 se muestran sinópticamente las tendencias de la precipitación pluvial en las estaciones seleccionadas: a barlovento son negativas en algunos meses de la época seca, mientras que en la misma época son positivas a sotavento, de tal manera que la hipótesis de trabajo propuesta, en la que se suponía que llueve menos a barlovento y más a sotavento, resulta correcta al menos para el mes de febrero y en algunos casos para los meses de noviembre o diciembre, o para la época seca en general. Las flechas indican el incremento o decremento de la precipitación pluvial en las estaciones que presentaron tendencias en los meses o épocas señalados.

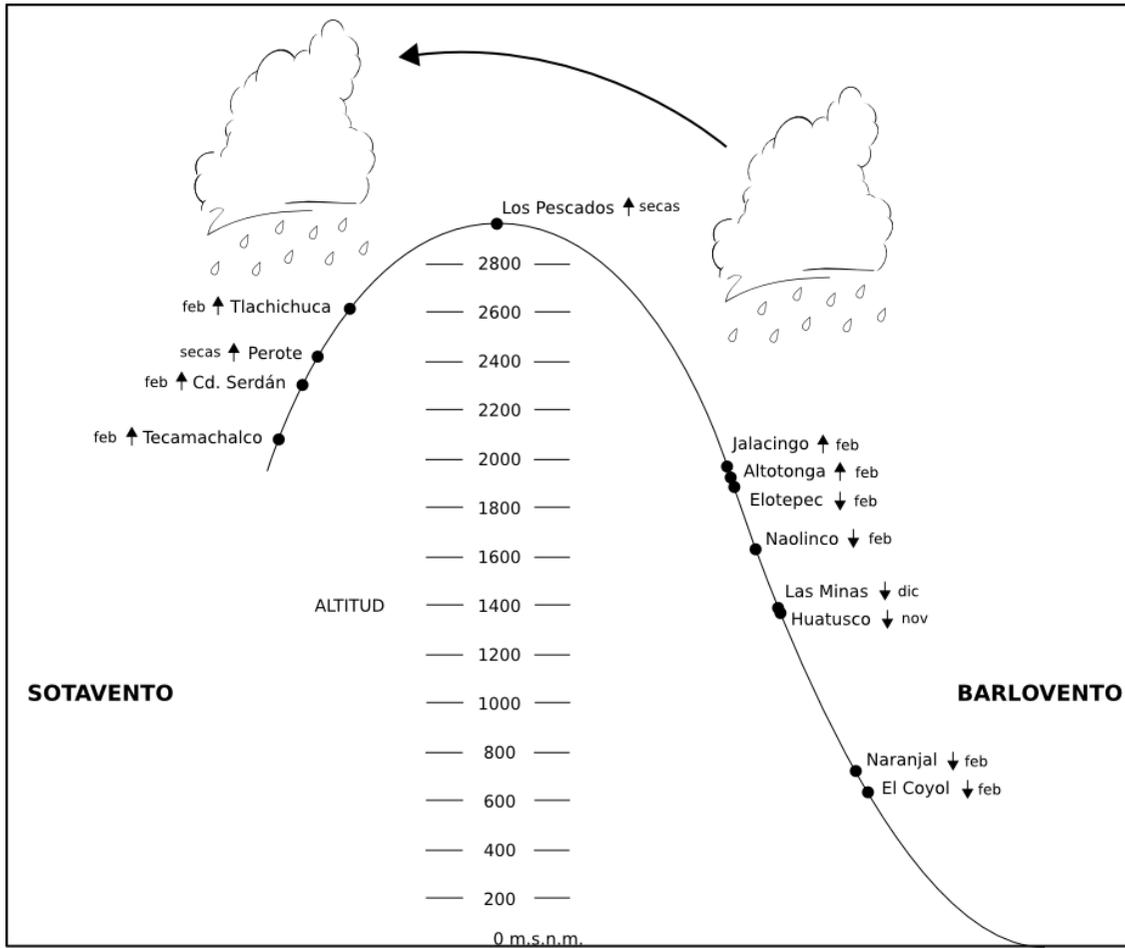


Fig 18. Tendencias de la precipitación pluvial hacia el decremento ↓ o el incremento ↑ durante la época de secas y los meses de noviembre, diciembre y febrero. Se observa cómo la precipitación está disminuyendo del lado de barlovento y se ha incrementado del lado de sotavento.

Esta variabilidad espacial y temporal de la precipitación muy posiblemente se deriva de la relación que guardan los recursos hídricos, la población y sus actividades económicas, así como el cambio de uso del suelo y las implicaciones de la deforestación y el cambio climático.

6.1 Recursos hídricos, población y actividades económicas

En términos generales, como señala Michel Jerraud, secretario general de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), “el 90 por ciento de los desastres naturales tienen que ver con el tiempo, el clima y el agua”. Los fenómenos extremos, como las sequías, los huracanes, las lluvias de excepcional intensidad, tienen enormes consecuencias sobre la población y sus actividades económicas y se han vuelto cada vez más frecuentes.

En 2005 se registraron sequías prolongadas en diversas partes del Gran Cuerno de África, partes de Europa y Asia, así como en Australia y Brasil. Por el contrario, fuertes lluvias en otras zonas del planeta causaron inundaciones devastadoras, el Estado de Veracruz no fue la excepción. De acuerdo con Rodríguez (2006) durante noviembre del 2005 las lluvias afectaron en Veracruz al menos a 1,280,000 personas en 170 de los 212 municipios de la entidad. En el caso de los huracanes se produjo un número récord de estos fenómenos a nivel mundial (Jarraud, 2006).

El agua, como recurso natural indispensable para la vida, adquiere cada vez mayor relevancia, en algunos lugares por la escasez del vital líquido, debido a que la intensa deforestación y la fragmentación de bosques

evita la recarga de los mantos acuíferos y contribuye a la pérdida del suelo; en otros, debido a las inundaciones y a las pérdidas materiales y humanas que conllevan (Barradas, 2005; De Lima *et al.* 2006; Jarraud, 2006).

Entre 1992 y 2001 los desastres naturales causaron más de 622 mil víctimas y afectaron a más de 2 mil millones de personas. Las pérdidas económicas producidas por los desastres hidrometeorológicos se calcularon en 446 millones de dólares, lo que representa cerca del 65 % del total de las pérdidas debidas al conjunto de desastres naturales producidos en ese periodo (Jarraud, 2006). Los más afectados son los países en vías de desarrollo, donde los desastres naturales son causa del aumento de la vulnerabilidad de esas naciones y del retraso en el desarrollo económico.

La principal causa del deterioro y agotamiento de los recursos forestales en la zona en estudio ha sido su explotación intensiva con miras a maximizar las ganancias en el corto plazo, desperdiciando una buena parte de los recursos maderables del bosque y desaprovechando todos los no maderables. Al talar los árboles no sólo se está destruyendo la vegetación sino eliminando el hábitat de un gran número de especies, cuyo valor ecológico y eventualmente médico o comercial desconocemos, contribuyendo así a la pérdida de la biodiversidad.

La explotación intensiva ha sido el resultado directo de la aplicación del modelo de desarrollo capitalista, que fue implantado a partir de la Colonia, haciendo a un lado el modelo tradicional de nuestros pueblos, cuya

organización social y productiva se había conformado a las estructuras ecológicas de su medio ambiente (Leff, 1986).

El subdesarrollo de nuestro país es en parte resultado de los múltiples procesos de degradación ambiental que ha sufrido, a través de su dependencia tecnológica del exterior y de la sujeción a las condiciones históricas impuestas por la concentración y la centralización del poder económico y político, tanto a nivel nacional como internacional. Y no sólo implica la destrucción de los recursos y la degradación del potencial productivo, sino también de las fuerzas sociales de producción (Leff, *op.cit.*).

Al destruirse el capital natural se destruye también el tejido social, debido a que la incapacidad de las áreas rurales para generar empleos productivos para sus habitantes, promueve grandes corrientes migratorias de la población del campo hacia las ciudades o al extranjero.

“Las diferencias de nivel de desarrollo entre países centrales y periféricos es el resultado de la transferencia de la riqueza generada, a través de la explotación de los recursos y la fuerza de trabajo de los países dominados, hacia los países dominantes”, es por ello que el subdesarrollo implica “la pérdida neta del potencial productivo de una nación” (Leff, *op.cit.*), a través de un proceso de explotación que impide tanto la recuperación de las fuerzas sociales de producción como la regeneración de sus recursos.

En la medida en que los bosques y las selvas fueran aprovechados sustentablemente, ofreciendo opciones productivas a sus pobladores, disminuirían las enormes presiones de conversión de estos recursos a usos agropecuarios, en su mayoría marginales, y se generarían los incentivos necesarios para que se conserven. Es necesario incorporar el costo ecológico al costo económico, de lo contrario la pérdida de nuestro potencial productivo será irreversible, por lo pronto está teniendo consecuencias sociales y ambientales enormes.

6.2 Cambio de uso del suelo

El concepto de disponibilidad ilimitada de bosques derivó en la tala inmoderada de los mismos, con el propósito de ampliar la frontera agropecuaria y/o urbana, sin tomar en cuenta que la tala no sólo afecta al recurso bosque, sino también al suelo (debido a la erosión), al aire (debido a que deja de capturarse carbono) y al agua (debido a que al no haber vegetación deja de infiltrarse en el suelo), con las consiguientes consecuencias ecológicas, económicas y sociales, y probablemente también climatológicas debido a cambios en la temperatura, la humedad, la precipitación, etc. (De Lima *et al.* 2006).

El ritmo de la deforestación ha sido tan intenso que se considera como el principal problema del sector forestal. El balance entre el deterioro ambiental y el aprovechamiento económico de los recursos forestales es altamente negativo. En la región en estudio no sólo se ha perdido la mitad de los bosques sino que los que quedan son bosques fragmentados y

perturbados, enfermos, no de plagas sino por la presencia humana y la tala ilegal de madera, a pesar de que desde 1932 el Cofre de Perote es una Área Nacional Protegida (Barradas, 2005).

El modelo capitalista de desarrollo ha ocasionado cambios cuyas consecuencias no fueron previstas cuando se decidió explotar el bosque para que fuera rentable en el corto plazo. No sólo se está acabando con un preciado recurso, sino que este hecho está disparando toda una serie de reacciones en cadena dentro del sistema natural, una de las cuales podría ser un cambio climático a nivel local porque la deforestación influye en la distribución espacial y temporal de la precipitación.

La tala de las especies maderables existentes en la región se ha incrementado considerablemente en los últimos años, aunque en el estado de Veracruz el principal rubro de producción del sector primario es la cría de ganado bovino y no la industria silvícola. De hecho Veracruz es el primer productor de ganado en el país (en número de cabezas de ganado producidas anualmente), con un 45% de su superficie convertida en potreros (Toledo, 1990) gracias a la transformación de las masas forestales en áreas agrícolas y ganaderas. Aunado a esto, se utilizan las mejores tierras para la agricultura y la ganadería comercial, con lo cual la agricultura de subsistencia ha sido desplazada hacia las laderas de las montañas, donde los suelos no son apropiados y se pierden por erosión al talar la vegetación.

Otro de los problemas que trae aparejado el convertir los bosques y las selvas en agrosistemas es que éstos últimos, al soportar menos

vegetación, dejan de capturar grandes cantidades de bióxido de carbono que se incorporan a la atmósfera. Se ha calculado que aproximadamente el 33% del carbono que se ha acumulado en la atmósfera en los últimos 150 años, proviene de la deforestación y del cambio de uso del suelo (World Resources, 2000), a pesar de que la quema de combustibles fósiles es la que más ha contribuido a la acumulación de gases de invernadero con la consecuente amenaza para el clima mundial.

Los bosques desempeñan una función invaluable como sumideros de carbono porque son capaces de atrapar y almacenar el bióxido de carbono que se libera a la atmósfera. Cada vez que un bosque produce dos metros cúbicos de madera, atrapa alrededor de una tonelada de carbono del aire. Por el contrario, al destruirse los bosques se liberan al año alrededor de 6,000 millones de toneladas de bióxido de carbono (FAO, 2005).

Gracias a las flexibles disposiciones del Protocolo de Kyoto, los países industrializados pueden compensar una cierta cantidad de las emisiones que se han comprometido a reducir, invirtiendo en proyectos que contribuyan a la fijación del carbono en los países en desarrollo. El país recibe por la cantidad de carbono que se fije reducciones certificadas de sus emisiones, susceptibles de transacción.

Al convertirse de esta manera en mercancía, el carbono adquiere un valor en el mercado del carbono, y proporciona a la población rural la oportunidad de obtener ingresos a través de proyectos de conservación de bosques (FAO, 2005).

6.3 Deforestación y cambio climático

La orografía, en sí misma, no genera nubosidad pero representa un obstáculo para el movimiento de las masas de aire. Cuando una barrera natural obliga al aire a ascender y enfriarse, frecuentemente el resultado es la formación de nubosidad de carácter orográfico en la zona donde incide el flujo aéreo, a barlovento de la cadena montañosa.

Cuando los cálidos vientos alisios del noreste entran al continente cargados de humedad ascienden al contacto con el macizo montañoso, y el nivel de condensación se establece en la zona boscosa depositando allí su humedad.

Al cambiar la cobertura arbórea por pastizales, cultivos y zonas urbanas, la redistribución de la energía solar se ve afectada, generándose un aumento de la temperatura del aire (Barradas, 2005) y de la radiación que refleja la superficie (albedo).

Al incrementarse la temperatura del aire se produce el levantamiento de la base de las nubes (o del nivel de condensación por ascenso), y las precipitaciones y las neblinas se recorren conforme se asciende por la pendiente. Por ejemplo, antes eran frecuentes las neblinas a 1400 msnm, mientras que ahora se han elevado a los 1700 o 2000 msnm (Barradas, 2005).

Los factores que regulan el nivel de condensación por ascenso son: por un lado el flujo de calor sensible que lo incrementa, y por otro la subsidencia que lo disminuye (Carson, 1973, citado por Barradas, 2004).

La deforestación de los bosques templados y de niebla podría tener influencia en el flujo de calor sensible, ya que una disminución en el flujo de calor latente implicaría un aumento en el sensible. El flujo de calor sensible es un mecanismo atmosférico de escala local o regional que varía de acuerdo con el balance de energía del sitio y depende en gran medida del uso del suelo (Barradas, 2004).

Si debido al calentamiento global el anticiclón de Las Azores–Bermudas se desplazara hacia el sur, podría contrarrestar el aumento del flujo de calor sensible, ya que aumentaría la subsidencia en la región. Si por el contrario, se desplazara hacia el norte, la subsidencia disminuiría y el efecto del incremento del flujo de calor sensible sería más marcado, de modo que habría una mayor sequía a barlovento y un incremento de la lluvia a sotavento.

7. Conclusiones

Los resultados sugieren la posibilidad de que se esté presentando un proceso de cambio climático en la región de las Grandes Montañas del Estado de Veracruz, que puede estar siendo provocado por la deforestación.

El cambio de la cobertura forestal por pastizales, zonas de cultivo y urbanas, afecta la redistribución de la energía solar, generando un aumento de la temperatura del aire y la elevación de la base de las nubes, por lo tanto el agua de lluvia disminuye a barlovento y se incrementa a sotavento, de manera más acentuada en la época seca, influyendo en la cantidad y en la distribución espacial de la precipitación pluvial.

Los bosques de la región están muy fragmentados, y de continuar la tala inmoderada (no sustentable) y la sustitución de los cafetales de sombra por cañaverales, la disminución de la lluvia podría ser aún mayor ya que al efecto local de la deforestación se añadiría el cambio climático global. A causa de este fenómeno, la productividad forestal y agrícola podría incrementarse a sotavento, así como la posibilidad de inundaciones.

Para evitar que continúe la deforestación en la zona se ha implementado el llamado “pago por servicios ambientales”, que implica la remuneración a los dueños de predios forestales por la manutención del bosque en las mejores condiciones, y de ese modo promover la redistribución de la energía solar, la captura de bióxido de carbono, la recarga de los mantos acuíferos y la conservación de la biodiversidad local.

El “precio” de los bosques es incalculable, no sólo por los servicios hidrológicos que prestan sino por la riqueza de especies que albergan. Por ello la reforestación no es suficiente, es necesario evitar su destrucción y para lograrlo se requiere aunar el esfuerzo de los científicos al de las comunidades, los dueños de las tierras y las autoridades locales y estatales.

El presente estudio pone en evidencia que las repercusiones geográficas del sistema clima-vegetación-población implican la afectación no sólo de los aspectos físicos del clima y de los recursos hídricos, sino también de las actividades económicas, de las condiciones de vida de la gente y, por si ello fuera poco, del desarrollo de la zona a futuro, poniendo de relieve la importancia de la planeación en la gestión ambiental y en el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales.

Asimismo enfatiza la relevancia de contar con bases de datos climáticos completas y confiables, ya que sólo así es posible realizar investigaciones climatológicas en México.

8. Referencias bibliográficas

Adem J, A. Ruiz, VM. Mendoza, R. Garduño y VL. Barradas. 1995. Recent experiments on monthly weather prediction with the Adem Thermodynamic Climate Model, with especial emphasis in Mexico. *Atmósfera* 8: 23-34.

Achberger C. y D. Chen 2006. Spatial structure in trends of Scandinavian extreme precipitation during 1961-2004. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 8, 05729. European Geosciences Union.

Asociación Española de Climatología. 2006. Presentación del V Congreso de la AEC, Zaragoza, del 18 al 21 de septiembre de 2006.

http://www.aeclim.org/AEC2006_presentación.htm

Barradas VL. 1983. Capacidad de captación de agua a partir de la niebla en *Pinus montezumae* Lambert, de la Región de las Grandes Montañas del Estado de Veracruz, México. *Biótica* 8: 427-431.

Barradas VL. y L. Fanjul 1986. Microclimatic characterization of shaded and open grown coffee (*Coffea arabica* L.) plantations in Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology* 38: 101-112.

Barradas VL. 1991. La desertificación en México y las alteraciones en el ciclo hidrológico. *Boletín de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística* 151: 108-126.

Barradas VL. 2000. La importancia de la niebla como fuente natural y artificial de agua en la Región de las Grandes Montañas del Estado de Veracruz, México. *Foresta Veracruzana* 2 (2): 43-48.

Barradas VL, J. Cervantes-Pérez y C. Puchet-Anyul 2004. Evidencia de un cambio climático en la Región de las Grandes Montañas del Estado de Veracruz, México. En: García Codrón JC *et al.* (eds.). *El clima, entre el mar y la montaña*. pp. 213-219. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC). Serie A, No. 4. Universidad de Cantabria, España.

Barradas VL. 2005. “Disminuyen lluvias por la deforestación en el Cofre de Perote”. Entrevista al Dr. Barradas realizada por Laura Romero. *Gaceta UNAM*, 23 de mayo de 2005, pp. 9-10, México.

Barranco Rodríguez G. 1994. El clima. En: Arcia Rodríguez M. (ed.). *Geografía del Medio Ambiente. Una Alternativa del Ordenamiento Ecológico*. Universidad Autónoma del Estado de México.

Bassols A. 1970. *Geografía económica de México*. Ed. Trillas. México.

Bonan G. 2002. *Ecological climatology: concepts and applications*. Cambridge University Press. 678 pp. Cambridge, U.K.

Centella A., J. Llanes y L. Paz (Eds.). 1997. Variaciones y cambios del clima en Cuba. Informe Técnico. Centro Nacional del Clima, Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba, 58 pp.

Cervantes-Pérez J, VL. Barradas, A. Tejeda-Martínez y D. Pereyra Díaz. 2000. Clima urbano, bioclima humano, hidrología superficial y evaluación de riesgos por hidrometeoros en Xalapa. En: Reporte del Proyecto Áreas Verdes Públicas y Calidad de Vida Urbana. Universidad Veracruzana e Instituto de Ecología A.C.

Consejo Nacional Forestal (CONAF). 1997. Evolución y situación actual del subsector forestal. CONAF. México.

De Lima MI, JL. de Lima, MF. Coelho y S. Pereira. 2006. Precipitation trends in Madeira and Azores Islands over the 20th century. Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 10005. European Geosciences Union.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2005. <http://www.fao.org/newsroom/es/news/2005/89781/index.html>

García-García F. y RA. Montañez 1991. Warm fog in eastern Mexico: a case study. *Atmósfera*, 4, pp. 53-64.

Gay C. 2003. *La Atmósfera*. 1ª edición. Colección Biblioteca Juvenil Ilustrada. Santillana. México.

Giambelluca TW, J. Fox, S. Yarnasarn, P. Onibutr y M.A. Nullet. 1999. Dry-season radiation balance of land covers replacing forests in northern Thailand. *Agriculture and Forest Meteorology* 95, pp. 53-65. Elsevier.

Gobierno del Estado de Veracruz, 1999. Programa Veracruzano de Desarrollo Regional y Urbano 1999-2004. México, pp.: 33-34.

Gobierno del Estado de Veracruz, 2005. Plan Veracruzano de Desarrollo 2005-2010. México, pp.: 86-92.

Gómez-Pompa A. 1977. *Ecología de la Vegetación del Estado de Veracruz*. Compañía Editorial Continental e Instituto de Investigaciones sobre Recursos Bióticos A.C. México, D.F.

Henderson-Sellers A. y K. McGuffie 1995. Global climate models and dynamic vegetation changes. *Global Change Biology* 1: 63-75.

IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático) 2001. Cambio Climático 2001: Informe de síntesis. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Estados Unidos. 1031 pp.

IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático) 2007. Cambio Climático 2007: La base física. Grupo de Trabajo I. Organización Meteorológica Mundial/ Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Ginebra, Suiza, pp.: 21.

Jáuregui, E. 1997. Climate changes in Mexico during the historical and instrumented periods. *Quaternary Int.* Pergamon Elsevier Science, Engl. 43: 7-17.

Jerraud M. 2006. "Clima y agua, factores en 90% de los desastres naturales: OMM". Periódico La Jornada, 22 de marzo de 2006. México.
<http://www.jornada.unam.mx/2006/03/22/index.php>

Lara-García F. 2000. Régimen termopluiométrico, aspectos microclimáticos y bioclimáticos de Xalapa, Veracruz. Tesis de Licenciatura en Ciencias Atmosféricas. Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz.

Leff E. 1986. *Ecología y capital. Hacia una perspectiva ambiental del desarrollo*. UNAM. México. 147 pp.

Masera O. 1991. México y el cambio climático global: un balance crítico. *Ciencia y Desarrollo* 17(100):52-66.

Masera O. 2006. La ecología global desde la perspectiva del cambio climático. *Ciencias* 81, enero-marzo. Facultad de Ciencias. UNAM, México. pp.: 4-15.

Meher-Homji VM. 1988. Effects of forests on precipitation in India. En: Reynolds, E. y Thompson, F. (Eds.) *Forests, climate and hidrology. Regional impacts*. The United Nations University. Singapore. pp. 51-77.

Molina M. 2006. "En mil años, 2005 ha sido el más caluroso". Periódico La Jornada, 22 de marzo de 2006, México.
<http://www.jornada.unam.mx/2006/03/22/index.php>

Mossmann V, A. Castro y JL. Sánchez. 1999. Análisis de la tendencia de las precipitaciones en los meses de febrero, marzo y abril en el territorio peninsular de España. Universidad de León, España.

Palacio JL, J. Mas y A. Velázquez 2002. Análisis del cambio de uso del suelo. Instituto Nacional de Ecología- Instituto de Geografía/UNAM.

Ponce-Nava, D. 1992. El artículo 27 y la Ley Forestal, su impacto en los recursos de México. Ponencia presentada en el seminario “La agricultura del Tercer Mundo, 500 años después”. Instituto de Investigaciones Económicas. UNAM. México.

Reale O. & J. Shukla 2000. Modeling the effects of vegetation on Mediterranean climate during the Roman Classical Period: Part II. Model simulation. *Global and Planetary Change*, Vol.25, Issues 3-4, August 2000, pp.:185-214.

Rowntree PR. 1988. Review of general circulation models as a basis for predicting the effects of vegetation change on climate. En: Reynolds, E. y F. Thompson (Eds.) *Forests, climate and hidrology. Regional impacts*. The United Nations University. Singapore. pp. 162-196.

Rodríguez-Villafuerte B. 2006. “Las inundaciones y la dinámica demográfica en el Estado de Veracruz”. En: Tejeda Martínez A. (Coord.) *Inundaciones 2005 en el Estado de Veracruz*, Universidad Veracruzana, pp.: 209-225.

Salgado, J. 1976. *La economía del estado de Veracruz*. Colección de Estudios Económicos Regionales. Sistema de Bancos de Comercio. México.

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2003. Reglas de operación para el otorgamiento de pagos del Programa de Servicios Ambientales Hidrológicos. Diario Oficial, 3 de octubre, México, pp. 6-22.

Serrano A, VL. Mateos y JA. García. 1999. Trend analysis of monthly precipitation over the Iberian Peninsula for the period 1921-1995. *Phys. Chem. Earth (B)*, Vol. 24, No.1-2, pp. 85-90.

Stenseth N. & Hurrell J. 2005. Global Climate Change: building links between the climate and ecosystem impact research communities. *Climate Research*, vol.29: 181-182.

Tian H, JM. Melillo, DW. Kicklighter, AD. McGuire, J. Helfrich, B. Moore & CJ. Vorosmarty. 2000. Climatic and biotic controls on annual carbon storage in amazonian ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, vol.9, No. 4: 315-335. <http://www.jstor.org>

Toledo VM. 1990. El proceso de ganaderización y la destrucción biológica y ecológica de México. En: Leff, E. (Coord.). *Medio ambiente y desarrollo en México*. Volumen primero. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Humanidades, UNAM/ Grupo Editorial Miguel Angel Porrúa. pp.: 191-227.

UNESCO. 2001. "Clima: cuanto más se sabe menos se hace" por Michel Bessières, periodista del *Correo de la UNESCO*.

www.unesco.org/courier/2001_06/sp/planet.htm

Vidal Zepeda R. 2005. Las regiones climáticas de México. Temas selectos de Geografía de México. Instituto de Geografía. UNAM. pp. 121- 144.

World Resources. 2000. *World Resources 2000-2001. People and ecosystems: the fraying web of life*. World Resources Institute. UNDP, UNEP, World Bank, Washington.

9. Apéndice

Comprende las gráficas de:

- precipitación total anual
- precipitación promedio mensual
- precipitación total mensual
- precipitación en época de lluvias
- y precipitación en época de secas

de las siguientes estaciones representativas:

- zona de sotavento: Ciudad Serdán (21026).
- zona de barlovento: Elotepec (30052).

