



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS
DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACIÓN EN EL
NORTE DE MÉXICO: FORZAMIENTOS OCEÁNICOS
Y ATMOSFÉRICOS Y SU RELACIÓN CON
INCENDIOS FORESTALES.

TESIS

Que para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales
(Orientación Ecología de Zonas Áridas)

Presenta

Susana Domínguez Duarte

La Paz, Baja California Sur, Septiembre de 2013

ACTA DE LIBERACION DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 12 horas del día 11 del Mes de septiembre del 2013, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

"Variabilidad de la precipitación en el norte de México: forzamientos oceánicos y atmosféricos y su relación con incendios forestales"

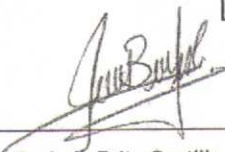
Presentada por el alumno:

Susana Domínguez Duarte

Aspirante al Grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACION DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACION EN **Ecología de zonas áridas**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

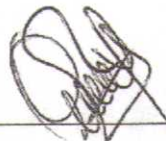
LA COMISION REVISORA




Dr. Luis Brito Castillo
DIRECTOR DE TESIS



Dra. Sara Cecilia Díaz Castro
CO-TUTOR



Dr. Oscar Gerardo Gutiérrez Ruacho
CO-TUTOR



DRA. ELISA SERVIERE ZARAGOZA,
DIRECTORA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

COMITÉ TUTORIAL Y REVISOR DE TESIS

Director de tesis

Dr. Luis Brito Castillo

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

Co-tutor

Dra. Sara Cecilia Díaz Castro

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

Co-tutor

Dr. Oscar Gerardo Gutiérrez Ruacho

Universidad del Estado de Sonora

JURADO DE EXAMEN DE POSGRADO

Dr. Luis Brito Castillo

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

Dra. Sara Cecilia Díaz Castro

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

Dr. Oscar Gerardo Gutiérrez Ruacho

Universidad del Estado de Sonora

Suplente

Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

Resumen en español

Estudios realizados en el norte de México han revelado cambios en las precipitaciones en las últimas nueve décadas, observándose tendencias hacia el incremento en algunas zonas y en otras hacia el decremento. En este trabajo se verificó si tales cambios muestran un patrón regional y si estos están siendo afectados principalmente por las variaciones que ocurren en los océanos Pacífico y Atlántico, y si estos cambios además están relacionados con el aumento de incendios forestales en la región de estudio. La zona de estudio comprende los Estados fronterizos del norte de México (incluyendo Baja California y Baja California Sur). Se dividió en 7 regiones de acuerdo a las vertientes principales. Para cada región se estimaron las series promedio regionales de tres períodos, verano, invierno y anual utilizando los datos diarios de precipitación (pp) actualizados al 2011. Se determinó si existían diferencias significativas entre los estadísticos de las series y si la pendiente ajustada a cada serie promedio regional resultaba significativa al 95%. Se realizaron análisis de correlación simple, con desfases, entre las series promedio regionales y algunos índices climáticos (ALPI, AMO, NAO, NPI, ONI y PDO). Un análisis similar también se realizó entre las series históricas de incendios forestales y las series de pp acumulada que mostraron tendencias estadísticamente significativas al 95%, y entre las series de incendios y los índices climáticos. El análisis de regresión aplicado a las series promedio regionales mostró tendencias estadísticamente significativas en 4 regiones, que resultaron correlacionadas significativamente con algunos índices climáticos, donde a escalas de tiempo y espacio interdecenal y regional respectivamente, el AMO y el PDO mostraron las mayores correlaciones. Asimismo se encontraron correlaciones significativas entre las series de precipitación y el número de incendios forestales en Sonora y Baja California, pero con un comportamiento distinto en la estructura de las series que sugiere que las diferencias encontradas en ambos estados pueden tener relación con el tipo de vegetación. El AMO fue el índice dominante en las correlaciones calculadas entre los índices climáticos y el número de incendios forestales. Los resultados de este trabajo demuestran que las tendencias de pp en el norte de México son de carácter regional y que la mayor explicación a la varianza de las series está dada por el AMO y el PDO, es decir, la estructura de las series está muy correlacionada con las variaciones de temperatura que ocurren en los océanos Atlántico (a través del AMO) y Pacífico (a través del PDO), con dominancia del

Atlántico. El análisis de correlación también mostró que el incremento en el número de incendios forestales en muchos casos está relacionado con el AMO y que para el caso particular de Baja California esta relación puede ser útil para hacer predicciones ($r=0.79$).

Palabras clave: Patrón regional de lluvia, índices climáticos, incendios forestales.

Resumen en inglés

In northern Mexico the studies revealed changes in precipitation in the last nine decades, toward increasing precipitations in some areas and declining precipitations in other areas. In this work it was verified if those changes display a regional pattern of trends, if they have been mainly affected by temperature variations of the Pacific and Atlantic oceans, and in addition if these changes are related with the increasing trend observed in forest fires in the study area. The study area comprises the border States of northern Mexico (including the States of Baja California and Baja California Sur). It was divided in seven regions considering the limits of the main hydrologic basins. For each region the mean values of summer, winter and annual periods was estimated using daily rainfall (pp) data updated till 2011. It was determined if there were significant differences between the statistics of the series and if the adjusted slope to each regional average series was significant at the 95%-level. A simple lag-correlation analyses between the regional average series and some climate indices (ALPI, AMO, NAO, NPI, ONI and PDO) was also performed. A similar was also applied between the historical series of forest fires and the accumulated rainfall series, displaying statistically significant trends at the 95%-level, and between the forest fire series and the climate indices. The regression analysis applied to the regional mean series showed statistically significant trends in four regions, which were significantly correlated with some climate indices, and where at interdecadal and regional scales, the AMO and PDO displayed the highest correlation values. Additionally significant correlations were found between the rainfall series and the number of forest fires in Sonora and Baja California, but with different behaviors in the structure of the series, suggesting that differences between the States could be related with their type of vegetation. The AMO proved to be the dominant index in the correlation analysis between climate indices and forest fire series. The results of this work demonstrate that rainfall trends in northern Mexico display a regional pattern and that the higher variance explained of the series is from the AMO and PDO. This result means that the configuration of the series is highly correlated with the temperature variations occurred in the Atlantic (through the AMO) and the Pacific (through the PDO), with dominance from the Atlantic ocean. The correlation analysis also shows that the increase in the number of forest fires in many cases is related to

the AMO and in the particular for Baja California this relationship can be useful in making predictions ($r=0.79$).

Keywords: Regional rainfall pattern, climate indices, forest fires.

DEDICATORIA

“En el libro infinito de los secretos de la naturaleza un poquito puedo leer”.
(William Shakespeare)

A mi familia y amigos del CIBNOR.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste SC, Unidad Sonora, Campus Guaymas por las facilidades otorgadas durante mis estudios de maestría y en particular al Dr. Luis Brito Castillo por la oportunidad que me brindó de ser parte de su equipo. A la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim) de CONACYT por el apoyo recibido para participar en dos de sus reuniones académicas. Para la realización de esta tesis se recibió apoyo de los siguientes proyectos PC 0.3 de CIBNOR, PS9 proyecto semilla "Rumbo a la creación de una base de datos atmosféricos e hidrológicos para México" y 896-1 de REDESClim.

Agradezco a Dios por darme la vida y la oportunidad de prepararme más allá de los estudios universitarios. Gracias a mis padres por todo el amor y esfuerzo que depositan en mi, por la educación que me han dado a través de los años y por su apoyo incondicional. Gracias a mi hermano por su cariño y compañía, especialmente ahora que vivimos en distintas ciudades, gracias por mantenerte cerca y gracias por tu ayuda.

A mis amigos del CIB: Cintya, Guillermo, Jesús, Edgar Arnoldo, Edgar Adrián, Himilce, Pablo, Marfisa y Michel. Gracias por su sincera amistad, por ser maestros, compañeros, psicólogos, cómplices y constructores de tantos recuerdos y experiencias invaluable, tantas risas, desveladas y de vez en cuando frustraciones que con el tiempo se convirtieron en crecimiento. Gracias!

Gracias a Alejandro Jiménez por sus oportunas palabras de ánimo y apoyo. A Edgar Alcántara Razo por ayudarme en el desarrollo del presente trabajo, particularmente con el dominio del software Excel. A Xicoténcatl Galicia por su apoyo técnico computacional. A Martina, don Fausto, don Pancho y Felipe por sus siempre cordiales buenos días ☺. Gracias a los Doctores Oscar Gutiérrez y Sara Díaz por aceptar ser parte de mi comité de tesis y de nuevo agradezco al Dr. Luis Brito por la oportunidad de realizar esta tesis y por compartir su tiempo, experiencias y conocimientos.

CONTENIDO

Resumen en español -----	i
Resumen en inglés -----	iii
Dedicatoria -----	v
Agradecimientos -----	vi
Lista de figuras -----	viii
Lista de tablas -----	xi
1. INTRODUCCIÓN -----	1
2. ANTECEDENTES -----	3
3. JUSTIFICACIÓN -----	5
4. OBJETIVOS -----	7
4.1 Objetivo general -----	7
4.2 Objetivos particulares -----	7
5. HIPÓTESIS -----	7
6. MATERIALES Y MÉTODOS -----	8
6.1 Área de Estudio -----	8
6.2 Metodología -----	9
6.2.1 Cálculo de acumulados de lluvia mensual, anual y estacional -----	9
6.2.2 Cálculo de Series Promedio Regionales (SPP) -----	9
6.2.3 Contribución de los índices climáticos a la varianza de la precipitación regional -----	12
6.2.4 Influencia ciclónica sobre los valores extremos de precipitación -----	17
6.2.5 Análisis detallado entre series de precipitación individuales e incendios forestales -----	19
7. RESULTADOS -----	20
7.1 Series promedio regionales -----	20
7.1.1 Región 4 (Cuencas cerradas del Norte) anual (SPP4 an) -----	25
7.1.2 Región 1 (Vertiente peninsular del Pacífico) verano (SPP1 smr) -----	26
7.1.3 Región 7 (Vertiente continental del Golfo de México) verano (SPP7 smr) -----	26
7.1.4 Región 6 (Cuatro Ciénegas) Coahuila (SPP6 an) -----	27
7.2 Índices climáticos -----	33
7.3 Ciclones -----	51
7.4 Análisis local: de incendios forestales -----	63
8. DISCUSIÓN -----	76
9. CONCLUSIONES -----	83
10. LITERATURA CITADA -----	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Distribución de las estaciones climatológicas (puntos) en la zona de estudio (región sombreada en el mapa pequeño). Los círculos muestran la posición de las estaciones con más de 40 años de datos (datos cuyos registros fueron utilizadas para el análisis de tendencias realizado por Brito-Castillo (2012)). Las líneas grises en el mapa principal representan las vertientes principales dentro de la zona de estudio., SMOc=Sierra Madre Occidental; SMOr=Sierra Madre Oriental; 1=Vertiente Peninsular del Pacífico; 2=Vertiente Peninsular del Golfo de California; 3=Vertiente continental del Golfo de California; 4=Cuencas cerradas del Norte; 5=Cuenca del Río Conchos; 6=Cuatro Ciénegas Coahuila; 7=Vertiente continental del Golfo de México.	8
Figura 2.	Serie promedio regional anual de la zona 4.	23
Figura 3.	Serie promedio regional de verano de la zona 1.	24
Figura 4.	Serie promedio regional de verano de la zona 7.	24
Figura 5.	Serie promedio regional anual de la zona 6.	25
Figura 6.	Mapas que muestran la posición de estaciones con: registros de lluvia extrema (puntos) y aquellas cuyos registros de lluvia acumulada no resultaron extremos (triángulos grises) en la zona 4 referente a la serie promedio regional de precipitación anual (SPP4 anual) correspondientes a los años a) 1973, b) 1987, c) 1991 y d) 1992.	33
Figura 7.	Mapas que muestran la posición de estaciones con: registros de lluvia extrema (puntos) y aquellas cuyos registros de lluvia acumulada no resultaron extremos (triángulos grises) en la zona 1 referente a la serie promedio regional de precipitación de verano (SPP1 de verano) correspondientes a los años a) 1983, b) 1984, c) 2003 y d) 2006.	34
Figura 8.	Mapas que muestran la posición de estaciones con: registros de lluvia extrema (puntos) y aquellas cuyos registros de lluvia acumulada no resultaron extremos (triángulos grises) en la zona 7 referente a la serie promedio regional de precipitación de verano (SPP7 de verano) correspondientes a los años a) 1958, b) 1971, c) 1973, d) 1978, e) 2003 y f) 2010.	35

- Figura 9.** Mapa que muestra la posición de estaciones con: registros de lluvia extrema (puntos) y aquellas cuyos registros de lluvia acumulada no resultaron extremos (triángulos grises) en la zona 6 referente a la serie promedio regional de precipitación anual (SPP6 anual) correspondiente al año 1992. 35
- Figura 10.** (a) Serie promedio regional de precipitación anual (SPP4 an), e índices climáticos filtrados mediante promedios móviles de 7 años (excepto ALPI, que utilizó promedios móviles de 5 años) (b) ALPI, (c) AMO, (d) NAO, (e) NPI, (f) ONI y (g) PDO. Las líneas verticales señalan los años con valores extremos de precipitación y los números entre paréntesis los porcentajes de estaciones individuales que registraron valores extremos en los años correspondientes. 36
- Figura 11.** (a) Serie promedio regional de precipitación de verano (SPP1 smr), e índices climáticos filtrados mediante promedios móviles de 7 años (excepto ALPI, que utilizó promedios móviles de 5 años) (b) ALPI, (c) AMO, (d) NAO, (e) NPI, (f) ONI y (g) PDO. Las líneas verticales señalan los años con valores extremos de precipitación y los números entre paréntesis los porcentajes de estaciones individuales que registraron valores extremos en los años correspondientes. 37
- Figura 12.** (a) Serie promedio regional de precipitación de verano (SPP7 smr), e índices climáticos filtrados mediante promedios móviles de 7 años (excepto ALPI, que utilizó promedios móviles de 5 años) (b) ALPI, (c) AMO, (d) NAO, (e) NPI, (f) ONI y (g) PDO. Las líneas verticales señalan los años con valores extremos de precipitación y los números entre paréntesis los porcentajes de estaciones individuales que registraron valores extremos en los años correspondientes. 38
- Figura 13.** (a) Serie promedio regional de precipitación anual (SPP4 an) filtrada mediante promedios móviles de 7 años, e índices climáticos filtrados mediante promedios móviles de 7 años (excepto ALPI, que utilizó promedios móviles de 5 años) que resultaron correlacionados (b) ALPI, (c) AMO, (d) NAO, (e) NPI y (f) PDO. 46
- Figura 14.** (a) Serie promedio regional de precipitación de verano (SPP1 smr) filtrada mediante promedios móviles de 7 años, e índices climáticos filtrados mediante promedios móviles de 7 años (excepto ALPI, que utilizó promedios móviles de 5 años) que resultaron correlacionados (b) ALPI, (c) AMO, (d) NAO, (e) ONI y (f) PDO. 47

- Figura 15.** (a) Serie promedio regional de precipitación de verano (SPP7 smr) filtrada mediante promedios móviles de 7 años, e índices climáticos filtrados mediante promedios móviles de 7 años que resultaron correlacionados (b) AMO, (c) ONI y d) PDO. 48
- Figura 16.** (a) Serie promedio regional de precipitación anual (SPP6 an) filtrada mediante promedios móviles de 7 años, e índices climáticos filtrados mediante promedios móviles de 7 años (excepto ALPI, que utilizó promedios móviles de 5 años) que resultaron correlacionados (b) ALPI, (c) AMO, (d) NAO y (e) PDO. 49
- Figura 17.** Distribución de estaciones en la zona 1 referente a la serie promedio regional de precipitación de verano (SPP1 de verano) correspondientes a los ciclones a)1, b)2, c)3, d)4, e)5, f)6, g)7, h)8 e i)9. Los triángulos grises muestran las estaciones cuyos datos de lluvia acumulada durante el ciclón respectivo no registraron valores de lluvia extremos y los puntos negros, las que sí. 59
- Figura 18.** Distribución de estaciones en la zona 7 referente a la serie promedio regional de precipitación de verano (SPP7 de verano) correspondientes a los ciclones a)1, b)2, c)3, d)4, e)5, f)6, g)7, h)8, i)9, j)10, k)11, l)12 y m)13. Los triángulos grises muestran las estaciones cuyos datos de lluvia acumulada durante el ciclón respectivo no registraron valores de lluvia extremos y los puntos negros, las que sí. 60
- Figura 19.** Estructuras de las series de a) número de incendios forestales en Baja California Sur y b) Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO). 68
- Figura 20.** Estructuras de las series de a) número de incendios forestales en Chihuahua, b) Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) y c) Pacific Decadal Oscillation (PDO). 69
- Figura 21.** Estructuras de las series de a) superficie afectada por incendios forestales en Chihuahua, b) Oceanic Niño Index (ONI) y c) Pacific Decadal Oscillation (PDO). 70
- Figura 22.** Estructuras de las series de a) efectividad de los incendios forestales en Chihuahua, b) Aleutian Low Pressure Index (ALPI), c) Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) y d) Pacific Decadal Oscillation (PDO). 71
- Figura 23.** Estructuras de las series de a) número de incendios forestales en Baja California y b) Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO). 72
- Figura 24.** Estructuras de las series de a) número de incendios en Sonora y b) Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO). 72

LISTA DE TABLAS

Tabla I.	Características estadísticas de las Series Promedio Regionales de Precipitación (SPP)., an=anual, wtr=invierno, smr=verano, N=longitud de SPP, DE=desviación estándar, Cv= coeficiente de variación.	21
Tabla II.	Resultados del ajuste de una línea de tendencia por el método de mínimos cuadrados a las Series Promedio Regionales (SPP). Los casos marcados en negritas cursivas son estadísticamente significativos., a=intercepto al origen, b=precipitación, DE=desviación estándar y α -level=significancia estadística.	22
Tabla III-a.	Comparación de medias y varianzas de las SPP anuales. Los valores α -level que fueron estadísticamente significativos se observan en color negro, mientras que los grupos en que las comparaciones resultaron sin diferencias se resaltan en negritas cursivas. Las claves y el número presentados en la primer columna corresponden a cada SPP., an=anual, valor t=valor tabular de Student, razón f varianzas=valor tabular de Fisher y DE=desviación estándar.	28
Tabla III-b.	Comparación de medias y varianzas de las SPP de invierno. Los valores α -level que fueron estadísticamente significativos se observan en color negro, mientras que los grupos en que las comparaciones resultaron sin diferencias se resaltan en negritas cursivas. Las claves y el número presentados en la primer columna corresponden a cada SPP., wtr=invierno, valor t=valor tabular de Student, razón f varianzas=valor tabular de Fisher y DE=desviación estándar.	29
Tabla III-c.	Comparación de medias y varianzas de las SPP de verano. Los valores α -level que fueron estadísticamente significativos se observan en color negro, mientras que los grupos en que las comparaciones resultaron sin diferencias se resaltan en negritas cursivas. Las claves y el número presentados en la primer columna corresponden a cada SPP., smr=verano, valor t=valor tabular de Student, razón f varianzas=valor tabular de Fisher y DE=desviación estándar.	30
Tabla IV-a.	Porcentaje de estaciones que muestran registros extremos de precipitación en años correspondientes a valores extremos en SPP anual de la zona 4 (indicado como %B).	32
Tabla IV-b.	Porcentaje de estaciones que muestran registros extremos de precipitación en años correspondientes a valores extremos en SPP de verano de la zona 1 (indicado como %B).	32

Tabla IV-c.	Porcentaje de estaciones que muestran registros extremos de precipitación en años correspondientes a valores extremos en SPP de verano de la zona 7 (indicado como %B).	32
Tabla IV-d.	Porcentaje de estaciones que muestran registros extremos de precipitación en años correspondientes a valores extremos en SPP anual de la zona 6 (indicado como %B).	32
Tabla V.	Correlaciones significativas al 95% entre las SPP y los índices climáticos seleccionados.	39
Tabla VI-a.	Correlaciones significativas al 95% entre la SPP4 anual (SPP4 an) filtrada mediante promedios móviles y los índices climáticos seleccionados.	40
Tabla VI-b.	Correlaciones significativas al 95% entre la SPP1 de verano (SPP1smr) filtrada mediante promedios móviles y los índices climáticos seleccionados.	41
Tabla VI-c.	Correlaciones significativas al 95% entre la SPP7 de verano (SPP7 smr) filtrada mediante promedios móviles y los índices climáticos seleccionados.	42
Tabla VI-d.	Correlaciones significativas al 95% entre la SPP6 anual (SPP6 an) filtrada mediante promedios móviles y los índices climáticos seleccionados.	43
Tabla VII-a.	Ciclones con probable influencia en la ocurrencia de valores extremos de precipitación de la SPP4 anual., %B indica el porcentaje de estaciones que muestran valores extremos de precipitación en relación con el total de estaciones con dato.	51
Tabla VII-b.	Ciclones con probable influencia en la ocurrencia de valores extremos de precipitación de la SPP1 de verano., %B indica el porcentaje de estaciones que muestran valores extremos de precipitación en relación con el total de estaciones con dato.	52
Tabla VII-c.	Ciclones con probable influencia en la ocurrencia de valores extremos de precipitación de la SPP7 de verano., % B indica el porcentaje de estaciones que muestran valores extremos de precipitación en relación con el total de estaciones con dato.	52

Tabla VII-d.	Ciclones con probable influencia en la ocurrencia de valores extremos de precipitación de la SPP6 anual., %B indica el porcentaje de estaciones que muestran valores extremos de precipitación en relación con el total de estaciones con dato.	52
Tabla VIII-a.	Ciclones identificados con posible afectación a la SPP4 an. La distribución hace referencia a la extensión que cubren las estaciones con precipitación cuya tendencia es significativa en la región 4., pp=precipitación.	55
Tabla VIII-b.	Ciclones identificados con posible afectación a la SPP1 smr. La distribución hace referencia a la extensión que cubren las estaciones con precipitación cuya tendencia es significativa en la región 1., pp=precipitación.	56
Tabla VIII-c.	Ciclones identificados con posible afectación a la SPP7 smr. La distribución hace referencia a la extensión que cubren las estaciones con precipitación cuya tendencia es significativa en la región 7., pp=precipitación.	57
Tabla VIII-d.	Ciclones identificados con posible afectación a la SPP6 an. La distribución hace referencia a la extensión que cubren las estaciones con precipitación cuya tendencia es significativa en la región 6., pp=precipitación.	58
Tabla IX.	Correlaciones estadísticamente significativas entre las series de lluvia acumulada para cada estación cuya tendencia hacia el incremento fue significativa y las series de incendios forestales por Estado., N incendios es el número de incendios, lag es el desfase en años, r es el valor de la correlación y SE es el error estándar.	65
Tabla X.	Correlaciones estadísticamente significativas entre los índices climáticos seleccionados y las series de incendios forestales por Estado., N incendios es el número de incendios, lag es el desfase en años, r es el valor de la correlación y SE es el error estándar.	67
Tabla XI.	Correlaciones estadísticamente significativas entre las series de lluvia acumulada para cada estación cuya tendencia hacia el incremento fue significativa y los índices climáticos seleccionados., lag es el desfase en años, r es el valor de la correlación y SE es el error estándar.	73

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente el tema del clima es de interés común, particularmente porque todos los organismos vivos del planeta se ven afectados de algún modo por sus variaciones. En sus desviaciones extremas, el clima puede afectar severamente a los ecosistemas. Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1992), el clima es la síntesis de las condiciones meteorológicas en un lugar determinado, caracterizada por estadísticas a largo plazo (valores medios, varianzas, probabilidades de valores extremos, etc.), de los elementos meteorológicos en dicho lugar. De aquí resalta la importancia del estudio del tema, ya que el clima es un elemento de gran influencia para los ecosistemas y las actividades humanas.

Monin y Shishkov (2000), reportan que el estudio de la climatología de una variable (i.e. precipitación) requiere, al menos, 30 años de información. Aunque esta afirmación no tiene sustento científico otorga una idea aproximada sobre la necesidad de contar con series suficientemente largas, es decir, para establecer algún cambio en el comportamiento de la climatología de una determinada variable se debería contar con al menos dos períodos de 30 años completos. Esta necesidad ha limitado el esclarecimiento de la existencia de cambios reales en México y en el mundo, pues por lo regular, las series disponibles no tienen esa extensión (ya que son menores a 60 años), además de presentar datos faltantes en su interior. A este problema se suma la relevancia en la representatividad de las series de tiempo (tanto espacial como temporal), esto es bajo la premisa de que las mismas sean homogéneas, independientes, aleatorias y estacionarias.

Las series de precipitación en zonas áridas y semiáridas muestran una alta variabilidad espacial y temporal, por lo que resulta arriesgado hacer generalizaciones sobre el clima de una región a partir de casos específicos, ya que cualquier tendencia que se ajuste a los datos, queda acotada al periodo de las series, lo que dificulta hacer proyecciones futuras sin la ayuda de modelos de circulación general y del análisis de información adicional, por ejemplo, de fenómenos que modulan el comportamiento de las lluvias, como el ENSO (El Niño Oscilación del Sur, por su sigla en inglés) (Rasmusson E. y Wallace J., 1983).

Según Seager *et al.* (2009), parte del comportamiento del clima en el norte de México se explica por la variabilidad de temperatura y presión observadas en los Océanos Pacífico y Atlántico. En escalas de tiempo interanual y estacional la variabilidad del clima en México está modulada por la influencia del ENSO (en sus dos fases, cálida o El Niño y fría o La Niña), así como la incidencia de fenómenos transitorios como los ciclones tropicales, las ondas del este y las tormentas tropicales. En el norte de México los efectos del fenómeno El Niño se traducen en incrementos de las precipitaciones tanto en invierno como en verano. El fenómeno de La Niña, también afecta la ocurrencia de las precipitaciones ocasionando su reducción en invierno e incremento en verano (Seager *et al.* 2009). Los ciclones tropicales por su parte pueden alterar temporalmente los patrones de lluvia en verano debido a los altos volúmenes que aportan en períodos muy cortos. En la región noroeste de México el aporte de agua asociado a ciclones tropicales, en algunos casos representa más del 60% de la lluvia acumulada anual (Díaz *et al.* 2008., Farfán, 2011).

Además de los períodos de lluvia abundante también se presentan períodos de escasez de lluvia. Entre los fenómenos provocados por la falta de lluvia en el norte de México se encuentran los incendios forestales, que figuran entre las principales causas de pérdida de área boscosa (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI, 2012). El INEGI indica que en el 2011 sucedieron 12,113 incendios (lo cual casi dobla la cantidad reportada para el año anterior) dañando 956,404.80 Ha. Cabe decir que, según cifras oficiales proporcionadas por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2013), las tendencias históricas de incendios forestales ocurridos entre 1970 y 2013 muestran que estos han aumentado progresivamente, por lo que es necesaria la generación de información que permita hacer frente a este reto.

En el presente trabajo se analizará la posible relación existente entre las tendencias observadas en lluvia en el norte de México y diferentes fenómenos de escala interanual e interdecenal (ENSO, la Oscilación Decenal del Pacífico, la Oscilación del Atlántico Norte etc.), medidos a través de índices climáticos. Así mismo se evaluará la contribución parcial de cada fenómeno, con el objeto de determinar si los cambios observados en las precipitaciones son atribuibles a las variaciones observadas en los índices climáticos y se

investigará si existe relación entre las tendencias de lluvia y los cambios observados en incendios forestales.

2. ANTECEDENTES

Los intentos por lograr esclarecer los cambios en las condiciones climáticas observadas regionalmente han basado su análisis en el estudio de tendencias en temperaturas del aire en superficie (TSA), por ser la variable más ampliamente monitoreada en el mundo, y por lo tanto, con los registros instrumentales más largos. Estudios de esta naturaleza han revelado la existencia de tendencias de diferente signo (es decir positivas, que son hacia incremento y negativas, que son hacia decremento) en México (Englehart y Douglas, 2004; Pavia *et al.* 2008), en el centro del país (Brito-Castillo *et al.* 2009), y noroeste de México (Weiss y Overpeck, 2005; Domínguez-Duarte, 2010; Gutiérrez-Ruacho *et al.* 2010), cuyas causas se han atribuido de manera parcial a las modificaciones regionales en el uso del suelo, alteraciones en la cobertura vegetal (Englehart y Douglas, 2004), y cambios en el patrón de flujo atmosférico de escala global (Brito-Castillo *et al.* 2009). Dichos estudios han mostrado que, aun cuando las tendencias son reales, en algunas ocasiones corresponden con la hipótesis del calentamiento global y en otras son opuestas.

Además de la TSA, han sido tomadas en cuenta otras variables en el análisis de tendencias, como las escorrentías, las lluvias y el número de días en que se registra la lluvia (Brito-Castillo, 2012), y sus derivados como los valores extremos de las series con diferente probabilidad de ocurrencia (Domínguez-Duarte, 2010; Gutiérrez-Ruacho *et al.* 2010). Particularmente en el norte de México, Brito-Castillo (2012) reporta que en las últimas nueve décadas, se ha observado una disminución de alrededor de 21 mm en los acumulados de lluvia media anual y de 9 mm en los acumulados de lluvia media de verano, siendo la región más afectada con estas disminuciones las áreas montañosas y de pie de monte en la vertiente del Golfo de México y sobre la cuenca alta del río Lerma-Santiago en el centro de México. Sin embargo, varias estaciones en el norte y noroeste de México (el área

continental y la Península de Baja California incluidos), muestran un incremento general en los acumulados de precipitación media anual y de verano con alta variabilidad espacial.

El incremento de las precipitaciones en el norte de México parece seguir un patrón regional observándose principalmente en las áreas montañosas y de pie de monte, mientras que en las zonas de más baja elevación (i.e. de los valles, planicies y zonas costeras), los cambios no son evidentes o por el contrario, son hacia la disminución. Hasta ahora, no se ha establecido con qué factores se asocian estos incrementos en las precipitaciones en el norte de México y si sus causas están asociadas con los cambios observados en las temperaturas superficiales del mar en el Océano Pacífico, los efectos del fenómeno ENSO, o la ocurrencia de ciclones tropicales cada vez más intensos por mencionar algunos.

Por otro lado los incendios forestales en México son un problema de carácter nacional ya que según los registros oficiales la ocurrencia de estos eventos muestran una tendencia significativa ascendente, trayendo consigo las consecuencias propias del fuego, el cual es importante para la estructura, funcionamiento y dinámica de los ecosistemas terrestres y en casos severos contribuye directamente en el incremento de bióxido de carbono en la atmósfera y en la deforestación, ocasionando erosión en los suelos o cambio en la estructura y composición de los bosques (Villers-Ruíz, 2006).

Villers-Ruíz (2006) señala que desde los años sesenta los estudios sobre incendios forestales en México se han enfocado en tres aspectos: efectos en los ecosistemas forestales, prevención y combate; indicando además que el clima es un factor incontrolable altamente influyente en el fuego y relevante para la prevención.

En México se han hecho algunos trabajos sobre incendios forestales. Drury y Veblen (2008) analizaron la variabilidad espacial y temporal de la ocurrencia de incendios en una reserva forestal del Estado de Durango y encontraron que dichos fenómenos son influenciados en diversas formas por eventos como sequías, lluvias monzónicas, años húmedos, años Niño o Niña y actividad humana entre otros. Heyerdahl y Alvarado (2003) examinaron la influencia del clima y del uso de suelo sobre el historial de incendios superficiales en los bosques de encino-pino en la Sierra Madre Occidental, buscando

relacionar la humedad y las lluvias con la producción de combustible y con los incendios forestales. Los mismos autores señalan también que los años Niño y Niña son importantes, así como las sequías.

3. JUSTIFICACIÓN

En años recientes han ocurrido eventos meteorológicos extremos con consecuencias considerables para las sociedades de los Estados al norte de México. La intensa sequía en Chihuahua y Coahuila de 2011-2012 por ejemplo, fue catalogada como excepcional, término reservado a condiciones de sequía de gran intensidad y cobertura, incrementando las posibilidades de que ocurran incendios forestales en el país (NOAA, 2012; El Universal, 2012) con repercusiones importantes en la producción agropecuaria. Otro ejemplo fue el huracán Jimena en el Estado de Sonora, particularmente en los municipios de Guaymas y Empalme, que ocasionó severos daños a la infraestructura urbana y dejó cientos de damnificados en el año 2009 (García Arróliga *et al.* 2010). Estos casos reflejan que el entendimiento del clima y su variabilidad son importantes para la sociedad y sirven como insumos en la prevención de desastres.

Brito-Castillo (2012) indica que históricamente en el norte de México la precipitación acumulada anual muestra un incremento registrado en varias estaciones climatológicas lo que podría tratarse de un patrón regional. En este trabajo se ahonda en este estudio para definir la posible existencia del patrón regional y sus posibles causas. Los resultados que se generen de esta investigación ayudarán a comprender mejor el clima del Norte de México y servirán como insumos para una mejor toma de decisiones.

Por su parte los incendios forestales (IF) son eventos de importancia en México porque constituyen una causa significativa de deforestación (Torres-Rojo, 2004), pérdida de suelo y de potencial biológico en el ecosistema y aumento en el riesgo de inundación y erosión (Valdés-Ramírez citado en Cruz-Aguirre, 2012). También el cambio climático derivado de los IF puede tener impacto en sequías prolongadas y alterar los ciclos de lluvia (Velásquez

y Valdés-Ramírez citado en Cruz-Aguirre, 2012). Por lo tanto es necesaria la generación de información que permita hacer frente a este reto. Jurado-Ybarra y González-Tagle (citado en Cruz-Aguirre, 2012) consideran que es urgente mejorar las estrategias de prevención y vigilancia de IF en México, debido a que las tendencias históricas señalan que en los próximos años aumentará la cantidad de IF en el país, trayendo consecuencias negativas en la producción de madera y en las economías locales dependientes de los recursos forestales.

Uno de los factores que influyen en la variabilidad de la ocurrencia de IF (tanto en la cantidad como en el área afectada) son las condiciones meteorológicas (Torres-Rojo, 2004), asimismo las lluvias cuantiosas contribuyen al origen de materia combustible. El combustible es el elemento que determina si se inicia o no un incendio, la dificultad de controlarlo y su posible comportamiento (Comisión Nacional Forestal *et al.* 2008). Datos de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR citado en Cruz-Aguirre, 2012) indican que en 2011 (declarado como Año Internacional de Los Bosques) se observó un repunte nacional de IF, donde una de las causas fue el alto contenido de follaje seco, resultado de lluvias de carácter ciclónico. Por lo tanto relacionar las tendencias de lluvia y los IF, como se propone en el presente trabajo, es relevante.

Fulé *et al.* (2012) resaltan que el entendimiento de la relación entre el clima y los incendios forestales es un elemento central para comprender los regímenes de incendios a escalas temporal y espacial. Por su parte la Comisión Nacional Forestal *et al.* (2008) señalan que el 99% de los IF en México son ocasionados por actividades humanas, sin embargo también dice que una vez que un incendio ha comenzado el tiempo atmosférico es el factor de mayor influencia en el desarrollo del incendio y resalta que es fundamental el contar con observaciones y pronósticos meteorológicos. Aunque en este trabajo se abordan interrogantes de carácter climático, los conocimientos que se obtengan pueden ser útiles como insumos en el entendimiento de los cambios actuales que se observan en las condiciones atmosféricas y sus consecuencias presentes y futuras.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Analizar la variabilidad de la precipitación en el norte de México y los posibles forzamientos oceánico-atmosféricos que la modulan e identificar la relación de los resultados con la frecuencia de incendios forestales en la región.

4.2 Objetivos particulares

Verificar si los cambios que se están observando en la ocurrencia de las lluvias en el norte de México muestran un patrón regional y si además están siendo influenciados por los cambios que ocurren en el Pacífico y en el Atlántico de manera dominante.

Elaborar una base de datos de series de tiempo (registros de lluvia, índices climáticos, listado de ciclones tropicales) con control de calidad.

Identificar los fenómenos que tienen mayor influencia en la determinación de la precipitación

Corroborar si los cambios observados en precipitación en el norte de México están relacionados con los cambios observados en incendios forestales

5. HIPÓTESIS

Los cambios observados en la ocurrencia de las lluvias en el norte de México están siendo influenciados de manera dominante por las variaciones oceánico-atmosféricas que suceden en el Pacífico Nororiental y en el Atlántico, y existe una relación significativa entre las tendencias de lluvia y la incidencia de incendios forestales.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Área de Estudio

En este estudio, el norte de México comprende los Estados de: Baja California, Baja California Sur, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Sinaloa, Durango, Nuevo León y Tamaulipas. Por ser un área muy extensa, se decidió agrupar a las estaciones meteorológicas localizadas en estos estados en función de los límites de las cuencas hidrológicas abarcando, para algunos casos, únicamente fracciones de los mismos (Figura 1).

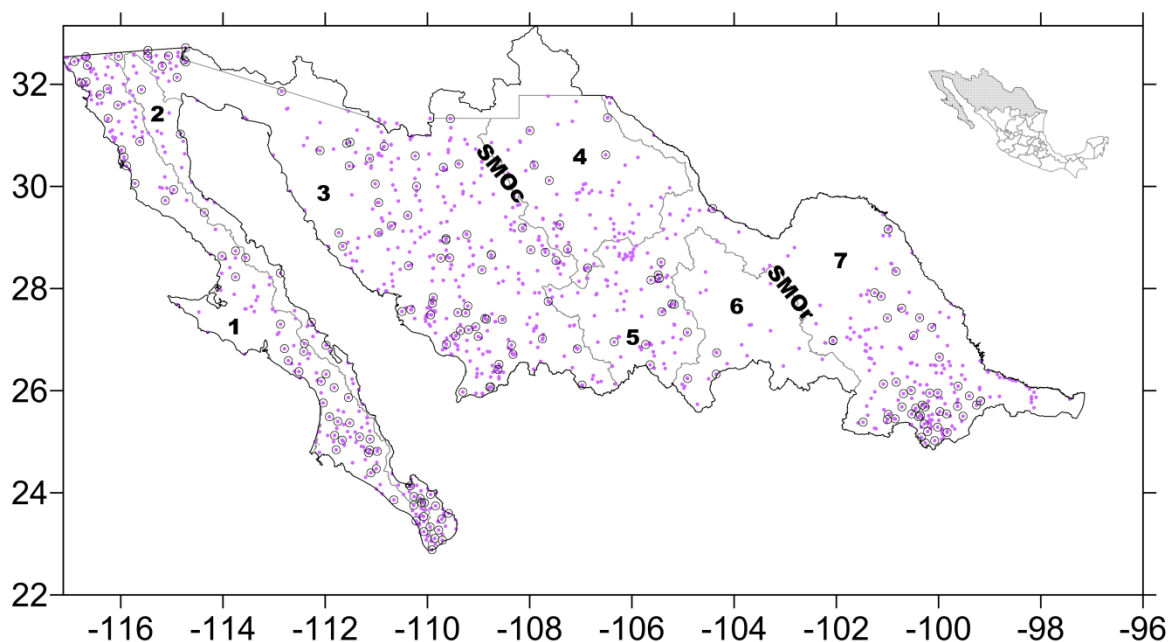


Figura 1. Distribución de las estaciones climatológicas (puntos) en la zona de estudio (región sombreada en el mapa pequeño). Los círculos muestran la posición de las estaciones con más de 40 años de datos (datos cuyos registros fueron utilizados para el análisis de tendencias realizado por Brito-Castillo (2012)). Las líneas grises en el mapa principal representan las vertientes principales dentro de la zona de estudio., SMOc=Sierra Madre Occidental; SMOr=Sierra Madre Oriental; 1=Vertiente Peninsular del Pacífico; 2=Vertiente Peninsular del Golfo de California; 3=Vertiente continental del Golfo de California; 4=Cuencas cerradas del Norte; 5=Cuenca del Río Conchos; 6=Cuatro Ciénegas Coahuila; 7=Vertiente continental del Golfo de México.

6.2 Metodología

Se utilizaron series de datos diarios de precipitación acumulada en 24 hrs actualizados hasta el 2011 que fueron proporcionadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la base única de datos atmosféricos e hidrológicos que posee esta institución.

6.2.1 Cálculo de acumulados de lluvia mensual, anual y estacional

Para cada serie se calculó el acumulado mensual de lluvia a partir de los datos diarios. Para que el acumulado mensual fuera tomado en cuenta el criterio fue que al menos hubiera 80% de datos diarios en cada mes, de no ser así, el mes en cuestión se consideró como dato faltante. A partir de los acumulados mensuales se estimaron para cada serie los acumulados de lluvia para verano e invierno y para todo el año. En este caso, el valor acumulado se consideró válido si el número de meses para cada caso fue completo (6 meses para el estacional y 12 meses para el anual). El verano corresponde a los meses de mayo a octubre de cada año, invierno del mes de noviembre al mes de abril del año posterior, y finalmente el periodo anual del mes de mayo al mes de abril del año posterior. El año de referencia para los acumulados de invierno y anual corresponde al año posterior, por ejemplo un periodo invernal que comienza en noviembre de 1990 y termina en abril de 1991, correspondería al invierno de 1991.

6.2.2 Cálculo de Series Promedio Regionales (SPP)

Las series, con 5 o más años de registros, cuyas estaciones se localizaron en una misma vertiente (delimitada por los parteaguas de las cuencas) fueron agrupadas en un mismo conjunto “denominado región”, de manera que se obtuvieron 7 grupos o regiones distintos. Cada grupo incluye las series de acumulados de lluvia ordenadas en matrices. Tres matrices por grupo (para verano, invierno y anual). La distribución fue como sigue: 162 pertenecen al grupo o región 1; 53 a la región 2; 302 a la región 3; 55 a la región 4; 76 a la región 5; 21 a la región 6 y 178 a la región 7, dando un total de 847 series (ver Figura 1).

La Serie Promedio Regional (SPP), para cada grupo y para cada período (de verano, invierno y anual) se estimó con la siguiente fórmula:

$$X_i = [(X_{anSt}) (DEan)] + X_{an} \quad (1)$$

donde X_i , es la SPP; X_{anSt} , es el promedio para cada año de los valores estandarizados de las series que pertenecen a cada grupo; $DEan$ y X_{an} , son la desviación estándar y el promedio para cada año de los valores de estas mismas series sin estandarizar, respectivamente.

La fórmula (1) toma en cuenta la varianza colectiva de las series en cada grupo (elementos $DEan$ y X_{an}) y la varianza individual (X_{anSt}). Este último elemento corresponde a los valores estandarizados de las series. La estandarización de las series se realiza debido a que algunas series por ser muy cortas pueden mostrar una mayor variabilidad que otras que son más largas, por ejemplo cuando ocurre un evento extremo durante el período corto de observaciones. Por lo general, el evento extremo se impone en el cálculo, al estandarizar la serie los valores resultantes son comparables tanto al interior de la serie como entre las series.

La fórmula (1) se obtiene por despeje de la siguiente fórmula:

$$St = (X_i - X) / DEX_i \quad (2)$$

donde St , es el valor estandarizado de la serie individual; X_i , es cada valor de la serie individual, X y DEX_i , son el promedio y la desviación estándar de la serie individual, respectivamente. Despejando X_i de (2) Se obtiene (1). Obsérvese que al despejar, los elementos St , X y DEX_i de (2) se interpretan de un modo distinto para poder calcular X_i , que en (1) representa cada valor de SPP.

Las gráficas de las SPP con tendencia estadísticamente significativa se muestran en las figuras 2-5.

La tabla I muestra las características estadísticas de las SPP (valores mínimo y máximo, desviación estándar, coeficiente de variación, asimetría, autocorrelación).

Análisis de tendencia lineal:

A las SPP se les ajustó una línea de tendencia mediante el uso de las fórmulas siguientes:

$$T_{est} = a + b t, \quad (3)$$

donde a=ordenada al origen; b=pendiente de la línea ajustada t=predictor tiempo.

$$b = [\sum((t - \bar{t})T_t)] / [\sum((t - \bar{t})^2)], \quad (4)$$

donde \bar{t} =valor promedio T_t =valor de la precipitación al tiempo t.

Desviación estándar de la tendencia estimada o Varianza de la distribución de b:

$$\text{Var}(b) = [\sigma^2] / [\sum((t - \bar{t})^2)], \quad (5)$$

donde σ^2 =valor poblacional para la varianza de los residuales, pero como no se conoce se utiliza MSE (Error cuadrado promedio).

$$\text{MSE} = [\sum(e^2)] / (n-2), \quad (6)$$

de manera que la ecuación (3) resultaría de la siguiente forma:

$$\text{Var}(b) = (\text{SE})^2 = \text{MSE} / [\sum((t - \bar{t})^2)], \quad (7)$$

donde SE es la raíz cuadrada de Var(b), es decir el error estándar de la tendencia estimada.

Intervalo de confianza para determinar significancia al 95%:

$$b \pm 2(\text{SE}), \quad (8)$$

donde se determina significancia en caso de que el intervalo no incluya al cero.

Se calcularon los residuales para las series que resultaron estadísticamente significativas al 95%.

También se realizó un análisis de autocorrelación a las SPP, con el fin de determinar el tamaño de muestra efectivo, y tomarlo en cuenta en el análisis de la significancia estadística de la tendencia lineal ajustada, tal como se sugiere en (Wigley, 2006):

$$n_{eff} = n (1-r_1) / (1+ r_1), \quad (9)$$

donde n=tamaño de muestra y r_1 =autocorrelación de los residuales.

$$\text{Asimetría: } Cs = \frac{1}{n} \sum^n (Ki-1)^3 / [Cv^3(n-1)(n-2)], \quad (10)$$

donde Ki =Valor de la serie dividida entre su media

Cv =Coeficiente de variación y n =Cantidad de datos de la serie.

La tabla II muestra los resultados del ajuste de una línea de regresión (o de tendencia) por el método de mínimos cuadrados a las SPP.

Se realizaron pruebas de Student (t) y de Fisher (F) a las 21 series (analizando todas las posibles combinaciones por pares entre las SPP) para verificar que las medias y las varianzas entre las SPP fueran iguales (ver Tablas III a-c). Los resultados de este análisis se muestran en la tabla III-a para las SPP anuales, en la tabla III-b para las SPP de invierno, y III-c para las SPP de verano. Si las medias y las varianzas resultaron iguales (la hipótesis nula fue correcta), entonces en lugar de considerar dos zonas se consideró una sola para cada par analizado.

A cada SPP se le ajustó una línea de regresión para estimar si la pendiente lineal ajustada por el método de mínimos cuadrados era estadísticamente significativa a un nivel de significancia del 95%.

Los análisis posteriores se realizaron únicamente a las SPP con tendencias positivas estadísticamente significativas al 95%.

6.2.3 Contribución de los índices climáticos a la varianza de la precipitación regional

Una vez detectada la existencia de tendencias de lluvia estadísticamente significativas, se buscó esclarecer las causas, y una posible explicación sería la ocurrencia de teleconexiones, como es el caso de los índices climáticos. Para tal causa se seleccionaron los siguientes: El Índice de Presión de la Baja de las Aleutianas (ALPI-Aleutian Low Pressure Index por sus siglas en inglés), el Índice Multidecenal del Atlántico (AMO-Atlantic Multidecadal Oscillation), la Oscilación del Atlántico Norte (NAO- North Atlantic Oscillation), el Índice Oceánico de El Niño (ONI- Oceanic Niño Index), el Índice del Pacífico Norte (NPI-North

Pacific Index) y la Oscilación Decenal del Pacífico (PDO- Pacific Decadal Oscillation). La gran mayoría de estos índices son de variaciones de baja frecuencia, es decir que sus oscilaciones suceden en periodos extensos (oscilaciones interdecenales por ejemplo).

Índice de Presión de la Baja de las Aleutianas (ALPI): El ALPI es un índice atmosférico de baja frecuencia que mide la intensidad relativa del sistema de baja presión de las Aleutianas del Pacífico Norte y se calcula como el área promedio en km² de presión a nivel del mar ≤ 100.5 kPa y se expresa como una anomalía media, donde valores positivos indican una baja aleutiana relativamente fuerte o intensa y viceversa (Beamish *et al.* 1997).

Los datos anuales del ALPI fueron descargados de <http://www.pac.dfo-mpo.gc.ca/science/species-especies/climatology-ie/coriirco/indices/alpi.txt> (noviembre de 2012). Tanto para el cálculo del periodo común con las SPP anuales y de verano se trabajó con promedios móviles a 5 años, debido a que la información solo presentaba un dato por año por lo que no fue posible separar el período de verano (que comprende los meses de mayo a octubre).

Oscilación Multidecenal del Atlántico (AMO): El AMO es un índice oceánico de baja frecuencia (con oscilaciones de 20 a 40 años de duración) que consiste en una serie de cambios de larga duración en la temperatura superficial del mar en el Atlántico Norte, se caracteriza por fases positivas (temperaturas relativamente cálidas) y negativas (temperaturas relativamente frías) con duraciones de 20 a 40 años y es conocido que afecta a las temperaturas y lluvias de Europa y Norteamérica. (NOAA, 2005).

Los datos mensuales del AMO fueron descargados de <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/> (noviembre de 2012). Se obtuvo un promedio anual (para el periodo común con las SPP anuales) y un promedio por año tomando en cuenta el periodo de mayo a octubre (para el periodo común con las SPP de verano), después se calcularon los promedios móviles y en ambos casos se eligió el de 7 años.

Oscilación del Atlántico Norte (NAO): El NAO es un índice atmosférico que puede ser considerado de baja frecuencia. La variabilidad climática de invierno en la región del Atlántico Norte está dominada principalmente por el NAO, que se extiende desde Norteamérica central a Europa y más hacia el Norte de Asia. Aunque este índice varía de un año a otro, también puede permanecer, a manera de tendencia, en una fase por intervalos que duran muchos años. En su fase positiva ocurre un centro de alta presión subtropical inusualmente fuerte sobre el archipiélago Azores y una baja presión Islandesa más profunda de lo normal. La fase negativa muestra una alta subtropical débil y una baja Islandesa débil (sitio web en <http://www.ldeo.columbia.edu/res/pi/NAO/>, diciembre de 2012).

Los datos diarios del NAO fueron descargados de <ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/cwlinks/norm.daily.nao.index.b500101.current.ascii> (diciembre de 2012). Se obtuvo un promedio anual (para el periodo común con las SPP anuales) y un promedio por año tomando en cuenta el periodo de mayo a octubre (para el periodo común con las SPP de verano), después se calcularon los promedios móviles y en ambos casos se eligió el de 7 años.

Índice del Pacífico Norte (NPI): El NPI es un índice atmosférico que puede ser considerado de baja frecuencia y que está asociado a la presión del nivel del mar en la región 30°N-65°N, 160°E-140°W. El NPI mide variaciones de la circulación atmosférica correspondientes a periodos de interanuales a decenales. La relación océano-atmósfera dominante en el Pacífico Norte consiste en que cambios atmosféricos conllevan a cambios en la temperatura superficial del mar (TSM) durante uno a dos meses; sin embargo también existen fuertes relaciones con eventos en el Pacífico Tropical (los cambios en las TSM en el Pacífico Tropical gobiernan la TSM en el Pacífico Norte por tres meses). (Hurrell y NCAR, 2013).

Los datos mensuales del NPI fueron descargados de <https://climatedataguide.ucar.edu/es/guidance/north-pacific-index-npi-trenberth-and-hurrell-monthly-and-winter> (diciembre de 2012). Se obtuvo un promedio anual (para el

periodo común con las SPP anuales) y un promedio por año tomando en cuenta el periodo de mayo a octubre (para el periodo común con las SPP de verano), después se calcularon los promedios móviles y en ambos casos se eligió el de 7 años.

Índice Oceánico de El Niño (ONI): El ONI es un índice estándar (de carácter oceánico) utilizado para identificar las fases cálidas y frías del Niño en la región del Pacífico Tropical y es el corrimiento de las anomalías promedio de la temperatura superficial del mar de tres meses, particularmente del Niño 3.4 (i.e., 5°N-5°S, 120°-170°W). Para este índice se considera un evento cuando durante 5 meses consecutivos se registra una anomalía de 0.5° o más (fase cálida o El Niño) o de 0.5° o menos (fase fría o La Niña). Los eventos se categorizan en débiles (anomalías de temperatura superficial del mar de 0.5 a 0.9), moderados (de 1 a 1.4) y fuertes (mayores o iguales a 1.5). (Golden Gate Weather Services, 2012).

Los datos del ONI fueron descargados de <http://ggweather.com/enso/oni.htm> (enero de 2013), organizados en temporadas y con un valor para cada tres meses, esto es, comienza en el periodo 1950-1951 con un valor para los meses junio-agosto de 1950, continua en julio-septiembre y agosto-octubre y así sucesivamente hasta llegar al trimestre mayo-julio de 1951. Para la obtención del periodo común con las SPP anuales se calculó un promedio anual tomando en cuenta el periodo de enero-marzo a octubre-diciembre. Se trabajó con estos promedios y también con promedios móviles a 7 años, debido a la suavización de la variabilidad interanual que contiene este índice. Para la obtención del periodo común con las SPP de verano se obtuvo un promedio por año tomando en cuenta el periodo de mayo-julio a agosto-octubre. Del mismo modo se trabajó con estos promedios y también con promedios móviles a 7 años.

Oscilación Decenal del Pacífico (PDO): El PDO es un índice oceánico de baja frecuencia (con oscilaciones que duran de 20 a 30 años) basado en los patrones de variación de la temperatura superficial del mar en el Pacífico Norte. Se cuenta con datos de PDO desde el año 1900 a la fecha (Mantua *et al.* 1997). Las fases cálida y fría (o positiva y negativa respectivamente) de este índice están en función del signo de la temperatura superficial del

mar (anomalías de la costa del Pacífico Norteamericano) y resultan de la dirección de los vientos de invierno del Pacífico Norte. Si los vientos soplan principalmente del sureste, la temperatura superficial del mar en la corriente de California del Norte es relativamente cálida. Cuando los vientos soplan principalmente del Norte las condiciones de la zona citada son relativamente frías. En la fase cálida del PDO las aguas del Pacífico oriental se encuentran a temperaturas relativamente altas, mientras que en el norte y en el sur las aguas están frías. En la fase fría las mayores temperaturas se localizan al norte y al sur del Pacífico occidental (sitio web en <http://www.nwfsc.noaa.gov/research/divisions/fed/oeip/ca-pdo.cfm>, diciembre de 2012).

Los datos mensuales del PDO fueron descargados de ftp://ftp.atmos.washington.edu/mantua/pnw_impacts/INDICES/PDO.latest (diciembre de 2012). Se obtuvo un promedio anual (para el periodo común con las SPP anuales) y un promedio por año tomando en cuenta el periodo de mayo a octubre (para el periodo común con las SPP de verano), después se calcularon los promedios móviles y en ambos casos se eligió el de 7 años.

En cada SPP se identificaron los años en que hubo registros extremos de precipitación (superiores o iguales a:

$$X_{\text{promSPP}} + 2 \text{ DE}, \quad (11)$$

donde X_{promSPP} es la media de SPP y DE es su desviación estándar) y se analizó la estructura de las SPP para averiguar si había correlación con la estructura (fases) de las series de los diferentes índices climáticos. También se identificaron las estaciones meteorológicas que en años correspondientes a los registros extremos de precipitación mostraron registros superiores o iguales a

$$X_{i_prom} + 2 \text{ DE}_i, \quad (12)$$

donde X_{i_prom} es la media de precipitación en la i -ésima estación y DE_i su desviación estándar. Se obtuvo el porcentaje de estaciones con registros extremos de precipitación en

relación a (A) el número total de estaciones ubicadas en la zona y (B) al número de estaciones con registro en cada año (Tablas IV a-d), con la finalidad de inspeccionar si un evento extremo se registró en más de una estación y averiguar cómo estaban distribuidas las estaciones que mostraron el evento; se elaboraron mapas en Surfer 9 de la distribución de las estaciones con registros extremos para cada año de lluvia extrema de cada SPP (Figuras 6-9).

Cada índice climático se filtró con la técnica de promedios móviles a 3, 5 y 7 años y se eligió la ventana que mejor reflejara las fases o ciclos de cada índice. La estructura de las SPP se comparó con la estructura de los índices climáticos seleccionados filtrados mediante gráficas elaboradas en Surfer 9 (Figuras 10 a la 12).

Se realizó un análisis de correlación entre las SPP y los índices climáticos filtrados con promedios móviles (Tabla V), sin embargo se sabe que algunos índices climáticos varían lentamente por ello se hizo el mismo análisis pero ahora filtrando también las SPP con la técnica de promedios móviles (a 7 años) a fin de comparar las series contemplando únicamente las oscilaciones de baja frecuencia (Tablas VI a-d). Del mismo modo se hicieron gráficas en Surfer 9 (Figuras 13 a 16).

6.2.4 Influencia ciclónica sobre los valores extremos de precipitación

Si los eventos extremos de lluvia ocurren al inicio o al final de la serie pueden incidir en la dirección que toma la pendiente lineal ajustada, particularmente cuando un grupo de estos eventos ocurren de manera consecutiva. Los eventos extremos pueden ser causados por ciclones tropicales. Para determinar si las tendencias de lluvia (analizando particularmente los valores extremos de precipitación) estuvieron influenciadas por eventos ciclónicos se trazó un círculo de 1000 km de diámetro (tomando en cuenta la forma esférica del planeta) centrado en un sitio arbitrario sobre la costa, tanto del Océano Pacífico como del Atlántico. Este análisis se realizó en ArcView (GIS 3.2a). Se identificaron las trayectorias de los ciclones que cruzaron el círculo trazado (para el Atlántico la base de datos de ciclones abarcó del año 1902 a 2012 y para el Pacífico de 1949 a 2012), anotando las fechas de inicio y fin (Tablas VII a-d); Este primer análisis permitió identificar los ciclones tropicales

que potencialmente pudieron contribuir a la ocurrencia de valores extremos de precipitación en las SPP cuya tendencia fue significativa. En un análisis posterior se verificó si para las fechas de ocurrencia de los ciclones identificados las estaciones registraron valores extremos (Tablas VIII a-d). En caso afirmativo, estos registros se asociaron a la ocurrencia del ciclón. En caso contrario, se consideró que el ciclón tropical no tuvo efecto en la ocurrencia de los valores extremos de precipitación.

Una vez hecho esto, se verificó si los ciclones identificados tuvieron efecto en los valores extremos de precipitación registrados en las estaciones meteorológicas. Para este análisis se tomaron en cuenta los siguientes criterios (correspondientes a las fechas en que sucedieron los ciclones):

Media histórica diaria, calculada como el promedio de lluvia (en mm) de registros históricos correspondientes a cada día del año para cada estación; desviación estándar histórica diaria (DE) para cada día; la cantidad de años (CA) utilizada para el cálculo de cada media histórica diaria.

Se obtuvo un acumulado de valores medios históricos diarios (acotado al periodo de ocurrencia de cada ciclón), de CA, de DE y de registros diarios de lluvia (rpp), por cada estación. Con esto se calcularon intervalos de confianza, dados por la siguiente fórmula:

$$\sum \text{media} \pm (\text{distribución}) (\text{error estándar}) \quad (13)$$

$$\text{Error estándar} = \sum \text{DE} / \sqrt{\sum \text{CA}} \quad (14)$$

Se utilizó la distribución de Student de una sola cola (el valor corresponde a 1.645) ya que el interés era únicamente en los valores estadísticamente significativos superiores a la media, esto es determinar cuáles acumulados de rpp eran significativamente mayores que los acumulados de la media histórica diaria correspondiente. Si los acumulados de rpp eran significativamente superiores al valor acumulado de la media histórica diaria, entonces este resultado se consideró como evidencia del efecto del evento ciclónico.

Para confirmar que lo observado no estuviera mayormente asociado a algún fenómeno diferente a un ciclón tropical (como por ejemplo lluvias convectivas, orográficas o tormentas convectivas de mesoscala), se analizó (tomando cada ciclón de cada región como un caso particular) la distribución de las estaciones que registraron datos acumulados de rpp superiores al valor acumulado de la media histórica diaria; si el área afectada era extensa entonces se diría que efectivamente hubo afectación ciclónica. Esto mediante graficas realizadas en Surfer 9 (Se graficaron sólo los casos con sospechas de influencia ciclónica) (Figuras 17 y 18).

6.2.5 Análisis detallado entre series de precipitación individuales e incendios forestales

Una vez teniendo claro lo referente a los patrones regionales de lluvia y sus tendencias, lo siguiente fue estudiar las posibles relaciones entre ellos y la ocurrencia de incendios forestales. En esta parte del trabajo se analizaron de manera simultánea las estructuras de las series con tendencias significativas de precipitación y de incendios forestales en los Estados de la zona de estudio y ya no se trabajó con las SPP sino únicamente con aquellas series de lluvia acumulada con tendencia positiva estadísticamente significativa al 95%. En esta parte del estudio se trabajó únicamente con series de más de 30 años de registros, aunque cabe mencionar que los análisis de correlación se hicieron para el periodo común, que aun así, salvo en un caso, todos fueron de más de 20 años. La razón de hacerlo así fue porque la información de incendios forestales está en función de los límites estatales y las SPP no, lo que dificultaría relacionar ambas series, por eso las series de lluvia con tendencias significativa de las estaciones localizadas al interior de cada Estado se tomaron como representativas para cada caso.

Se tomaron los reportes anuales de incendios de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), particularmente los reportes de datos acumulados, donde la información se presenta por Estado y se tomaron en cuenta las siguientes variables a) el número de incendios, b) la superficie afectada por incendio (en Ha) y c) la efectividad del incendio

(superficie afectada/incendio, dado en ha). El periodo de datos tomado en cuenta fue de 1970 a 2008.

Con esta información se hizo un análisis de correlación con desfases entre las series de incendios forestales y las series de lluvia acumulada (Tabla IX) y después para tratar de comprender los resultados se realizaron análisis de correlación con desfases entre las series de incendios y los índices climáticos seleccionados (utilizando los datos sin filtro) (Tabla X).

Se graficaron en Surfer 9 las series de incendios junto con las series de índices climáticos (con valores de promedio anuales, no promedios móviles) (Figuras 19-24), para analizar la estructura de las series y buscar alguna relación. Aquí se presentan solo los resultados más sobresalientes.

Se realizaron análisis de correlación con desfases entre las series de lluvia y los índices climáticos seleccionados (Tabla XI).

En todos los casos los análisis de correlación se hicieron por periodo común.

7. RESULTADOS

7.1 Series promedio regionales (Tablas I-III)

Se obtuvieron 7 SPP cuyas características estadísticas se presentan en la tabla I. Los resultados del ajuste de una línea de regresión por el método de mínimos cuadrados a las SPP se muestran en la tabla II.

Analizando las tablas I y II se observa que:

Periodo anual: Los valores mínimos se encuentran entre 10.5 mm (Región 1) y 103 mm (Región 4), mientras que los máximos van de 628 mm (Región 1) a 1900 mm (Región 7). La desviación estándar está en un rango de 164 mm (Región 1) y 329 mm (Región 7). Los coeficientes de variación, en general presentan valores alrededor de 0.6 y la asimetría fue

positiva en todas las regiones (Tabla I). Se encontró significancia en la pendiente de la región 4 (Tabla II).

Periodo de invierno: Los valores mínimos se encuentran entre 0.030 mm (Región 5) y 12.4 mm (Región 7), mientras que los máximos van de 282 mm (Región 6) a 619 mm (Región 3). La desviación estándar está en un rango de 64.0 mm (Región 6) y 144 mm (Región 1). Los coeficientes de variación, en general presentan valores alrededor de 1 y la asimetría fue positiva en todas las regiones (Tabla I). Se encontró significancia en la pendiente de la región 4 (Tabla II).

Tabla I. Características estadísticas de las Series Promedio Regionales de Precipitación (SPP)., an=anual, wtr=invierno, smr=verano, N=longitud de SPP, DE=desviación estándar, Cv= coeficiente de variación.

SPP	N	Media	Mínimo	Máximo	DE	Cv	Asimetría
SPP1 an	68	207	10.5	628	164	0.793	0.923
SPP2 an	70	274	14.2	902	202	0.738	0.992
SPP3 an	83	483	83	1310	262	0.543	1.1
SPP4 an	45	359	103	853	177	0.494	1.29
SPP5 an	57	404	20.9	955	239	0.59	0.768
SPP6 an	40	332	78.2	992	189	0.568	1.09
SPP7 an	73	501	72.4	1900	329	0.657	1.64
SPP1 wtr	62	135	0.677	592	144	1.06	1.47
SPP2 wtr	58	85.7	0.255	405	97	1.13	1.55
SPP3 wtr	78	132	0.11	619	134	1.02	1.81
SPP4 wtr	48	67.6	0.314	316	75.4	1.12	2
SPP5 wtr	53	61	0.033	397	74.1	1.22	2.55
SPP6 wtr	44	55.7	1.01	282	64	1.15	1.74
SPP7 wtr	78	118	12.4	478	110	0.932	1.63
SPP1 smr	64	104	5.31	389	102	0.975	1.39
SPP2 smr	69	227	5.89	798	197	0.868	1.42
SPP3 smr	84	376	95.8	1310	196	0.522	1.54
SPP4 smr	49	293	20.4	766	153	0.524	1.03
SPP5 smr	61	354	2.95	1020	210	0.592	0.928
SPP6 smr	47	288	3.36	658	161	0.559	0.207
SPP7 smr	78	404	0.541	1530	301	0.745	1.74

Periodo de verano: Los valores mínimos se encuentran entre 0.54 mm (Región 7) y 95.8 mm (Región 3), mientras que los máximos van de 389 mm (Región 1) a 1530 mm (Región 7). La desviación estándar está en un rango de 102 mm (Región 1) y 301 mm (Región 7). Los coeficientes de variación, en general presentan valores alrededor de 0.5 y la asimetría fue positiva en todas las regiones (Tabla I). Se encontró significancia en la pendiente de las regiones 1 y 7 (Tabla II).

Tabla II. Resultados del ajuste de una línea de tendencia por el método de mínimos cuadrados a las Series Promedio Regionales (SPP). Los casos marcados en negritas cursivas son estadísticamente significativos., a=intercepto al origen, b=precipitación, DE=desviación estándar y α -level=significancia estadística.

SPP	Intercepto	Año		
	a	b (mm/año)	DE	α -level
SPP1 an	-2490	1.37	0.81	0.096
SPP2 an	-536	0.411	1	0.683
SPP3 an	-821	0.662	1.19	0.58
SPP4 an	-4170	2.3	1.04	0.033
SPP5 an	-1960	1.2	1.31	0.362
SPP6 an	2880	-1.3	1.23	0.298
SPP7 an	-3570	2.07	1.58	0.195
SPP1 wtr	-2620	1.4	0.737	0.062
SPP2 wtr	-987	0.545	0.525	0.304
SPP3 wtr	-550	0.346	0.627	0.583
SPP4 wtr	-1730	0.915	0.433	0.04
SPP5 wtr	-1150	0.616	0.415	0.144
SPP6 wtr	-55.7	0.057	0.402	0.889
SPP7 wtr	-1090	0.614	0.512	0.234
SPP1 smr	-2340	1.24	0.505	0.017
SPP2 smr	-773	0.508	0.982	0.607
SPP3 smr	208	0.085	0.888	0.924
SPP4 smr	-3040	1.7	0.88	0.06
SPP5 smr	478	-0.063	1.12	0.955
SPP6 smr	1770	-0.751	0.972	0.443
SPP7 smr	-5420	2.96	1.37	0.034

En total son 4 SPP que muestran pendientes significativas al 95%: Región 4 anual (Cuencas cerradas del Norte), Región 4 invierno, Región 1 verano (Vertiente peninsular del Pacífico)

y Región 7 verano (Vertiente continental del Golfo de México). A partir de estos resultados se obtuvieron las series residuales y su autocorrelación. La autocorrelación de los residuales resultó no ser significativa en ninguna de los casos, sin embargo en el caso de la pendiente de la región 4 invierno se sospechó que si pudiera existir correlación significativa, debido a que se obtuvo un valor R de -0.258 , que fue muy cercano a los límites del intervalo de confianza. Para esclarecer la sospecha se calculó (para la pendiente de la región 4 invierno) n efectiva y se ajustó también el error estándar y de acuerdo a lo observado, el resultado fue que no existe suficiente evidencia para decir que la pendiente de la región 4 invierno es significativa. Por lo tanto las series que finalmente se consideraron con significancia estadística fueron: Región 4 anual, Región 1 verano y Región 7 verano (Figuras 2-4).

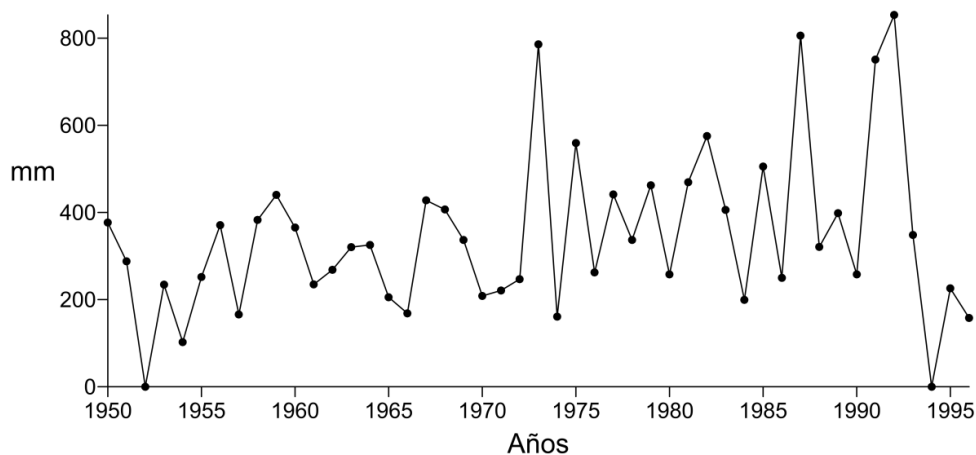


Figura 2. Serie promedio regional anual de la zona 4.

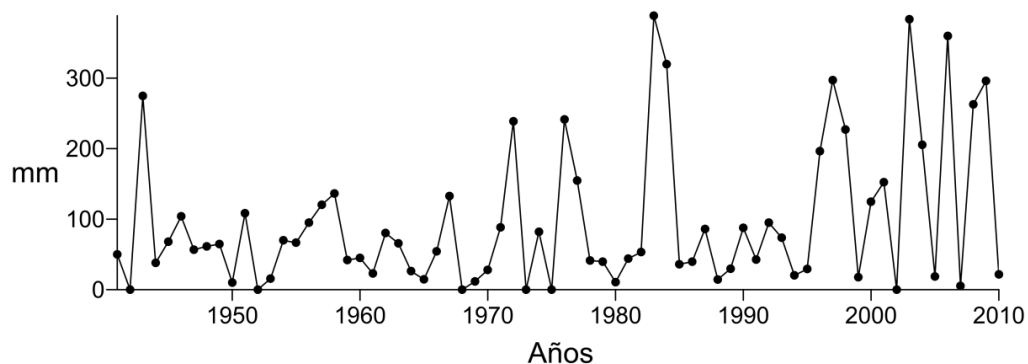


Figura 3. Serie promedio regional de verano de la zona 1.

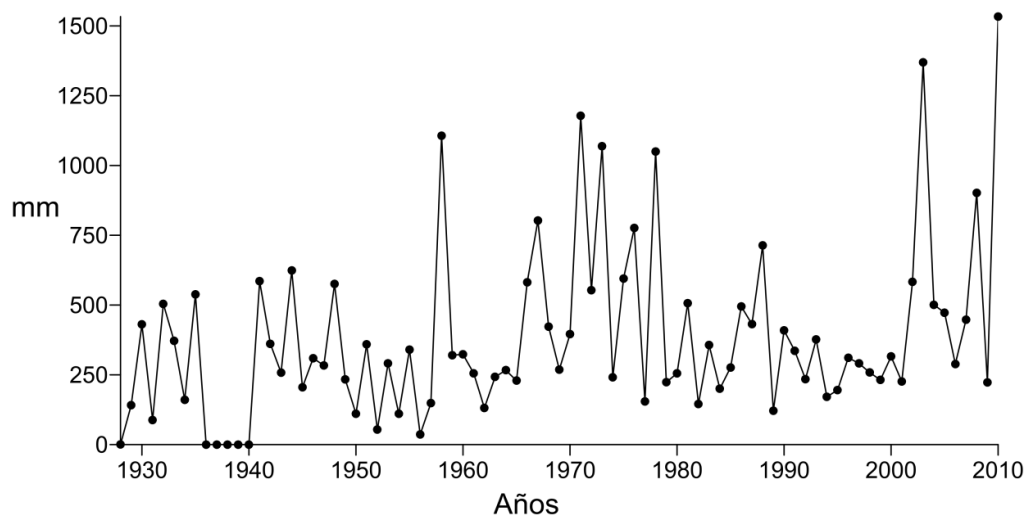


Figura 4. Serie promedio regional de verano de la zona 7.

En las tablas III a-c se muestran los resultados de las pruebas de Fisher y Student para comparar las medias y las varianzas de las SPP.

Se encontraron series sin diferencias para los tres períodos (anual, invierno y verano), lo cual indica que estas series pueden agruparse en una sola región, puesto que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en sus valores estadísticos (medias y varianzas).

Se revisó si alguno de los casos incluyó alguna serie significativa y se encontró uno: las series 4 y 6 anuales resultaron sin diferencias, por lo tanto se consideró que la serie 6 anual (SPP6 an) comparte características con la SPP4 an y por ello deben ser consideradas como una misma región, por lo tanto SPP6 an (Figura 5) se incluyó en los análisis junto con las otras tres series significativas. De aquí en adelante todos los análisis se dedicaron únicamente a las SPP significativas (SPP1 smr, SPP4 an, SPP7 smr y SPP6 an), las cuales se describen a continuación.

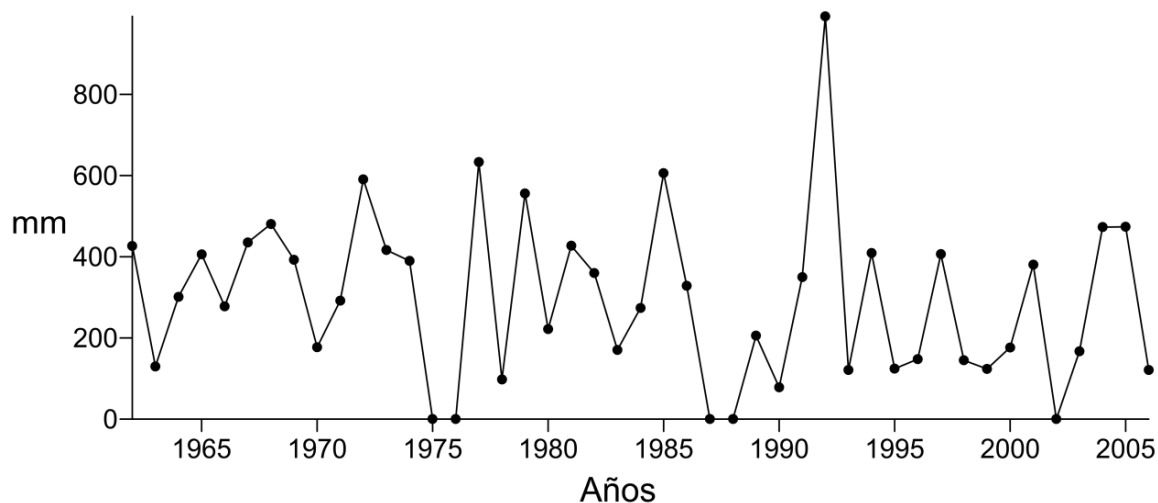


Figura 5. Serie promedio regional anual de la zona 6.

7.1.1 Región 4 (Cuencas cerradas del Norte) anual (SPP4 an)

Comprende del año 1950 a 1996. Al graficar esta serie regional (Figura 2) se observa que a partir de 1973 cambia la estructura de la serie mostrando amplitudes mayores que el período anterior (es decir, la diferencia entre los valores mínimos y máximos de la serie aumenta en el período más reciente, posterior a 1973). Esta estructura indica una clara tendencia hacia el incremento de las precipitaciones. Particularmente, se aprecian valores altos en los años 1973, 1975, 1982, 1987, 1991 y 1992; asimismo valores relativamente bajos en los años 1974 y 1994. Se calculó la desviación estándar de la serie promedio regional (177 mm) y se registraron los años extremos, es decir aquellos años en los que la

ocurrencia de valores de precipitación igualaran o superaran la cantidad dada por la formula (11) porque estos serían significativos al 95%, tales años fueron 1973, 1987, 1991 y 1992 (Tabla IV-a). Al analizar el porcentaje de estaciones individuales con dato localizadas en la región 4 se aprecia que durante estos años hubo varias estaciones que muestran valores extremos correspondientes, pero su cantidad es modesta y no superan el 30 % en todos los años (Tabla IV-a). En los años 1973, 1987 y 1991 las estaciones con valores extremos se distribuyen de manera general en la mayor parte de la región, concentrándose un poco en la parte sur (Figura 6 a-c)), mientras que en 1992 se observa una disminución del número de estaciones con valores extremos (Figura 6 d).

7.1.2 Región 1 (Vertiente peninsular del Pacífico) verano (SPP1 smr)

Comprende del año 1941 a 2010. La Figura 2 muestra que entre 1972 y 2010 hay una mayor frecuencia de valores altos en la serie regional que en años anteriores siendo la última década la de mayor ocurrencia. Los valores altos se observan en 1943, 1972, 1976, 1983, 1984, 1996, 1997, 1998, 2003, 2006, 2008 y 2009. Se calculó la desviación estándar de la serie promedio regional (102 mm) y se registraron los años extremos, porque estos serían significativos al 95%, tales años fueron 1983, 1984, 2003 y 2006 (Tabla IV-b). La Tabla IV-b muestra el porcentaje de estaciones individuales localizadas en la región 1 que registraron valores extremos de precipitación en los años indicados. Al igual que en la región 4, este porcentaje es modesto (poco más del 30% en 1983, pero inferior al 20% en los demás años). En el año 1983 las estaciones con valores extremos se observan predominantemente en la mitad sur de la región y algunas otras en la parte norte (Figura 7 a)). En 1984, 2003 y 2006 sucede algo similar a 1983, con la diferencia de que en estos años también se aprecian algunos casos en la parte centro de la región (Figuras 7 b)-d)).

7.1.3 Región 7 (Vertiente continental del Golfo de México) verano (SPP7 smr)

Comprende del año 1928 a 1935 y de 1941 a 2010. La serie promedio de esta región (SPP7 smr) muestra una estructura muy diferente a las dos regiones anteriores (ver Figura 4). En este caso, la ocurrencia de valores altos parece intercalarse entre décadas (por ejemplo, los periodos comprendidos de 1958 a 1978 y de 2003 a 2010 muestran una mayor ocurrencia

de valores altos que en los otros períodos de la serie). Esta estructura indica que la incidencia de valores altos en esta serie puede estar gobernada por fluctuaciones de baja frecuencia (medidas en décadas). Los valores altos aparecen en los años 1958, 1967, 1971, 1973, 1976, 1978, 2003, 2008 y 2010. Se calculó la desviación estándar de la serie promedio regional (301 mm) y se registraron los años con valores extremos, porque estos serían significativos al 95%, tales años fueron 1958, 1971, 1973, 1978, 2003 y 2010 (Tabla IV-c). Las estaciones individuales localizadas en esta región y que registraron dato en los años indicados muestran valores extremos en el 31.5%, 37.9% y cerca del 45% de los casos en 1958, 1971 y 2010 respectivamente. En los años restantes el porcentaje de estaciones que registraron valores extremos es inferior al 30% (Tabla IV-c). En los años 1958 y 1971 las estaciones con valores extremos se observan predominantemente en la parte centro sur de la región (Figuras 8 a)-b)). En 1973 también se observan los valores extremos en la parte sur y al avanzar hacia el norte se van dispersando (Figura 8 c)). En 1978 de nuevo se localizan mayormente en el centro sur con varios casos en la costa sureste (Figura 8 d)). En 2003 los valores extremos se distribuyen en toda la mitad sur con algunos casos dispersos hacia el noreste (Figura 8 e)) y en 2010 la cantidad de estaciones con valores extremos disminuye considerablemente (Figura 8 f)).

7.1.4 Región 6 (Cuatro Ciénegas) Coahuila (SPP6 an)

Comprende del año 1962 a 2006, con huecos de información en 1975, 1976, 1987, 1988 y 2002. La SPP no muestra tendencia (Figura 5) pero resulta de interés su análisis debido a que como se mencionó anteriormente esta SPP resultó sin diferencias estadísticamente significativas (medias y varianzas) respecto de la SPP4 an. Se calculó la desviación estándar de la SPP6 an (189 mm) y se registraron los años en que las series individuales de las estaciones localizadas en esta región presentaron valores que igualaron o superaron el umbral dado por la fórmula (11), porque estos serían significativos al 95%. Para las series individuales analizadas, el año 1992 resultó ser un valor extremo registrado en el 45% de las estaciones (Tabla IV-d), las cuales se distribuyen en la zona suroeste de la región (Figura 9).

Tabla III-a. Comparación de medias y varianzas de las SPP anuales. Los valores α -level que fueron estadísticamente significativos se observan en color negro, mientras que los grupos en que las comparaciones resultaron sin diferencias se resaltan en negritas cursivas. Las claves y el número presentados en la primer columna corresponden a cada SPP., an=anual, valor t=valor tabular de Student, razón f varianzas=valor tabular de Fisher y DE=desviación estándar.

Grupo A vs Grupo B	Media Grupo A	Media Grupo B	valor t	Grados de libertad	α -level	N Grupo A	N Grupo B	DE Grupo A	DE Grupo B	Razón f Varianzas	α -level
SPP1 an vs SPP2 an	207	274	-2.13	136	0.035	68	70	164	202	1.51	0.090
SPP1 an vs SPP3 an	207	483	-7.54	149	0.000	68	83	164	262	2.55	0.000
SPP1 an vs SPP4 an	207	359	-4.66	111	0.000	68	45	164	177	1.16	0.572
SPP1 an vs SPP5 an	207	404	-5.45	123	0.000	68	57	164	239	2.11	0.004
SPP1 an vs SPP6 an	207	332	-3.61	106	0.000	68	40	164	189	1.32	0.316
SPP1 an vs SPP7 an	207	501	-6.63	139	0.000	68	73	164	329	4.01	0.000
SPP2 an vs SPP3 an	274	483	-5.43	151	0.000	70	83	202	262	1.68	0.027
SPP2 an vs SPP4 an	274	359	-2.30	113	0.023	70	45	202	177	1.30	0.349
SPP2 an vs SPP5 an	274	404	-3.34	125	0.001	70	57	202	239	1.39	0.189
SPP2 an vs SPP6 an	274	332	-1.49	108	0.140	70	40	202	189	1.15	0.649
SPP2 an vs SPP7 an	274	501	-4.94	141	0.000	70	73	202	329	2.65	0.000
SPP3 an vs SPP4 an	483	359	2.84	126	0.005	83	45	262	177	2.19	0.005
SPP3 an vs SPP5 an	483	404	1.80	138	0.075	83	57	262	239	1.21	0.456
SPP3 an vs SPP6 an	483	332	3.24	121	0.002	83	40	262	189	1.93	0.025
SPP3 an vs SPP7 an	483	501	-0.381	154	0.704	83	73	262	329	1.57	0.047
SPP4 an vs SPP5 an	359	404	-1.07	100	0.285	45	57	177	239	1.82	0.042
SPP4 an vs SPP6 an	359	332	0.669	83	0.505	45	40	177	189	1.14	0.680
SPP4 an vs SPP7 an	359	501	-2.66	116	0.009	45	73	177	329	3.45	0.000
SPP5 an vs SPP6 an	404	332	1.60	95	0.114	57	40	239	189	1.60	0.124

Tabla III a, continuación.

Grupo A vs Grupo B	Media Grupo A	Media Grupo B	valor t	Grados de libertad	α -level	N Grupo A	N Grupo B	DE Grupo A	DE Grupo B	Razón f Varianzas	α -level
SPP5 an vs SPP7 an	404	501	-1.86	128	0.065	57	73	239	329	1.90	0.013
SPP6 an vs SPP7 an	332	501	-2.98	111	0.004	40	73	189	329	3.04	0.000

Tabla III-b. Comparación de medias y varianzas de las SPP de invierno. Los valores α -level que fueron estadísticamente significativos se observan en color negro, mientras que los grupos en que las comparaciones resultaron sin diferencias se resaltan en negritas cursivas. Las claves y el número presentados en la primer columna corresponden a cada SPP., wtr=invierno, valor t=valor tabular de Student, razón f varianzas=valor tabular de Fisher y DE=desviación estándar.

Grupo A vs Grupo B	Media Grupo A	Media Grupo B	valor t	Grados de libertad	α -level	N Grupo A	N Grupo B	DE Grupo A	DE Grupo B	Razón f Varianzas	α -level
SPP1 wtr vs SPP2 wtr	135	85.7	2.19	118	0.030	62	58	144	97.0	2.19	0.003
<i>SPP1 wtr vs SPP3 wtr</i>	<i>135</i>	<i>132</i>	<i>0.148</i>	<i>138</i>	<i>0.882</i>	<i>62</i>	<i>78</i>	<i>144</i>	<i>134</i>	<i>1.15</i>	<i>0.549</i>
SPP1 wtr vs SPP4 wtr	135	67.6	2.96	108	0.004	62	48	144	75.4	3.63	0.000
SPP1 wtr vs SPP5 wtr	135	61.0	3.39	113	0.001	62	53	144	74.1	3.76	0.000
SPP1 wtr vs SPP6 wtr	135	55.7	3.43	104	0.001	62	44	144	64.0	5.04	0.000
SPP1 wtr vs SPP7 wtr	135	118	0.802	138	0.424	62	78	144	110	1.71	0.026
SPP2 wtr vs SPP3 wtr	85.7	132	-2.22	134	0.028	58	78	97.0	134	1.90	0.012
<i>SPP2 wtr vs SPP4 wtr</i>	<i>85.7</i>	<i>67.6</i>	<i>1.06</i>	<i>104</i>	<i>0.293</i>	<i>58</i>	<i>48</i>	<i>97.0</i>	<i>75.4</i>	<i>1.65</i>	<i>0.077</i>
<i>SPP2 wtr vs SPP5 wtr</i>	<i>85.7</i>	<i>61.0</i>	<i>1.50</i>	<i>109</i>	<i>0.137</i>	<i>58</i>	<i>53</i>	<i>97.0</i>	<i>74.1</i>	<i>1.71</i>	<i>0.051</i>
SPP2 wtr vs SPP6 wtr	85.7	55.7	1.78	100	0.079	58	44	97.0	64.0	2.30	0.005

Tabla III-b, continuación.

Grupo A vs Grupo B	Media Grupo A	Media Grupo B	valor t	Grados de libertad	α -level	N Grupo A	N Grupo B	DE Grupo A	DE Grupo B	Razón f Varianzas	α -level
<i>SPP2 wtr vs SPP7 wtr</i>	85.7	118	-1.78	134	0.078	58	78	97.0	110	1.28	0.324
SPP3 wtr vs SPP4 wtr	132	67.6	3.03	124	0.003	78	48	134	75.4	3.15	0.000
SPP3 wtr vs SPP5 wtr	132	61.0	3.50	129	0.001	78	53	134	74.1	3.26	0.000
SPP3 wtr vs SPP6 wtr	132	55.7	3.54	120	0.001	78	44	134	64.0	4.37	0.000
<i>SPP3 wtr vs SPP7 wtr</i>	132	118	0.699	154	0.486	78	78	134	110	1.48	0.086
<i>SPP4 wtr vs SPP5 wtr</i>	67.6	61.0	0.445	99	0.658	48	53	75.4	74.1	1.04	0.899
<i>SPP4 wtr vs SPP6 wtr</i>	67.6	55.7	0.808	90	0.421	48	44	75.4	64.0	1.39	0.278
SPP4 wtr vs SPP7 wtr	67.6	118	-2.79	124	0.006	48	78	75.4	110	2.12	0.006
<i>SPP5 wtr vs SPP6 wtr</i>	61.0	55.7	0.367	95	0.714	53	44	74.1	64.0	1.34	0.325
SPP5 wtr vs SPP7 wtr	61.0	118	-3.30	129	0.001	53	78	74.1	110	2.20	0.003
SPP6 wtr vs SPP7 wtr	55.7	118	-3.44	120	0.001	44	78	64.0	110	2.95	0.000

Tabla III-c. Comparación de medias y varianzas de las SPP de verano. Los valores α -level que fueron estadísticamente significativos se observan en color negro, mientras que los grupos en que las comparaciones resultaron sin diferencias se resaltan en negritas cursivas. Las claves y el número presentados en la primer columna corresponden a cada SPP., smr=verano, valor t=valor tabular de Student, razón f varianzas=valor tabular de Fisher y DE=desviación estándar.

Grupo A vs Grupo B	Media Grupo A	Media Grupo B	valor t	Grados de libertad	α -level	N Grupo A	N Grupo B	DE Grupo A	DE Grupo B	Razón f Varianzas	α -level
SPP1 smr vs SPP2 smr	104	227	-4.44	131	0.000	64	69	102	197	3.73	0.000

Tabla III-c, continuación.

Grupo A vs Grupo B	Media Grupo A	Media Grupo B	valor t	Grados de libertad	α -level	N Grupo A	N Grupo B	DE Grupo A	DE Grupo B	Razón f Varianzas	α -level
SPP1 smr vs SPP3 smr	104	376	-10.1	146	0.000	64	84	102	196	3.71	0.000
SPP1 smr vs SPP4 smr	104	293	-7.83	111	0.000	64	49	102	153	2.27	0.002
SPP1 smr vs SPP5 smr	104	354	-8.52	123	0.000	64	61	102	210	4.24	0.000
SPP1 smr vs SPP6 smr	104	288	-7.34	109	0.000	64	47	102	161	2.49	0.001
SPP1 smr vs SPP7 smr	104	404	-7.60	140	0.000	64	78	102	301	8.71	0.000
SPP2 smr vs SPP3 smr	227	376	-4.67	151	0.000	69	84	197	196	1.01	0.975
SPP2 smr vs SPP4 smr	227	293	-1.97	116	0.051	69	49	197	153	1.64	0.072
SPP2 smr vs SPP 5 smr	227	354	-3.57	128	0.000	69	61	197	210	1.14	0.607
SPP2 smr vs SPP6 smr	227	288	-1.77	114	0.079	69	47	197	161	1.50	0.149
SPP2 smr vs SPP7 smr	227	404	-4.17	145	0.000	69	78	197	301	2.34	0.000
SPP3 smr vs SPP4 smr	376	293	2.53	131	0.012	84	49	196	153	1.63	0.067
SPP3 smr vs SPP5 smr	376	354	0.638	143	0.525	84	61	196	210	1.14	0.569
SPP3 smr vs SPP6 smr	376	288	2.61	129	0.010	84	47	196	161	1.49	0.143
SPP3 smr vs SPP7 smr	376	404	-0.708	160	0.480	84	78	196	301	2.35	0.000
SPP4 smr vs SPP5 smr	293	354	-1.71	108	0.091	49	61	153	210	1.87	0.027
SPP4 smr vs SPP6 smr	293	288	0.156	94	0.876	49	47	153	161	1.10	0.749
SPP4 smr vs SPP7 smr	293	404	-2.39	125	0.018	49	78	153	301	3.84	0.000
SPP5 smr vs SPP6 smr	354	288	1.79	106	0.076	61	47	210	161	1.70	0.063
SPP5 smr vs SPP 7 smr	354	404	-1.10	137	0.274	61	78	210	301	2.06	0.004
SPP6 smr vs SPP 7 smr	288	404	-2.44	123	0.016	47	78	161	301	3.50	0.000

Tabla IV-a. Porcentaje de estaciones que muestran registros extremos de precipitación en años correspondientes a valores extremos en SPP anual de la zona 4 (indicado como %B).

Serie 4 anual		
Año	Estaciones con dato	% B
1973	39	25.6
1987	25	24
1991	9	11.1
1992	11	27.3

Tabla IV-b. Porcentaje de estaciones que muestran registros extremos de precipitación en años correspondientes a valores extremos en SPP de verano de la zona 1 (indicado como %B).

Serie 1 de verano		
Año	Estaciones con dato	% B
1983	96	31.3
1984	98	16.3
2003	106	17.9
2006	100	14

Tabla IV-c. Porcentaje de estaciones que muestran registros extremos de precipitación en años correspondientes a valores extremos en SPP de verano de la zona 7 (indicado como %B).

Serie 7 de verano		
Año	Estaciones con dato	% B
1958	54	31.5
1971	66	37.9
1973	86	27.9
1978	78	8.97
2003	85	9.41
2010	49	44.9

Tabla IV-d. Porcentaje de estaciones que muestran registros extremos de precipitación en años correspondientes a valores extremos en SPP anual de la zona 6 (indicado como %B).

Serie 6 anual		
Año	Estaciones con dato	% B
1992	11	45.5

7.2 Índices climáticos

En las figuras 6-9 se muestra la posición de estaciones con registros de lluvia acumulada extremos y de aquellas cuyos registros no resultaron extremos en el año en que la SPP correspondiente mostró lluvia extrema. 6-9.

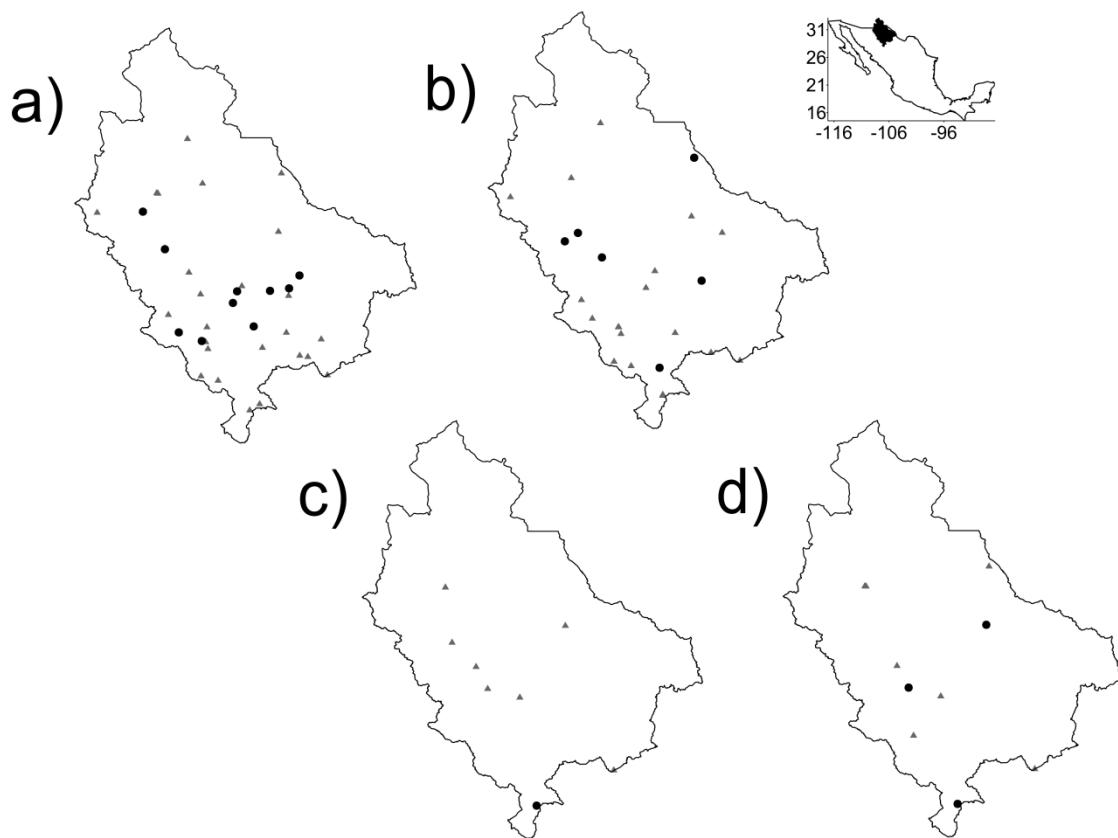


Figura 6. Mapas que muestran la posición de estaciones con: registros de lluvia extrema (puntos) y aquellas cuyos registros de lluvia acumulada no resultaron extremos (triángulos grises) en la zona 4 referente a la serie promedio regional de precipitación anual (SPP4 anual) correspondientes a los años a) 1973, b) 1987, c) 1991 y d) 1992.

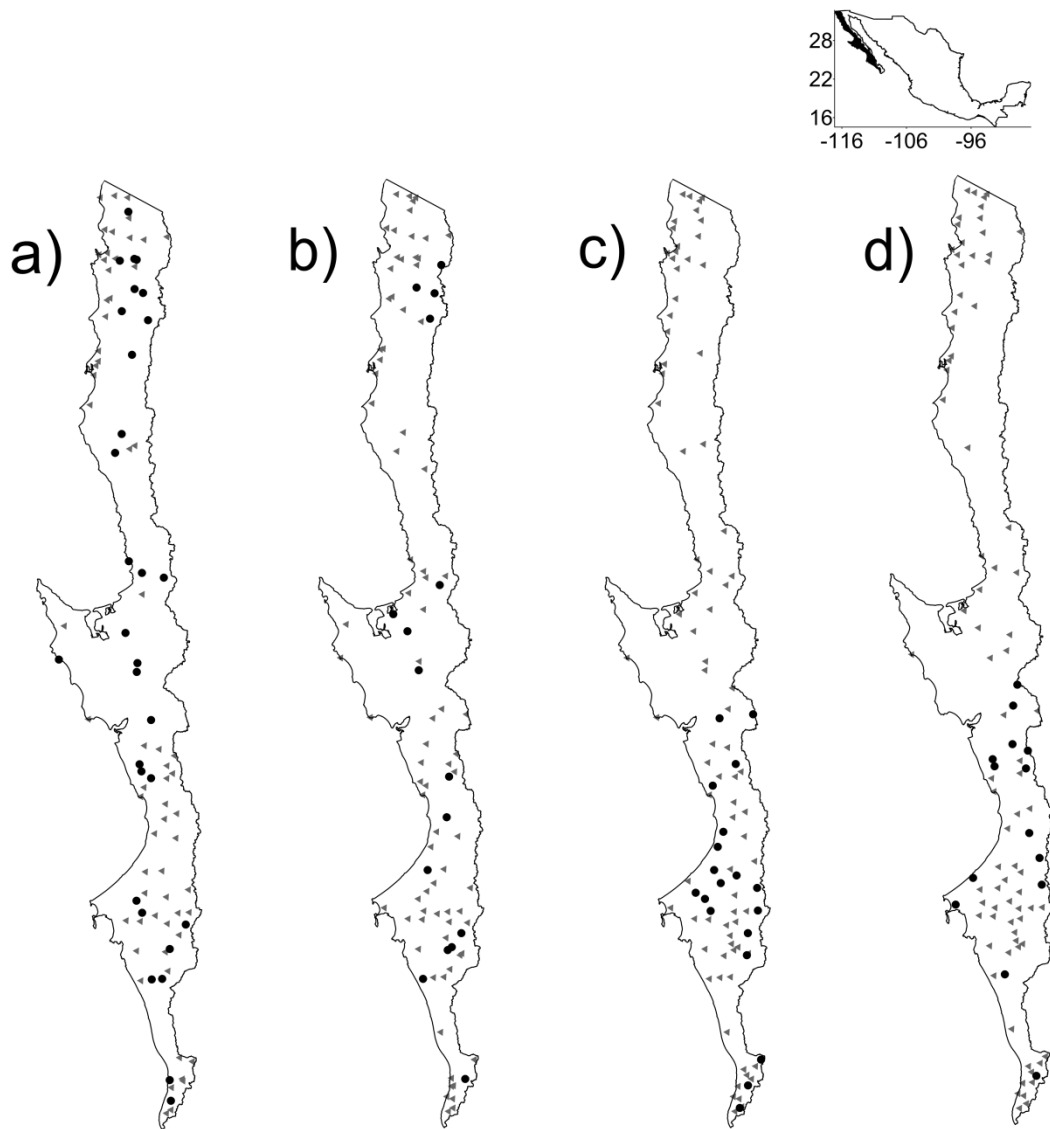


Figura 7. Mapas que muestran la posición de estaciones con: registros de lluvia extrema (puntos) y aquellas cuyos registros de lluvia acumulada no resultaron extremos (triángulos grises) en la zona 1 referente a la serie promedio regional de precipitación de verano (SPP1 de verano) correspondientes a los años a) 1983, b) 1984, c) 2003 y d) 2006.

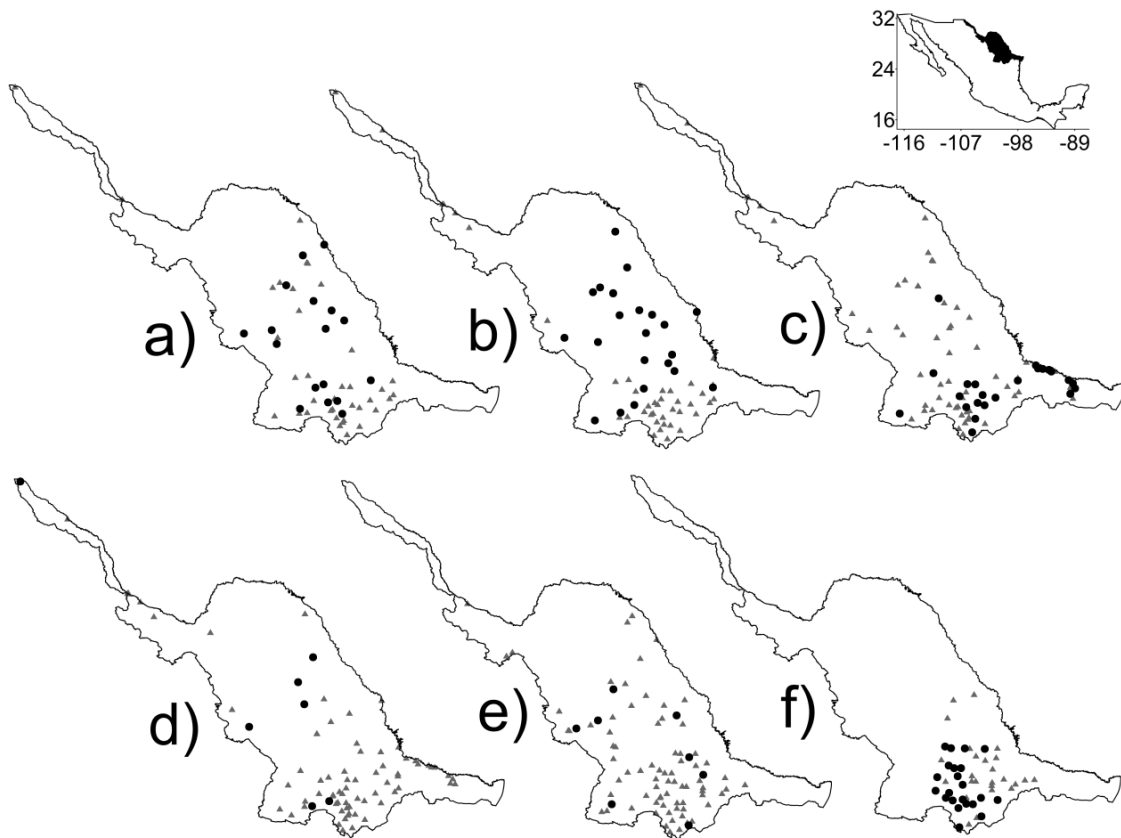


Figura 8. Mapas que muestran la posición de estaciones con: registros de lluvia extrema (puntos) y aquellas cuyos registros de lluvia acumulada no resultaron extremos (triángulos grises) en la zona 7 referente a la serie promedio regional de precipitación de verano (SPP7 de verano) correspondientes a los años a) 1958, b) 1971, c) 1973, d) 1978, e) 2003 y f) 2010.

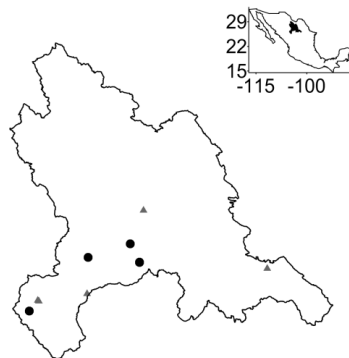


Figura 9. Mapa que muestra la posición de estaciones con: registros de lluvia extrema (puntos) y aquellas cuyos registros de lluvia acumulada no resultaron extremos (triángulos grises) en la zona 6 referente a la serie promedio regional de precipitación anual (SPP6 anual) correspondiente al año 1992.

Las gráficas de las estructuras de las SPP y de los índices climáticos seleccionados se muestran en las Figuras 10 a 12.

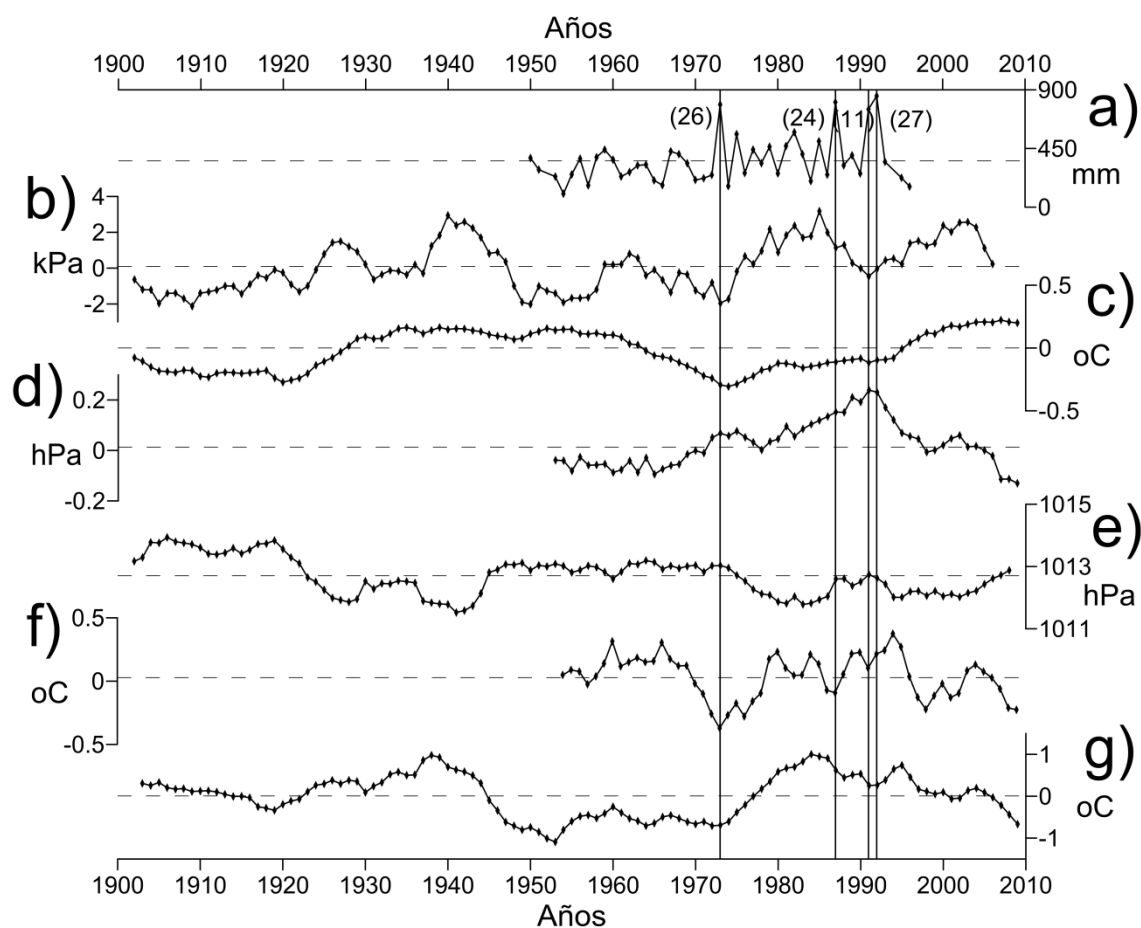


Figura 10. (a) Serie promedio regional de precipitación anual (SPP4 an), e índices climáticos filtrados mediante promedios móviles de 7 años (excepto ALPI, que utilizó promedios móviles de 5 años) (b) ALPI, (c) AMO, (d) NAO, (e) NPI, (f) ONI y (g) PDO. Las líneas verticales señalan los años con valores extremos de precipitación y los números entre paréntesis los porcentajes de estaciones individuales que registraron valores extremos en los años correspondientes.

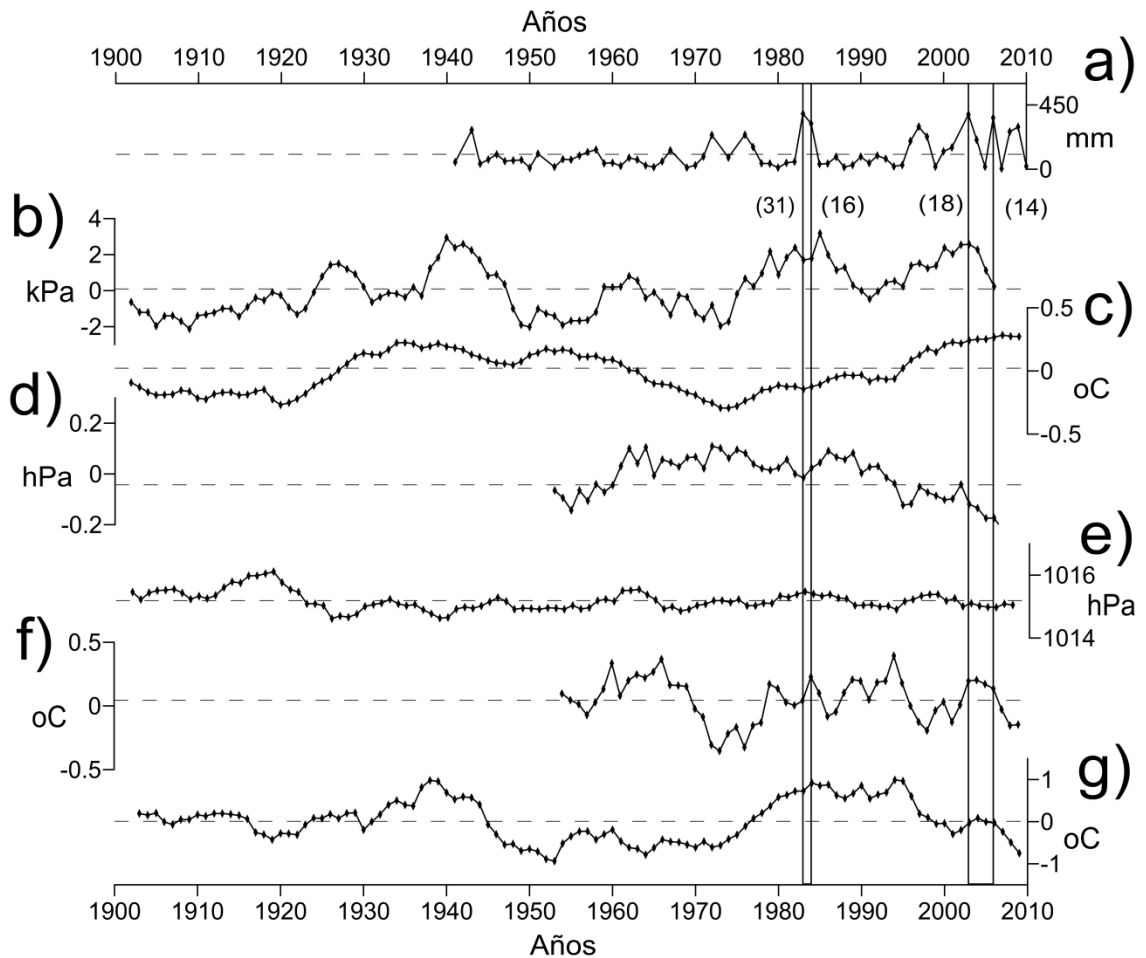


Figura 11. (a) Serie promedio regional de precipitación de verano (SPP1 smr), e índices climáticos filtrados mediante promedios móviles de 7 años (excepto ALPI, que utilizó promedios móviles de 5 años) (b) ALPI, (c) AMO, (d) NAO, (e) NPI, (f) ONI y (g) PDO. Las líneas verticales señalan los años con valores extremos de precipitación y los números entre paréntesis los porcentajes de estaciones individuales que registraron valores extremos en los años correspondientes.

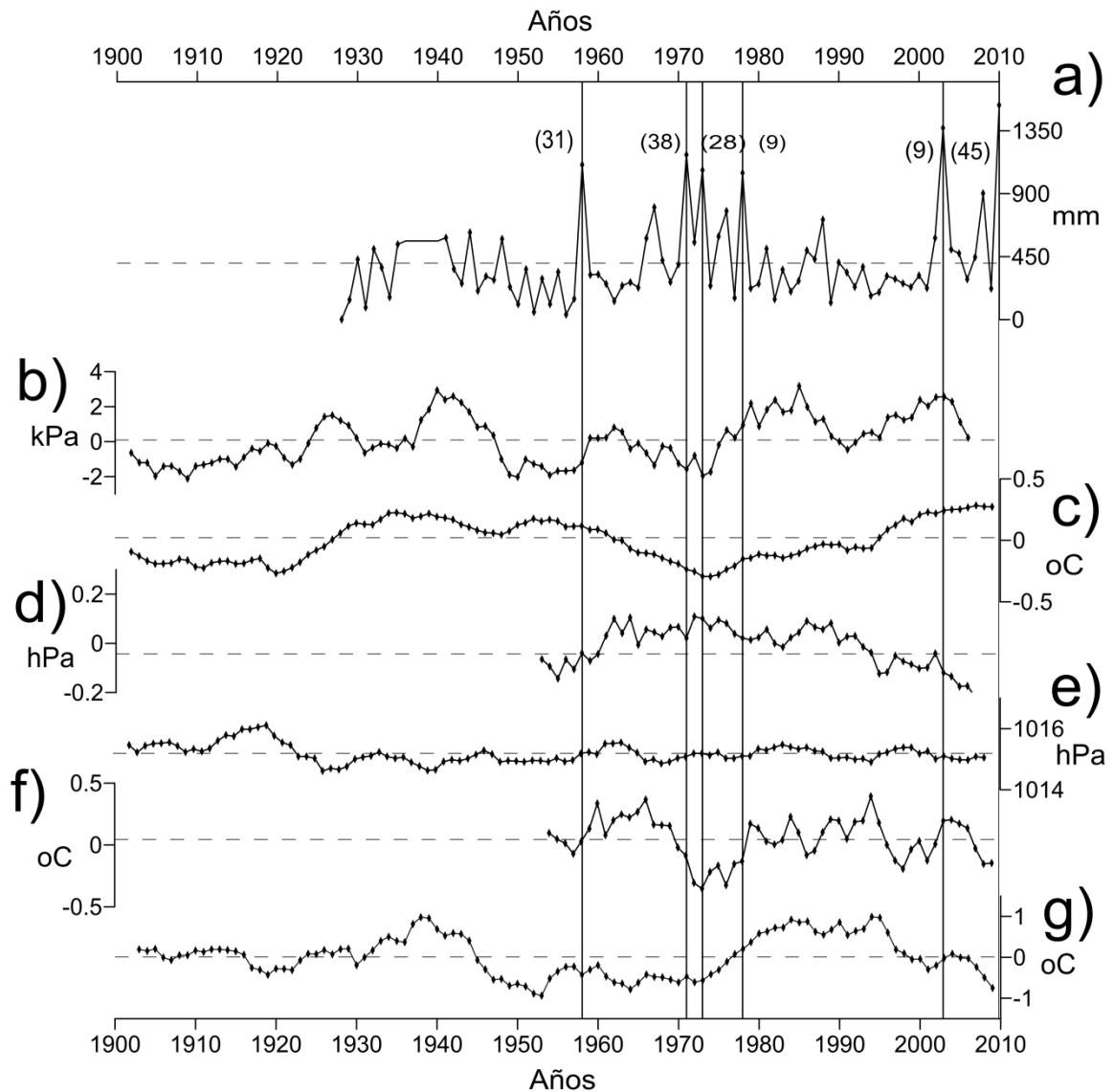


Figura 12. (a) Serie promedio regional de precipitación de verano (SPP7 smr), e índices climáticos filtrados mediante promedios móviles de 7 años (excepto ALPI, que utilizó promedios móviles de 5 años) (b) ALPI, (c) AMO, (d) NAO, (e) NPI, (f) ONI y (g) PDO. Las líneas verticales señalan los años con valores extremos de precipitación y los números entre paréntesis los porcentajes de estaciones individuales que registraron valores extremos en los años correspondientes.

En la Tabla V se presentan las correlaciones estadísticamente significativas al 95% entre las SPP y los índices climáticos filtrados con promedios móviles.

Tabla V. Correlaciones significativas al 95% entre las SPP y los índices climáticos seleccionados.

SPP	Desfase en años	Correlación	Error Estándar
SPP4 an vs NAO	4	0.340	0.158
	2	0.421	0.154
	1	0.412	0.152
	0	0.498	0.151
SPP4 an vs PDO	8	0.327	0.160
	7	0.323	0.158
	4	0.400	0.152
	3	0.457	0.151
	2	0.415	0.149
	1	0.343	0.147
	0	0.300	0.146
SPP1 smr vs ALPI	3	0.258	0.126
	2	0.312	0.125
	1	0.305	0.124
	0	0.277	0.123
SPP1 smr vs NAO	6	-0.297	0.140
	3	-0.326	0.136
	0	-0.314	0.132
SPP1 smr vs ONI	0	-0.338	0.134
SPP7 smr vs ONI	5	-0.364	0.140
	0	-0.269	0.134

En las Tablas VI a-d se presentan las correlaciones estadísticamente significativas al 95% entre las SPP y los índices climáticos, con la distinción de que en este análisis, además de los índices climáticos, también las SPP fueron filtradas con promedios móviles. Las gráficas de sus correspondientes estructuras se muestran en las figuras de la 14 a la 17.

Tabla VI-a. Correlaciones significativas al 95% entre la SPP4 anual (SPP4 an) filtrada mediante promedios móviles y los índices climáticos seleccionados.

	Desfase en años	Correlación	Error Estándar
SPP4 an vs ALPI	4	0.394	0.164
	3	0.449	0.162
	2	0.454	0.160
	1	0.489	0.158
	0	0.508	0.156
SPP4 an vs AMO	1	-0.377	0.158
	0	-0.444	0.156
SPP4 an vs NAO	9	0.392	0.177
	8	0.441	0.174
	7	0.508	0.171
	6	0.522	0.169
	5	0.603	0.167
	4	0.679	0.164
	3	0.812	0.162
	2	0.884	0.160
	1	0.933	0.158
0	0.926	0.156	
SPP4 an vs NPI	4	-0.356	0.164
	3	-0.359	0.162
	2	-0.380	0.160
	1	-0.426	0.158
	0	-0.441	0.156
SPP4 an vs PDO	11	0.404	0.183
	10	0.494	0.180
	9	0.561	0.177
	8	0.606	0.174
	7	0.621	0.171
	6	0.656	0.169
	5	0.706	0.167
	4	0.731	0.164
	3	0.749	0.162
	2	0.793	0.160
	1	0.850	0.158

Tabla VI-a, continuación.

	Desfase en años	Correlación	Error Estándar
SPP4 an vs PDO	0	0.894	0.156

Tabla VI-b. Correlaciones significativas al 95% entre la SPP1 de verano (SPP1smr) filtrada mediante promedios móviles y los índices climáticos seleccionados.

	Desfase en años	Correlación	Error Estándar
SPP1 smr vs ALPI	6	0.308	0.132
	5	0.383	0.131
	4	0.456	0.130
	3	0.513	0.129
	2	0.544	0.128
	1	0.544	0.127
	0	0.515	0.126
SPP1 smr vs AMO	3	0.262	0.128
	2	0.270	0.127
	1	0.277	0.126
	0	0.251	0.125
SPP1 smr vs NAO	4	-0.310	0.140
	3	-0.315	0.139
	2	-0.354	0.137
	1	-0.417	0.136
	0	-0.422	0.135
SPP1 smr vs ONI	10	0.324	0.151
	9	0.334	0.149
	2	-0.342	0.139
	1	-0.369	0.137
	0	-0.318	0.136
SPP1 smr vs PDO	12	0.336	0.139
	11	0.390	0.137
	10	0.414	0.136
	9	0.410	0.135

Tabla VI-b, continuación.

	Desfase en años	Correlación	Error Estándar
SPP1 smr vs PDO	8	0.369	0.134
	7	0.319	0.132
	6	0.302	0.131
	5	0.290	0.130
	0	0.252	0.125

Tabla VI-c. Correlaciones significativas al 95% entre la SPP7 de verano (SPP7 smr) filtrada mediante promedios móviles y los índices climáticos seleccionados.

	Desfase en años	Correlación	Error Estándar
SPP7 smr vs AMO	9	-0.297	0.121
	8	-0.358	0.120
	7	-0.382	0.120
	6	-0.395	0.119
	5	-0.396	0.118
	4	-0.384	0.117
	3	-0.355	0.116
	2	-0.296	0.115
SPP7 smr vs ONI	1	-0.246	0.115
	6	-0.306	0.144
	5	-0.318	0.143
	4	-0.360	0.141
	3	-0.405	0.140
	2	-0.445	0.139
	1	-0.414	0.137
SPP7 smr vs PDO	0	-0.397	0.136
	15	0.444	0.127
	14	0.418	0.126
	13	0.385	0.125
	12	0.367	0.124
	11	0.372	0.123

Tabla VI-c, continuación.

	Desfase en años	Correlación	Error Estándar
SPP7 smr vs PDO	10	0.370	0.122
	9	0.347	0.121
	8	0.304	0.120
	7	0.261	0.120

Tabla VI-d. Correlaciones significativas al 95% entre la SPP6 anual (SPP6 an) filtrada mediante promedios móviles y los índices climáticos seleccionados.

	Desfase en años	Correlación	Error Estándar
SPP6 an vs ALPI	9	0.383	0.183
	8	0.385	0.180
	2	-0.331	0.164
	1	-0.442	0.162
	0	-0.534	0.160
SPP6 an vs AMO	7	-0.359	0.177
	6	-0.428	0.174
	5	-0.521	0.171
	4	-0.585	0.169
	3	-0.647	0.167
	2	-0.701	0.164
	1	-0.718	0.162
	0	-0.722	0.160
SPP6 an vs NAO	15	0.573	0.204
	14	0.548	0.200
	13	0.520	0.196
	12	0.463	0.192
	11	0.399	0.189
SPP6 an vs PDO	13	0.398	0.196
	12	0.443	0.192
	11	0.466	0.189
	10	0.452	0.186
	9	0.409	0.183

Tabla VI-d, continuación.

	Desfase en años	Correlación	Error Estándar
SPP6 an vs PDO	8	0.368	0.180
	0	-0.394	0.160

Analizando la distribución de las estaciones con registros de precipitación extrema (Figuras 6-9), las tablas IV a-d y las Figuras de la 10 a la 12 se puede mencionar lo siguiente:

SPP4 anual: La serie promedio regional de precipitación anual de la región 4 muestra las mayores correlaciones con PDO y NAO cercanas a 0.5 (Tabla V) pero desfasadas en tres años con el PDO (que es un índice oceánico) y sin desfase con el NAO (que es un índice atmosférico). En los años 1973 y 1987 (Figuras 6 a) y b) respectivamente) la distribución de estaciones cuyos registros de lluvia acumulada no resultaron extremos se extiende más o menos por toda la región pero su número disminuye considerablemente en 1991 y 1992. En 1973 y 1987 las estaciones que registran el valor extremo no se observan particularmente cerca de los parteaguas ni parecen seguir algún patrón obvio. En 1991 solo una estación registró el evento y en 1992 únicamente 3 (Figuras 6 c) y d) respectivamente).

La correlación entre la SPP4 y el PDO es positiva a 0, 1, 2, 3, 4, 7 y 8 años de desfase, donde el mayor valor ocurre a 3 años de desfase y el menor a 0 años (Tabla V). Si se observa la serie regional y el PDO (Figura 10) se distingue la correlación propuesta, ya que hay mas ocurrencia de picos de precipitación en la fase positiva. Esto sucede en los años significativos encontrados, con excepción de 1973.

En el análisis usando promedios móviles también en la SPP se encontró un mayor número de correlaciones, ya que ahora además del NAO y el PDO también resultaron correlacionados el ALPI, AMO y NPI (Tabla VI-a). Resaltan valores de correlación altos. Los mayores fueron con respecto al NAO (0.92 sin desfase y 0.93 con un año de desfase) y al PDO (0.89 sin desfase y 0.85 con un año de desfase). Observando la estructura de la

SPP4 an y la del NAO y PDO (Figura 13) se sustenta la correlación, porque las estructuras de las series son muy similares.

SPP1 de verano: La serie promedio de precipitación de verano de la región 1 muestra correlaciones modestas pero significativas con ALPI, NAO y ONI (Tabla V). Sin embargo, hay desfases en las correlaciones máximas (en valores absolutos), de tres años entre SPP1 y NAO y de dos años entre SPP1 y ALPI. En el primer caso la correlación es negativa mientras que en el segundo caso, la correlación es positiva. Ambos índices son atmosféricos con variaciones de baja frecuencia. En el caso de la correlación entre SPP1 y ONI, la correlación es negativa sin desfase. Este último índice es oceánico. En 1983 y 1984 (Figuras 7 a) y b) respectivamente) las estaciones que registraron los eventos extremos se distribuyen en toda la región, aunque cabe aclarar que en 1984 la cantidad de estaciones se reduce casi a la mitad en relación con la cantidad de estaciones en 1983 (al pasar de 31 a 16% (Tabla IV-b)) y están distribuidas unas cuantas en el norte, otras en el centro y otras más en el sur. En 2003 y 2006 (Figuras 7 c) y d) respectivamente) la distribución de las estaciones que registraron los eventos extremos cubre solo la mitad sur de la región distribuidas en las zonas cercanas al parteaguas y las costas. Los cambios observados en la distribución de estaciones que registraron los eventos extremos en la región 1 pueden estar relacionados con las diferencias latitudinales que a su vez responden a la mayor influencia de eventos de origen tropical en el sur de la península y a una mayor influencia de eventos extratropicales en el norte de la península.

La correlación máxima entre SPP1 y ALPI es positiva (con dos años de desfase) (Tabla V), esto indica que los valores extremos de verano en la región 1 ocurren cuando el ALPI se encuentra en su fase positiva (bajas aleutianas intensas) (Figura 11) pero con un retraso de dos años (no obstante el valor de correlación es modesto (0.31)). Cabe recordar que los datos de este índice son anuales, por lo que no fue posible hacer los análisis para verano al hacer los promedios móviles.

Como ya se mencionó anteriormente, la mayor correlación (en valores absolutos) entre el SPP1 y el NAO es negativa y con tres años de desfase (Tabla V). Esto indica que los

valores extremos de precipitación de verano en la región 1 están relacionados con un centro de alta presión subtropical débil posicionado sobre las Azores y una baja presión Islandesa menos profunda de lo normal (fase negativa del índice). Es importante mencionar que los valores de correlación son modestos. Este resultado podría estar influenciado por el hecho de que los dos últimos años de lluvia extrema ocurren en fase positiva del NAO (Figura 11).

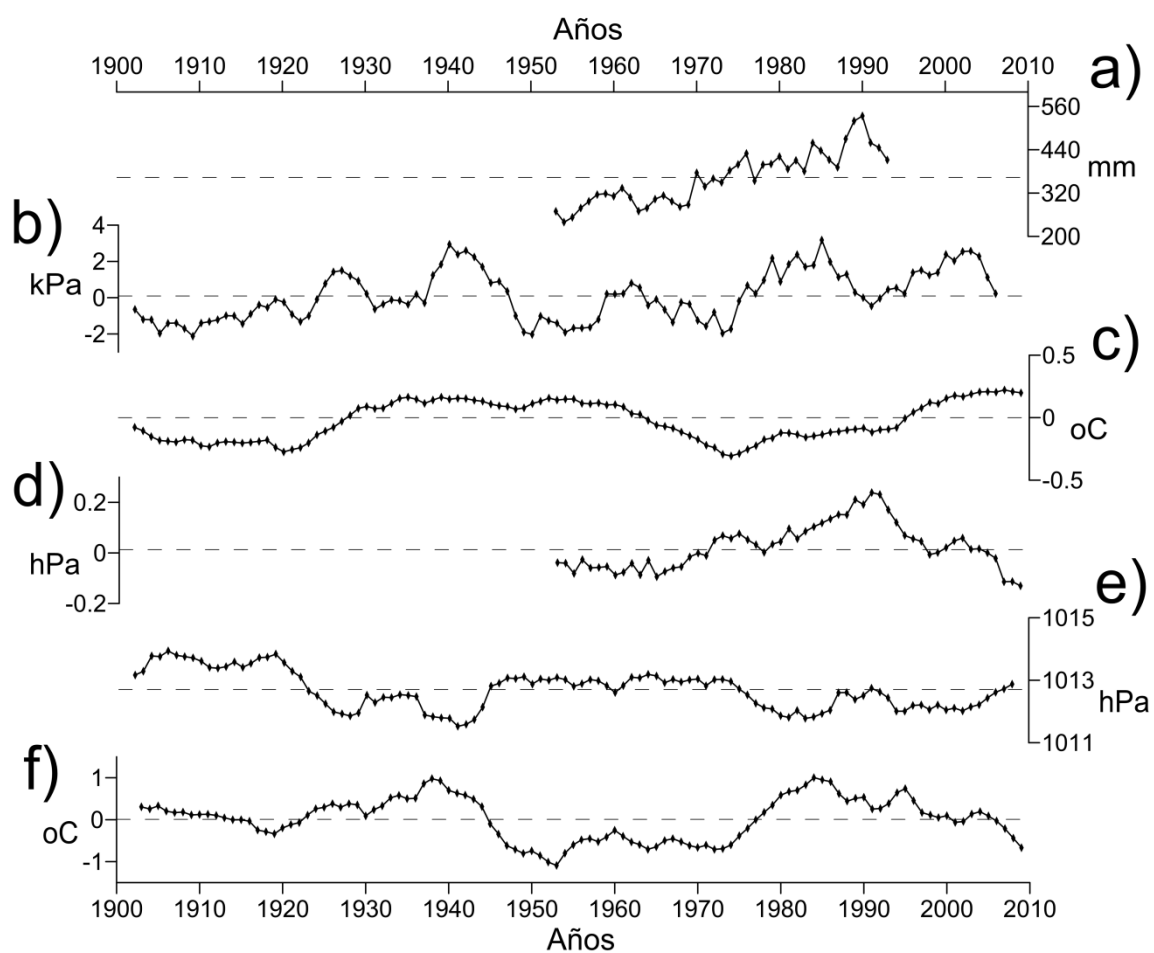


Figura 13. (a) Serie promedio regional de precipitación anual (SPP4 an) filtrada mediante promedios móviles de 7 años, e índices climáticos filtrados mediante promedios móviles de 7 años (excepto ALPI, que utilizó promedios móviles de 5 años) que resultaron correlacionados (b) ALPI, (c) AMO, (d) NAO, (e) NPI y (f) PDO.

Finalmente, la correlación entre la SPP1 de verano y el ONI es negativa y sin desfase (Tabla V). Esto indica que la ocurrencia de valores extremos de precipitación está asociada con la fase negativa (La Niña). Este resultado es congruente con lo que se ha reportado en estudios anteriores que indican que durante años La Niña se observa un incremento de las precipitaciones de verano en gran parte de México. Sin embargo en este caso la correlación es modesta y la ocurrencia de años con lluvia extrema se observa en la fase positiva del ONI (Figura 11), por lo que la correlación puede ser casualidad.

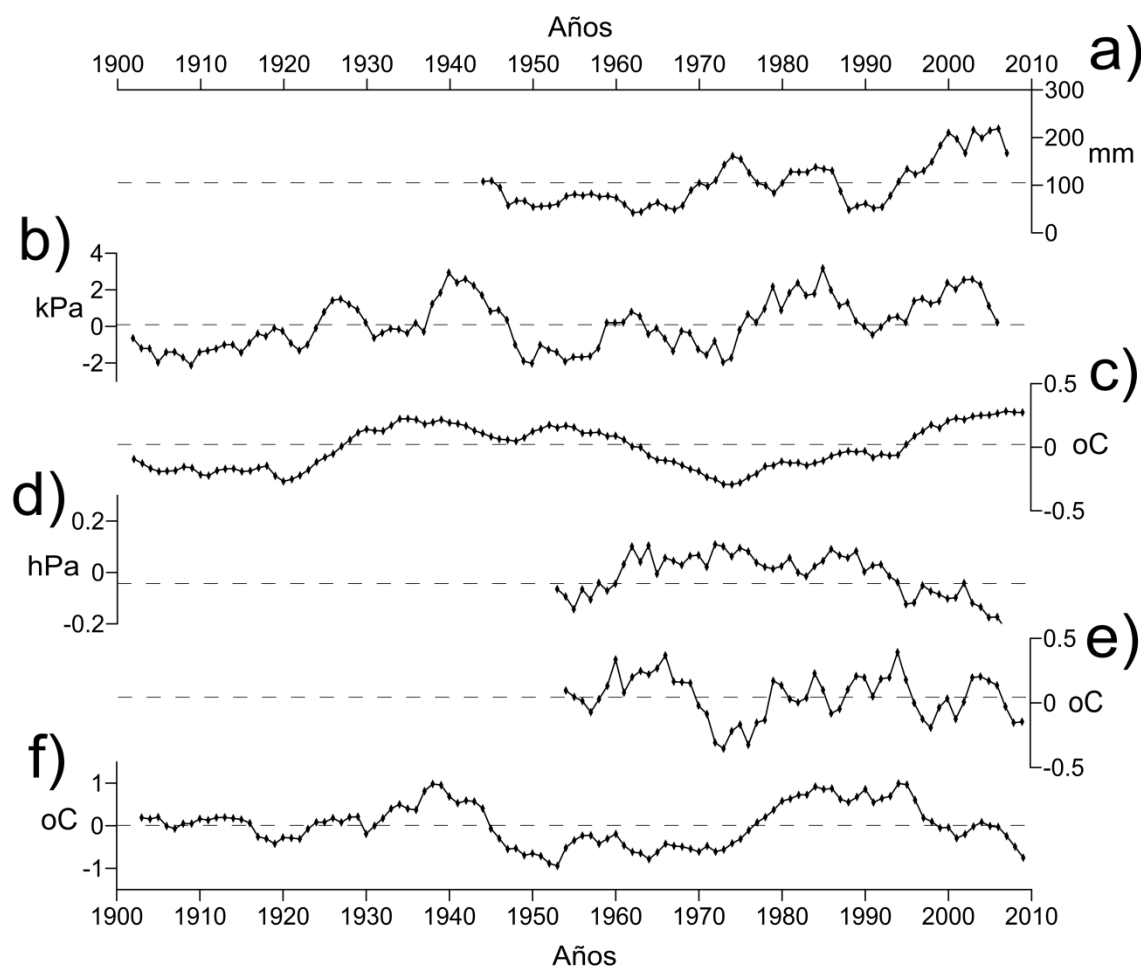


Figura 14. (a) Serie promedio regional de precipitación de verano (SPP1 smr) filtrada mediante promedios móviles de 7 años, e índices climáticos filtrados mediante promedios móviles de 7 años (excepto ALPI, que utilizó promedios móviles de 5 años) que resultaron correlacionados (b) ALPI, (c) AMO, (d) NAO, (e) ONI y f) PDO.

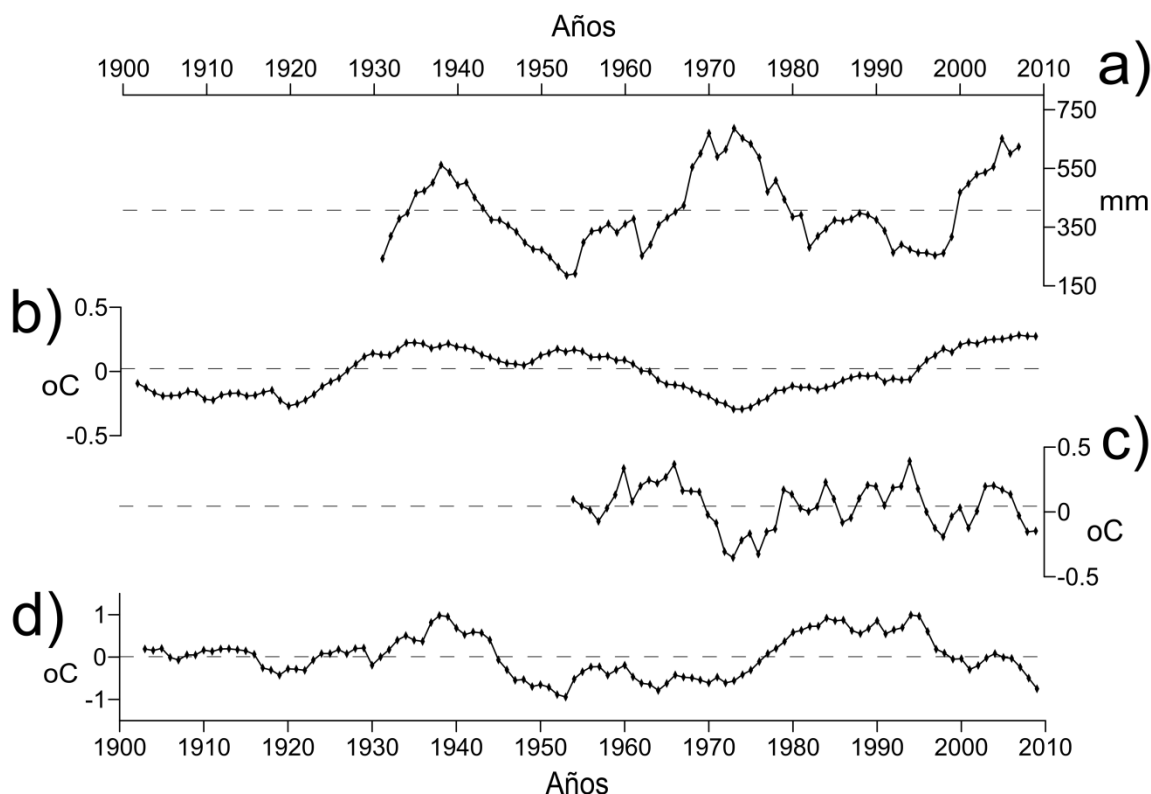


Figura 15. (a) Serie promedio regional de precipitación de verano (SPP7 smr) filtrada mediante promedios móviles de 7 años, e índices climáticos filtrados mediante promedios móviles de 7 años que resultaron correlacionados (b) AMO, (c) ONI y d) PDO.

En el análisis de las SPP filtradas con promedios móviles se encontró un mayor número de correlaciones significativas con los índices climáticos (Tabla VI-b), ya que ahora además del ALPI, ONI y NAO también resultaron correlacionados el AMO y el PDO. Sin embargo los valores de correlación son modestos (entre 0.2 y 0.5 aproximadamente) aunque en general mayores en comparación a los de la Tabla V. El mayor valor de correlación resultó con respecto al ALPI (0.5) con un año de desfase. Observando la estructura de la SPP1 smr y la del ALPI (Figura 14) se encuentran algunas coincidencias entre la ocurrencia de valores extremos entre ambas series, sin embargo la similitud es insuficiente para ser de utilidad en los pronósticos.

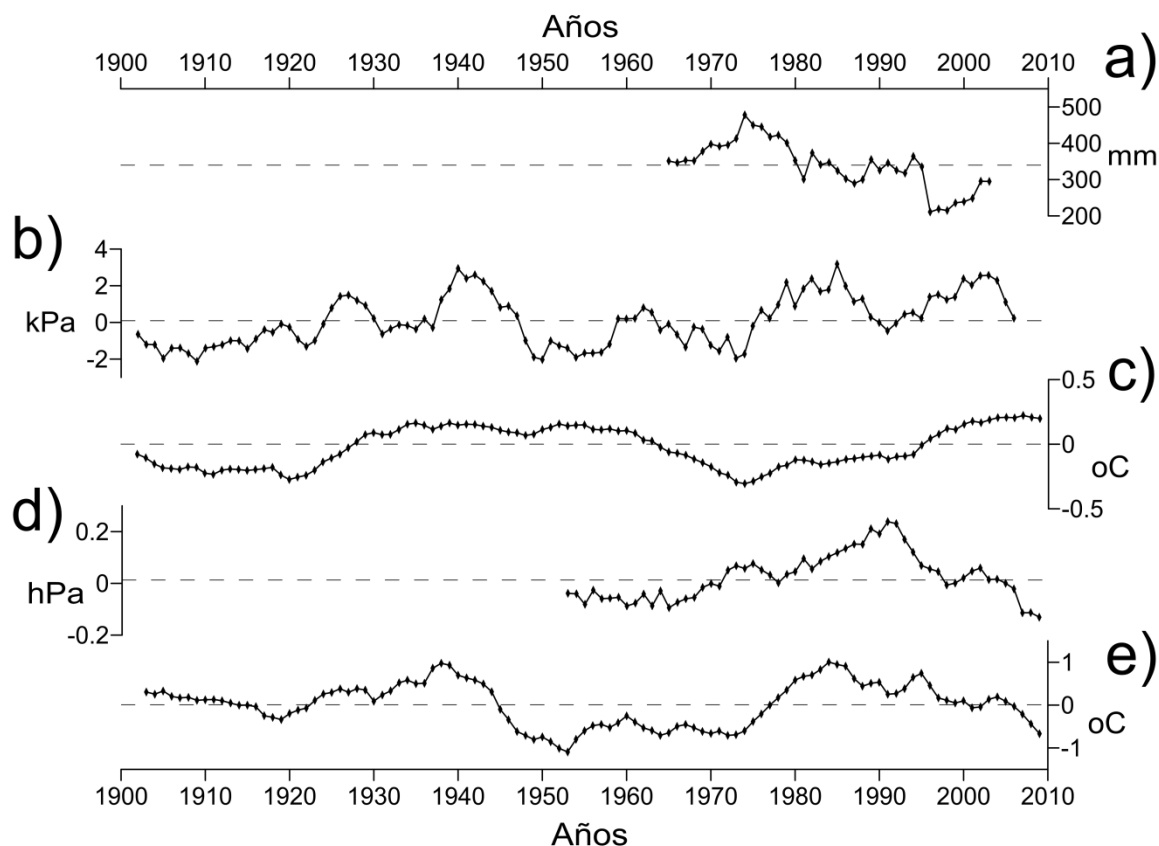


Figura 16. (a) Serie promedio regional de precipitación anual (SPP6 an) filtrada mediante promedios móviles de 7 años, e índices climáticos filtrados mediante promedios móviles de 7 años (excepto ALPI, que utilizó promedios móviles de 5 años) que resultaron correlacionados (b) ALPI, (c) AMO, (d) NAO y (e) PDO.

SPP7 de verano: Aunque antes ya se mencionó que la SPP7 de verano varía lentamente (ver Figura 4) su mayor correlación (en valores absolutos) es negativa y se encuentra con el ONI, que es un índice de variabilidad interanual, desfasado en cinco años (Tabla V). Esto es que los picos de precipitación influenciados por este fenómeno ocurrirían durante la fase negativa del índice (La Niña). La mayoría de los picos de precipitación en los años significativos suceden, como se esperaría de acuerdo a la correlación, en la fase negativa del ONI (Figura 12), salvo en 1958 donde el valor de ONI está muy cerca de la media y en 2003 donde se encuentra en fase positiva. La distribución de las estaciones de la región 7 con registros de lluvia cubre en general la zona sur, extendiéndose un poco en el 2003. En

1958 (Figura 8 a)) se observa que las estaciones que registran los valores extremos se distribuyen más o menos en todo el territorio (sin abarcar la zona más septentrional del territorio) y se encuentran en el centro de la región (no se observan particularmente cerca de los parteaguas) muy similar a la distribución que se observa en 1971 (Figura 8 b)). En 1973 (Figura 8 c)) las estaciones se concentran en una mancha en el centro sur y otra más en el límite oeste también en el sur. En 1978 y 2003 (Figuras 8 d) y e) respectivamente) se encontraron muy pocas estaciones que registraron los eventos extremos (sólo el 9% en ambos casos). Finalmente, en el 2010 (Figura 8 f)) las estaciones con dato que se localizan en el centro sur registraron el evento extremo.

En el análisis usando promedios móviles también en la SPP se encontró un mayor número de correlaciones significativas (Tabla VI-c), ya que ahora además del ONI también resultaron correlacionados el AMO y el PDO. Sin embargo los valores de correlación son modestos. Los valores más grandes de correlación resultaron con respecto al ONI y al PDO. En el caso del ONI la correlación es negativa y con el PDO es positiva. Observando la estructura de la SPP7 smr y las del ONI y PDO (Figura 15) se encuentran similitudes, sin embargo es insuficiente para ser de utilidad en los pronósticos.

SPP6 anual: En la Figura 9 se observa que las estaciones con registro se distribuyen en un área muy limitada de la región, donde los registros extremos se encuentran en la parte sur oeste. Se encontraron correlaciones significativas entre el ALPI, AMO, NAO, PDO y la SPP filtrada mediante promedios móviles (Tabla VI-d). La correlación con el ALPI ocurre con y sin desfase, se observan valores de correlación modestos, tanto positivos como negativos y al comparar las estructuras de las series (Figura 16) no se observa gran similitud, y teniendo en cuenta además los valores de la correlación, podría ser que se trate de una coincidencia.

La correlación con el AMO es negativa y ocurre sin desfase y desde 1 a 7 años de desfase. Se observan valores de correlación considerablemente altos (de 0.7 en valor absoluto) a 1 y 2 años de desfase y también sin desfase (Tabla VI-d). Al analizar la estructura de la SPP6 an y la del AMO (Figura 16), se observa que las fases del AMO en general son inversas a

las variaciones de la SPP, lo que refuerza la posibilidad de que la correlación no sea coincidencia.

La correlación con el NAO es positiva y ocurre desde 11 a 15 años de desfase (Tabla VI-d). El mayor valor de correlación sucedió a los 15 años de desfase, sin embargo para tener certeza de si se trata de una correlación real se requeriría comparar las estructuras de las series con una serie de tiempo más grande

La correlación con el PDO es negativa sin desfase y positiva desde 8 a 13 años de desfase (Tabla VI-d). Los valores de correlación son modestos y el mayor valor ocurre a los 11 años de desfase. Puede ser un caso parecido al de la correlación con el NAO.

7.3 Ciclones

Por la posición geográfica de las regiones y su cercanía a los océanos Pacífico y Atlántico, la influencia de ciclones tropicales es distinta en cada región y por lo tanto cada una se ve afectada por ciclones formados en el Pacífico, en el Atlántico o por ambos tipos. Para la SPP1 de verano se consideraron posibles afectaciones de ciclones del Pacífico, para la SPP4 anual se consideraron tanto del Atlántico como del Pacífico y lo mismo para la SPP6 anual, finalmente para la SPP7 de verano se consideraron ciclones del Atlántico. En las tablas VII a-d se presentan las fechas de inicio y término de cada ciclón (ocurrido en el periodo 1902-2012 para el Atlántico y de 1949-2012 para el Pacífico) que tocó el área de influencia según la metodología aplicada para tal efecto.

Tabla VII-a. Ciclones con probable influencia en la ocurrencia de valores extremos de precipitación de la SPP4 anual., %B indica el porcentaje de estaciones que muestran valores extremos de precipitación en relación con el total de estaciones con dato.

SPP4 anual				
Año	Estaciones con dato	% B	Ciclones del Atlántico: inicio y término	Ciclones del Pacífico: inicio y término
1973	39	25.6	sep-1-sep-7	sep-22-sep-27
1987	25	24	ago-9-ago-17	sep-14-sep-20
1991	9	11.1	—	—
1992	11	27.3	—	ago-20-ago-24

Tabla VII-b. Ciclones con probable influencia en la ocurrencia de valores extremos de precipitación de la SPP1 de verano., %B indica el porcentaje de estaciones que muestran valores extremos de precipitación en relación con el total de estaciones con dato.

SPP1 de verano			
Año	Estaciones con dato	% B	Ciclones del Pacífico: inicio y término
1983	96	31.3	sep-12-sep-20
1984	98	16.3	jul-03-jul-10 jul-07-jul-14 sep-05-sep-11 sep-26-oct-10
2003	106	17.9	ago-22-ago-27 sep-19-sep-24
2006	100	14	jul-21-jul-28 ago-28-sep-04

Tabla VII-c. Ciclones con probable influencia en la ocurrencia de valores extremos de precipitación de la SPP7 de verano., % B indica el porcentaje de estaciones que muestran valores extremos de precipitación en relación con el total de estaciones con dato.

SPP7 de verano			
Año	Estaciones con dato	% B	Ciclones del Atlántico: inicio y término
1958	54	31.5	ago-30-sep-06 jun-14-jun-16
1971	66	37.9	sep-3-sep-13 sep-5-sep-18
1973	86	27.9	sep-1-sep-7
1978	78	8.97	jul-30-ago-1 ago-26-ago-29 ago-5-ago-8
2003	85	9.41	ago-30-sep-2 jul-7-jul-17 ago-14-ago-17
2010	49	44.9	sep-4-sep-10 jun-24-jul-2

Tabla VII-d. Ciclones con probable influencia en la ocurrencia de valores extremos de precipitación de la SPP6 anual., %B indica el porcentaje de estaciones que muestran valores extremos de precipitación en relación con el total de estaciones con dato.

SPP6 anual			
Año	Estaciones con dato	% B	Ciclones del Pacífico: inicio y término
1992	11	45.5	ago-20-ago-24

**No hubo ciclones registrados en el Atlántico

La verificación del número de estaciones con registro de lluvia extrema durante las fechas identificadas de ocurrencia de ciclones se presenta en las tablas VIII a-d.

Los mapas con la distribución de las estaciones con registros de lluvia extrema durante cada ciclón corresponden a las figuras 17 y 18.

Analizando cada ciclón por separado, observando la información presentada en las tablas VIII a-d y la distribución de las estaciones con lluvia extrema presentada en las figuras 17 y 18 se observa que:

SPP4 anual

Ciclón 1: no hubo EPX y se tiene 79% de información (Tabla VIII-a). Por lo tanto la influencia del ciclón tropical no es obvia.

Ciclón 2: no hubo EPX y se tiene 80% de información (Tabla VIII-a). Por lo tanto, la influencia del ciclón tropical no es obvia.

Ciclón 3: Hubo 9 EPX y en los acumulados de lluvia se observan algunos valores considerables (por ejemplo de 100 mm), sin embargo sólo se cuenta con 29% de información y en el 71% de las estaciones no existen datos (Tabla VIII-a). Por lo tanto en este caso se considera que no hay suficiente información para determinar influencia ciclónica.

Ciclón 4: Hubo sólo una EPX, no se observan valores acumulados de lluvia grandes y se cuenta con 29% de información (Tabla VIII-b). Por lo tanto en este caso se considera que no hay suficiente información para determinar influencia ciclónica.

Ciclón 5: Hubo únicamente 3 EPX, no se observan valores acumulados de lluvia grandes, se cuenta con 20% de información y en el 80% de las estaciones no existen datos (Tabla VIII-a). Por lo tanto en este caso se considera que no hay suficiente información para determinar influencia ciclónica.

SPP1 de verano

Ciclón 1: En el norte se observan precipitaciones extremas en la mayoría de las estaciones (Figura 17 a)), en el resto de la región las estaciones con lluvia extrema (EPX) están más dispersas. Se tiene 81% de información y en el 17% de las estaciones no existen datos (Tabla VIII-b), por lo tanto de haber influencia ciclónica sería más bien en la mitad norte de la región.

Ciclón 2: En el sur se observan precipitaciones extremas en la mayoría de las estaciones y hacia el norte las EPX están cerca del parteaguas interior (Figura 17 b)). Se cuenta con 76% de información y aproximadamente el 62% de las estaciones muestran acumulados de lluvia igual a cero (Tabla VIII-b), por lo tanto pudiera considerarse que hay influencia ciclónica en la parte sur de la región.

Ciclón 3: Se observan EPX en prácticamente toda la zona (Figura 17 c)). Se tiene 77% de información (Tabla VIII-b) y en este caso por la extensión del área de distribución de las EPX se considera que hay influencia ciclónica.

Ciclón 4: La gran mayoría de las estaciones ubicadas en la mitad sur de la zona son EPX (Figura 17 d)). Se cuenta con 73% de información (Tabla VIII-b) y debido a que casi todas las estaciones de la mitad sur (que está expuesta a eventos ciclónicos) son EPX se considera que hay influencia ciclónica.

Ciclón 5: Se observa una concentración de EPX en una zona del sur (Figura 17 e)), sin embargo alrededor (además de las estaciones sin registro de lluvia extrema) se sabe que hay varias estaciones sin datos, lo que complica la determinación de influencia ciclónica sobre los valores extremos. Se tiene 75% de información (Tabla VIII-b), pero debido a la distribución de las EPX de este caso y a los datos faltantes alrededor de las mismas, se considera que no hay suficiente información para determinar influencia ciclónica.

Ciclón 6: Se observan EPX en prácticamente toda la mitad sur de la zona (Figura 17 f)). Se tiene 75% de información (Tabla VIII-b) y en este caso se considera que hay influencia ciclónica.

Tabla VIII-a. Ciclones identificados con posible afectación a la SPP4 an. La distribución hace referencia a la extensión que cubren las estaciones con precipitación cuya tendencia es significativa en la región 4., pp=precipitación.

	Fecha de inicio y fin del ciclón (año-mes-día)	Estaciones con pp significativa	Estaciones sin pp significativa	Distribución	Características de la información en %:		
					Estaciones con lluvia total = 0	Estaciones sin datos	Datos disponibles
ciclón 1	1973 9.01 - 9.07	0	55	—	84	20	79
ciclón 2	1973 9.22 - 9.27	0	55	—	85	20	80
ciclón 3	1987 8.09 - 8.17	9	46	oeste	74	71	29
ciclón 4	1987 9.14 - 9.20	1	54	—	80	71	29
ciclón 5	1992 8.20 - 8.24	3	52	—	84	80	20

Tabla VIII-b. Ciclones identificados con posible afectación a la SPP1 smr. La distribución hace referencia a la extensión que cubren las estaciones con precipitación cuya tendencia es significativa en la región 1., pp=precipitación.

	Fecha de inicio y fin del ciclón (año-mes-día)	Estaciones con pp significativa	Estaciones sin pp significativa	Distribución	Características de la información en %:		
					Estaciones con lluvia total = 0	Estaciones sin datos	Datos disponibles
ciclón 1	1983 9.12 - 9.20	55	105	General	40	17	81
ciclón 2	1984 7.03 - 7.10	52	108	General	62	22	76
ciclón 3	1984 7.07 - 7.14	110	50	General	30	22	77
ciclón 4	1984 9.05 - 9.11	60	100	Mitad Sur	56	25	73
ciclón 5	1984 9.26 - 10.10	18	142	Región media sur	72	22	75
ciclón 6	2003 8.22 - 8.27	80	80	Mitad Sur	47	23	75
ciclón 7	2003 9.19 - 9.24	81	79	Mitad Sur	47	23	75
ciclón 8	2006 8.28 - 9.03	62	98	Mitad Sur y algunas en el resto de la zona	54	28	71
ciclón 9	2006 9.04	74	86	Mitad Sur	53	26	72

Tabla VIII-c. Ciclones identificados con posible afectación a la SPP7 smr. La distribución hace referencia a la extensión que cubren las estaciones con precipitación cuya tendencia es significativa en la región 7., pp=precipitación.

	Fecha de inicio y fin del ciclón (año-mes-día)	Estaciones con pp significativa	Estaciones sin pp significativa	Distribución	Características de la información en %:		
					Estaciones con lluvia total = 0	Estaciones sin datos	Datos disponibles
ciclón 1	1958 8.30 - 9.06	31	139	General	70	67	32
ciclón 2	1958 6.14 - 6.16	35	135	General	72	68	32
ciclón 3	1971 9.03 - 9.13	57	113	General	61	58	42
ciclón 4	1971 9.05 - 9.18	56	114	General	60	58	42
ciclón 5	1973 9.01 - 9.07	11	159	—	70	48	52
ciclón 6	1978 7.30 - 8.01	64	106	General	56	49	50
ciclón 7	1978 8.26 - 8.29	28	142	Mancha en el sur	67	51	49
ciclón 8	1978 8.05 - 8.08	8	162	—	86	51	49
ciclón 9	2003 8.30 - 9.02	51	119	Sur	60	45	53
ciclón 10	2003 7.07 - 7.17	28	142	General	59	43	56

Tabla VIII-c, continuación.

	Fecha de inicio y fin del ciclón (año-mes-día)	Estaciones con pp significativa	Estaciones sin pp significativa	Distribución	Características de la información en %:		
					Estaciones con lluvia total = 0	Estaciones sin datos	Datos disponibles
ciclón 11	2003 8.14 - 8.17	53	117	Sur	58	45	54
ciclón 12	2010 9.04 - 9.10	13	157	Sur	71	65	34
ciclón 13	2010 6.24 - 7.02	58	112	Centrosur	65	64	36

Tabla VIII-d. Ciclones identificados con posible afectación a la SPP6 an. La distribución hace referencia a la extensión que cubren las estaciones con precipitación cuya tendencia es significativa en la región 6., pp=precipitación.

	Fecha de inicio y fin del ciclón (año-mes-día)	Estaciones con pp significativa	Estaciones sin pp significativa	Distribución	Características de la información en %:		
					Estaciones con lluvia total = 0	Estaciones sin datos	Datos disponibles
ciclón 1	1992 8.20 - 8.24	4	17	—	62	33	67

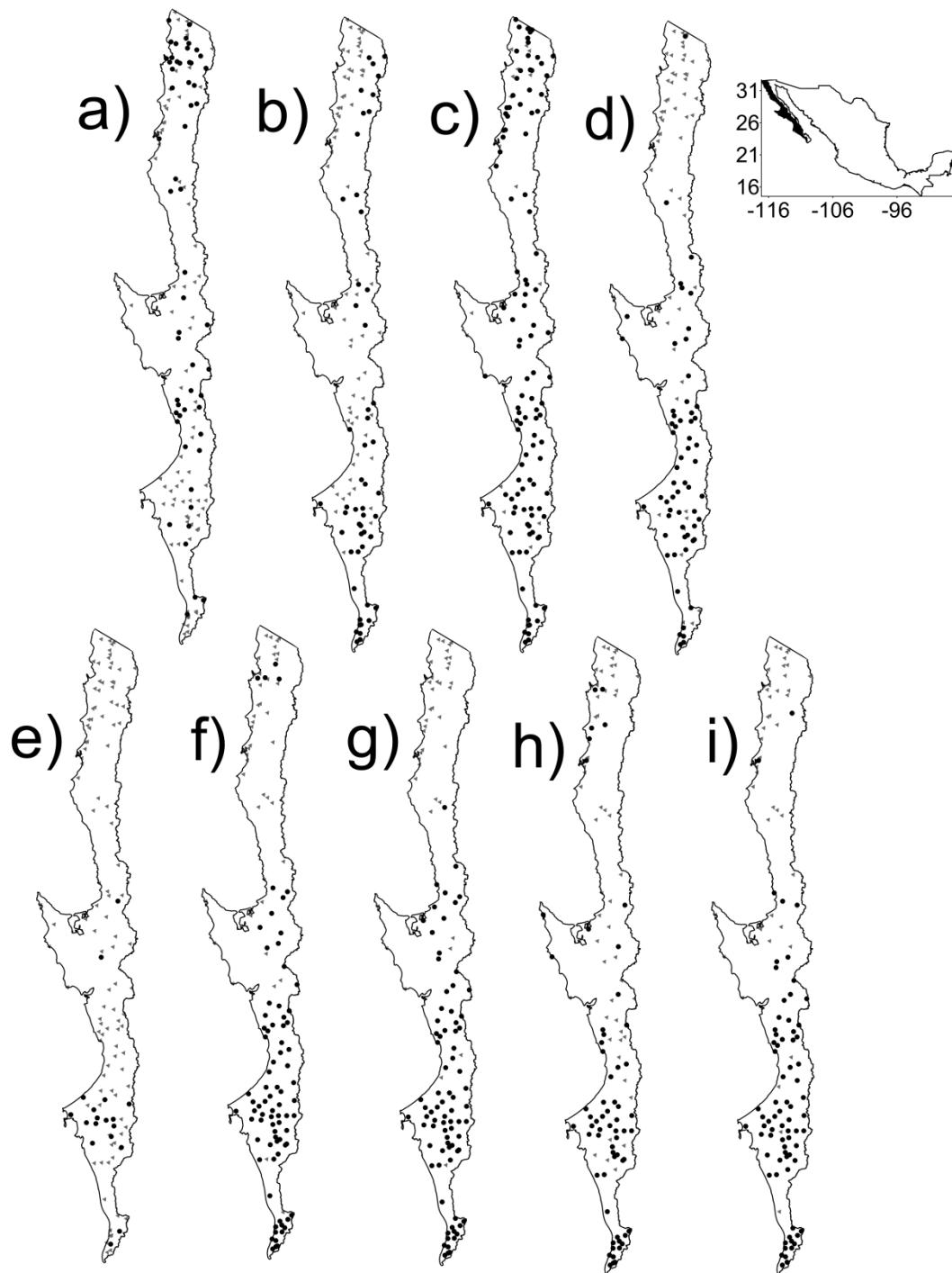


Figura 17. Distribución de estaciones en la zona 1 referente a la serie promedio regional de precipitación de verano (SPP1 de verano) correspondientes a los ciclones a)1, b)2, c)3, d)4, e)5, f)6, g)7, h)8 e i)9. Los triángulos grises muestran las estaciones cuyos datos de lluvia acumulada durante el ciclón respectivo no registraron valores de lluvia extremos y los puntos negros, las que sí.

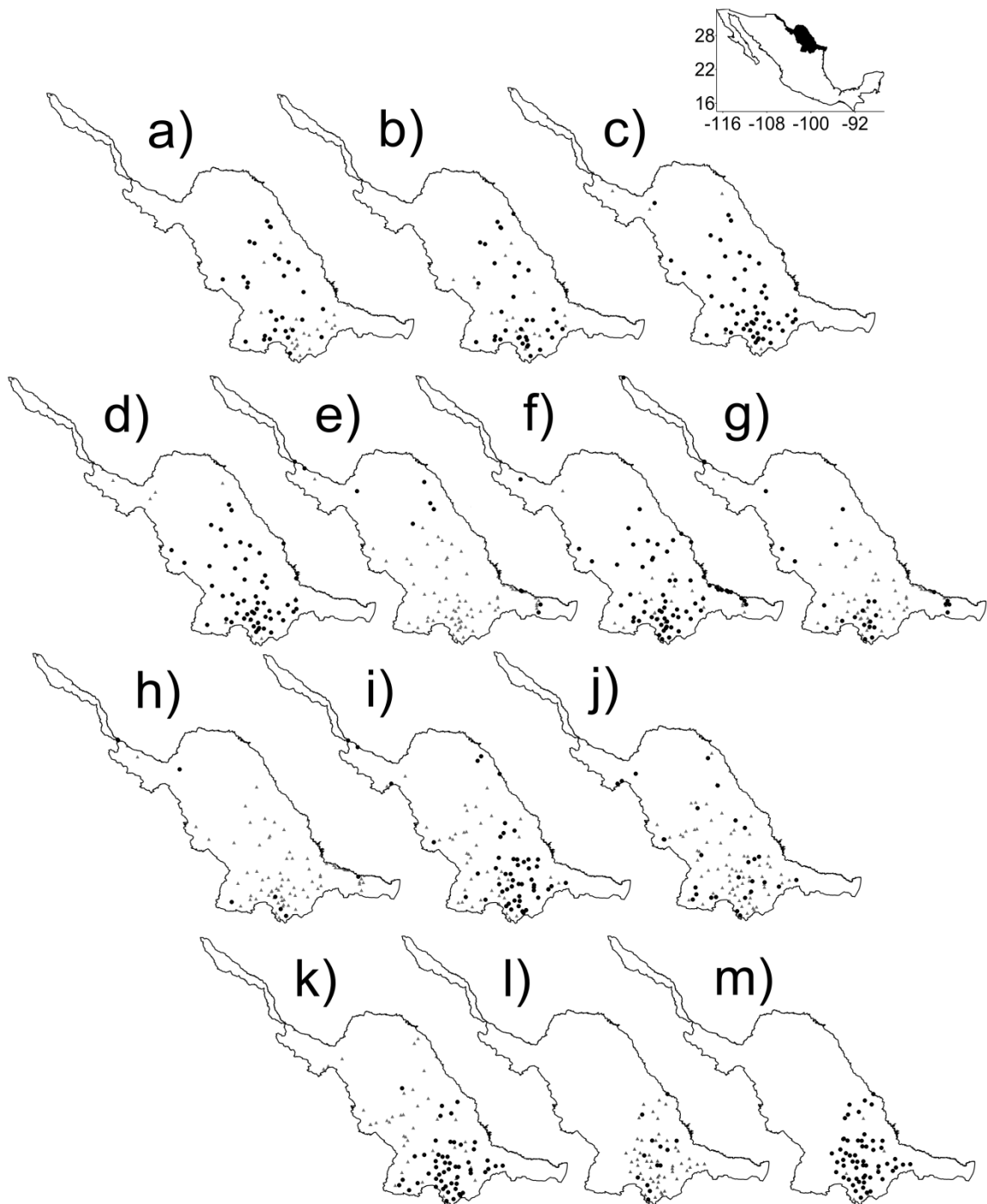


Figura 18. Distribución de estaciones en la zona 7 referente a la serie promedio regional de precipitación de verano (SPP7 de verano) correspondientes a los ciclones a)1, b)2, c)3, d)4, e)5, f)6, g)7, h)8, i)9, j)10, k)11, l)12 y m)13. Los triángulos grises muestran las estaciones cuyos datos de lluvia acumulada durante el ciclón respectivo no registraron valores de lluvia extremos y los puntos negros, las que sí.

Ciclón 7: Similar al caso ciclón 6 (Figura 17 g)).

Ciclón 8: Similar al caso ciclón 6, con la diferencia de que la concentración de EPX esta mayormente orientada al extremo sur (Figura 17 h)).

Ciclón 9: Similar al caso ciclón 6 (Figura 17 i)).

SPP7 de verano

Ciclón 1: Se observan EPX dispersas en general (Figura 18 a)) y en los valores acumulados de lluvia resaltan algunos de 80 mm o más, sin embargo sólo hay 32% de información y en el 67% de las estaciones no existen datos (Tabla VIII-c). Debido a la distribución de las EPX y a los valores observados en los acumulados de lluvia podría sospecharse de influencia ciclónica, pero en este caso se considera que no hay suficiente evidencia para determinar influencia ciclónica.

Ciclón 2: Se observan EPX dispersas en general (Figura 18 b)) y en los valores acumulados de lluvia no se observan valores sobresalientes. Se tiene 32% de información y en el 68% de las estaciones no existen datos (Tabla VIII-c). Hay poca información y sospechas bajas de influencia ciclónica.

Ciclón 3: Se observan EPX dispersas en general (Figura 18 c)) y en los valores acumulados de lluvia resaltan algunos de alrededor de 100 mm o más, sin embargo sólo hay 42% de información y en el 58% de las estaciones no existen datos (Tabla VIII-c). Debido a la distribución de las EPX y a los valores observados en los acumulados de lluvia podría sospecharse de influencia ciclónica, pero en este caso se considera que no hay suficiente evidencia para determinar influencia ciclónica.

Ciclón 4: Se observan EPX dispersas en general (Figura 18 d)) y en los valores acumulados de lluvia resaltan algunos de hasta 200 mm, cabe mencionar que la ocurrencia de este ciclón coincide en algunos días con el ciclón 3, por lo que se observan valores acumulados de lluvia considerablemente grandes e iguales en algunos días, lo que refuerza la sospecha de influencia ciclónica. Sin embargo sólo hay 42% de información y en el 58% de las

estaciones no existen datos (Tabla VIII-c), lo que dificulta determinar la influencia ciclónica.

Ciclón 5: Se observan unas pocas EPX del lado de la costa del Atlántico (Figura 18 e)), se tiene 52% de información, en el 48% de las estaciones no existen datos (Tabla VIII-c). En este caso, de acuerdo a la cantidad y distribución de las EPX, la sospecha es que no hay influencia ciclónica.

Ciclón 6: Se observan EPX en la parte sur de la región (Figura 18 f)). Entre los valores acumulados de lluvia resaltan algunos de más de 100 mm, se tiene 50% de información y en el 49% de las estaciones no existen datos (Tabla VIII-c) En este caso se considera que no hay suficiente evidencia para determinar influencia ciclónica.

Ciclón 7: Pocas EPX distribuidas principalmente en el sur (Figura 18 g)), se observan algunos acumulados de lluvia de más de 100 mm, se cuenta con 49% de información y en el 51% de las estaciones no existen datos (Tabla VIII-c). En este caso no hay suficiente información para determinar la existencia de influencia ciclónica.

Ciclón 8: Se observan muy pocas EPX (Figura 18 h)), no hay valores acumulados de lluvia sobresalientes, hay 49% de información y en el 51% de las estaciones no existen datos (Tabla VIII-c). Hay poca información y en este caso la sospecha esta mayormente inclinada a negar la e influencia ciclónica, aunque no hay suficiente evidencia.

Ciclón 9: EPX localizadas principalmente en el centro sur de la zona (Figura 18 i)). Se tiene 53% de información, en el 45% de las estaciones no existen datos (Tabla VIII-c) y en los acumulados de lluvia se observan valores de más de 100 mm. Por la distribución de las EPX y la poca información, en este caso se considera que no hay suficiente evidencia para determinar influencia ciclónica.

Ciclón 10: Las EPX están muy dispersas en la zona (Figura 18 j)), se tiene 56% de información, en el 43% de las estaciones no existen datos (Tabla VIII-c) y en los valores acumulados de lluvia no se observan cantidades sobresalientes, salvo una excepcional de

400 mm. Las EPX muestran una alta dispersión, pero no se tiene suficiente información para determinar influencia ciclónica o explicar el valor extremo de 400 mm.

Ciclón 11: EPX localizadas principalmente en el centro sur de la zona (Figura 18 k)). Se tiene 54% de información, en el 45% de las estaciones no existen datos (Tabla VIII-c) y en los acumulados de lluvia se observan valores de más de 100 mm y resalta uno de 600 mm. Por la distribución de las EPX y la poca información, en este caso se considera que no hay suficiente evidencia para determinar influencia ciclónica.

Ciclón 12: Hay muy pocas EPX (Figura 18 l)), no se observan valores acumulados de lluvia sobresalientes, se tiene 34% de información y en el 65% de las estaciones no existen datos (Tabla VIII-c), por lo tanto se considera que no hay suficiente información para concluir algo respecto a influencia ciclónica.

Ciclón 13: EPX localizadas principalmente en el centro sur de la zona (Figura 18 m)). En los acumulados de lluvia se observan valores extremos (por ejemplo de 400 mm y hasta de 600 mm) en casi todas las estaciones con datos, en este sentido la sospecha de influencia ciclónica es alta, a pesar de que sólo se cuenta con 36% de información y que en el 64% de las estaciones no existen datos (Tabla VIII-c).

SPP6 anual

Ciclón 1: Hubo 4 EPX (Tabla VIII-d), se observan algunos valores acumulados de lluvia de alrededor de 70 mm y en general existen relativamente pocas estaciones en esta zona. Se cuenta con 67% de información y en el 33% de las estaciones no existen datos (Tabla VIII-d). Por lo tanto en este caso se considera que no hay suficiente evidencia para determinar influencia ciclónica.

7.4 Análisis local: de incendios forestales

Las correlaciones estadísticamente significativas (al 95%) resultantes del análisis de correlación con desfases entre las series de lluvia acumulada con tendencia positiva significativa y las series de incendios forestales por Estado se muestran en la tabla IX.

Las correlaciones estadísticamente significativas entre los índices climáticos seleccionados y las series de incendios forestales por Estado se muestran en la tabla X.

Las gráficas de las estructuras de las series de incendios forestales y los índices climáticos correlacionados en cada caso corresponden a las figuras 19-24.

Las correlaciones estadísticamente significativas entre las series de lluvia acumulada con tendencia positiva significativa y los índices climáticos seleccionados se muestran en la tabla XI.

Baja California Sur: Se encontraron correlaciones estadísticamente significativas entre las series de lluvia acumulada y las series de incendios forestales (Tabla IX). Los valores más altos de correlación fueron de 0.56 (entre la serie de lluvia de la estación 3038 y el número de incendios forestales en la entidad) y de 0.63 (entre la serie de lluvia de la estación 3014 y la superficie /N incendios de la entidad), ambos casos sin desfase.

Se encontró correlación significativa entre el número de incendios y el AMO sin desfase (donde se observa el mayor valor de correlación) y también con 3 años de desfase (Tabla X). De acuerdo a lo anterior el número de incendios forestales aumentaría cuando el AMO esté en fase positiva, sin embargo esto no se observa al comparar las estructuras de las series (Figura 19), por lo que esta correlación podría ser falsa.

Se encontraron correlaciones significativas al 95% entre las series de lluvia acumulada con el NPI y con el AMO (Tabla XI). El mayor valor de correlación es de 0.54 sin desfase, entre el AMO y la serie de lluvia acumulada de la estación 3028.

Chihuahua: Se encontraron correlaciones estadísticamente significativas entre las series de lluvia acumulada y las series de incendios forestales de superficie afectada y de superficie/ N incendios (Tabla IX). El valor más alto de correlación (en valores absolutos) fue de -0.57 entre la serie de lluvia de la estación 8108 y la superficie/ N incendios (sin desfase), lo que indica que a mayor cantidad de lluvia, menor sería la efectividad de los incendios.

Tabla IX. Correlaciones estadísticamente significativas entre las series de lluvia acumulada para cada estación cuya tendencia hacia el incremento fue significativa y las series de incendios forestales por Estado., N incendios es el número de incendios, lag es el desfase en años, r es el valor de la correlación y SE es el error estándar.

Estado	Estación	N incendios			Superficie afectada (ha)			Superficie/ N incendios		
		lag	r	SE	lag	r	SE	lag	r	SE
Baja California Sur	3007	0	0.433	0.162				3	0.427	0.169
								6	0.372	0.177
	3014	0	0.458	0.162	0	0.503	0.162	0	0.635	0.162
	3028	0	0.542	0.162				7	0.431	0.180
	3038	0	0.568	0.162	0	0.330	0.162			
	3065	0	0.530	0.164						
Chihuahua	8097				7	0.404	0.180			
	8108							0	-0.577	0.258
	8121				0	-0.420	0.186			
	8161				0	-0.431	0.189			
Coahuila	5011				1	0.477	0.189			
					11	0.598	0.236			
Baja California	2036				7	0.443	0.213	5	0.471	0.204
								7	0.557	0.213
Nuevo León	19031	3	0.378	0.171						
	19048				0	-0.369	0.164	0	-0.389	0.164
								10	0.449	0.192
Sonora	26077	2	0.417	0.167				1	-0.334	0.164
		4	0.403	0.171						
		5	0.366	0.174						
	26083				4	0.450	0.204			
	26089	1	0.452	0.177	4	0.386	0.186			
		4	0.426	0.186	11	-0.458	0.213			
	26092	2	0.367	0.183	4	0.612	0.189			

En Chihuahua se encontraron correlaciones significativas entre las series de incendios y algunos índices climáticos (Tabla X):

Son significativas las correlaciones entre el número de incendios y el AMO ($r= 0.53$) y el PDO ($r= -0.33$) (Tabla X). En ambos casos la correlación ocurre sin desfase y para el caso

del AMO esta correlación fue máxima. De acuerdo a lo anterior el número de incendios forestales aumentar cuando el AMO está en fase positiva y el PDO en fase negativa, sin embargo al comparar las estructuras de las series (Figura 20) estas relaciones no son coincidentes en años particulares. Este resultado indica que las relaciones entre el número de incendios y los índices mencionados son más evidentes al comparar las oscilaciones de baja frecuencia.

Respecto a la correlación entre superficie afectada y los índices climáticos, las mayores correlaciones (en valores absolutos) se encontraron entre superficie afectada y el PDO ($r = -0.331$ con dos años de desfase) y superficie afectada y el ONI ($r = -0.405$, sin desfase entre las series) (Tabla X). Los valores negativos en las correlaciones indican que las oscilaciones de baja frecuencia están en contrafase, es decir con fase negativa de PDO y ONI, la superficie afectada muestra una tendencia hacia el incremento, aunque no necesariamente es así en años particulares (ver Figura 21).

Las correlaciones entre superficie/ N incendios y el AMO y el ALPI resultaron negativas mientras que la correlación entre superficie/ N incendios y PDO fue positiva (Tabla X). En el primer caso las mayores correlaciones (en valores absolutos) se observan con 2 años de desfase entre las series y con el PDO la mayor correlación se observa cuando hay 13 años de desfase entre las series. Los valores de correlación en estos casos, aunque modestos, indican una relación en las oscilaciones de baja frecuencia entre superficie/N incendios y los índices climáticos mencionados, la cual está ausente o es muy débil en años particulares (ver Figura 22). Más aún, en el caso del PDO la longitud del periodo de tiempo comparado entre las series resulta corta ya que la mayor correlación se observa cuando las series muestran un desfase de 13 años. En este caso es necesario disponer de un periodo de tiempo mucho más largo para verificar la fortaleza en la correlación.

Se encontraron correlaciones significativas (aunque con desfases de un año) entre las series de lluvia acumulada y el AMO y el NAO (Tabla XI). En el primer caso la correlación fue negativa entre la serie de lluvia acumulada de la estación 8097 y el AMO ($r = -0.422$),

mientras que la correlación fue positiva entre la serie de lluvia acumulada de la estación 8161 y el NAO ($r = 0.429$).

Tabla X. Correlaciones estadísticamente significativas entre los índices climáticos seleccionados y las series de incendios forestales por Estado., N incendios es el número de incendios, lag es el desfase en años, r es el valor de la correlación y SE es el error estándar.

Estado	Índice climático	N incendios			Superficie afectada (ha)			Superficie/ N incendios		
		lag	r	SE	lag	r	SE	lag	r	SE
Baja California Sur	AMO	0	0.381	0.160						
		3	0.339	0.167						
Chihuahua	AMO	0	0.535	0.160				1	-0.400	0.162
		1	0.434	0.162				2	-0.455	0.164
		2	0.464	0.164				3	-0.388	0.167
		3	0.445	0.167				4	-0.432	0.169
		4	0.409	0.169				5	-0.358	0.171
		5	0.441	0.171				6	-0.396	0.174
		6	0.379	0.174						
	PDO	0	-0.336	0.160	2	-0.331	0.164	13	0.425	0.196
	ONI				0	-0.405	0.160			
	ALPI							2	-0.403	0.164
Coahuila	AMO	0	0.415	0.160				0	-0.330	0.160
								4	-0.384	0.169
	ALPI				1	-0.385	0.162			
	NAO				1	0.397	0.162			
					4	0.362	0.169			
NPI				1	0.493	0.162				
Baja California	AMO	0	0.794	0.160						
		1	0.658	0.162						
		2	0.539	0.164						
Nuevo León	AMO	3	0.441	0.167						
		0	0.464	0.160						
		2	0.393	0.164						
	6	0.352	0.174							
ONI	0	-0.364	0.160							

Tabla X, continuación.

Estado	Índice climático	N incendios			Superficie afectada (ha)			Superficie/ N incendios		
		lag	r	SE	lag	r	SE	lag	r	SE
Nuevo León	NPI				1	0.428	0.162	1	0.392	0.162
	ALPI							1	-0.340	0.162
	NAO							5	0.399	0.171
Sonora	AMO	0	0.381	0.160						
		3	0.339	0.167						

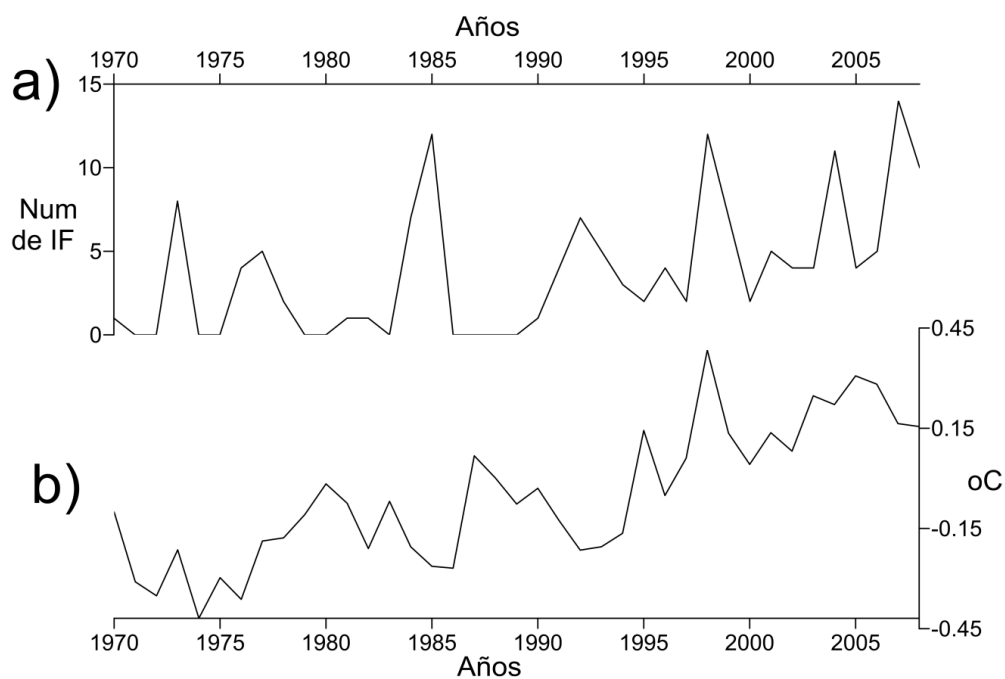


Figura 19. Estructuras de las series de a) número de incendios forestales en Baja California Sur y b) Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO).

Coahuila: Se encontraron correlaciones estadísticamente significativas entre la serie de lluvia acumulada de la estación 5011 y la serie de superficie afectada por incendios forestales (Tabla IX). El valor más alto de correlación fue de 0.59 (a 11 años de desfase), aunque la correlación aún sigue siendo alta a un año de desfase entre las series ($r = 0.48$).

En ambos casos la relación entre las series indica que a mayor cantidad de lluvia mayor será la superficie afectada por incendios forestales.

Cuando el análisis de correlación involucra la serie de todo el estado de Coahuila los resultados son variables. Por ejemplo, la correlación entre la serie de incendios forestales y el AMO resultó positiva ($r= 0.42$) sin desfase entre las series. En cambio las correlaciones entre la superficie afectada en la entidad y el ALPI, NAO, NPI y ONI resultaron significativas a diferentes desfases entre las series. El mayor valor de correlación ($r = 0.49$) ocurre entre la superficie afectada y el NPI cuando las series están desfasadas en un año. La Tabla X también muestra correlaciones significativas aunque negativas entre la superficie/ N incendios en Coahuila y el AMO sin desfase y con 4 años de desfase.

Para el caso de Coahuila no se encontraron correlaciones entre las series de lluvia acumulada con tendencia positiva y los índices climáticos.

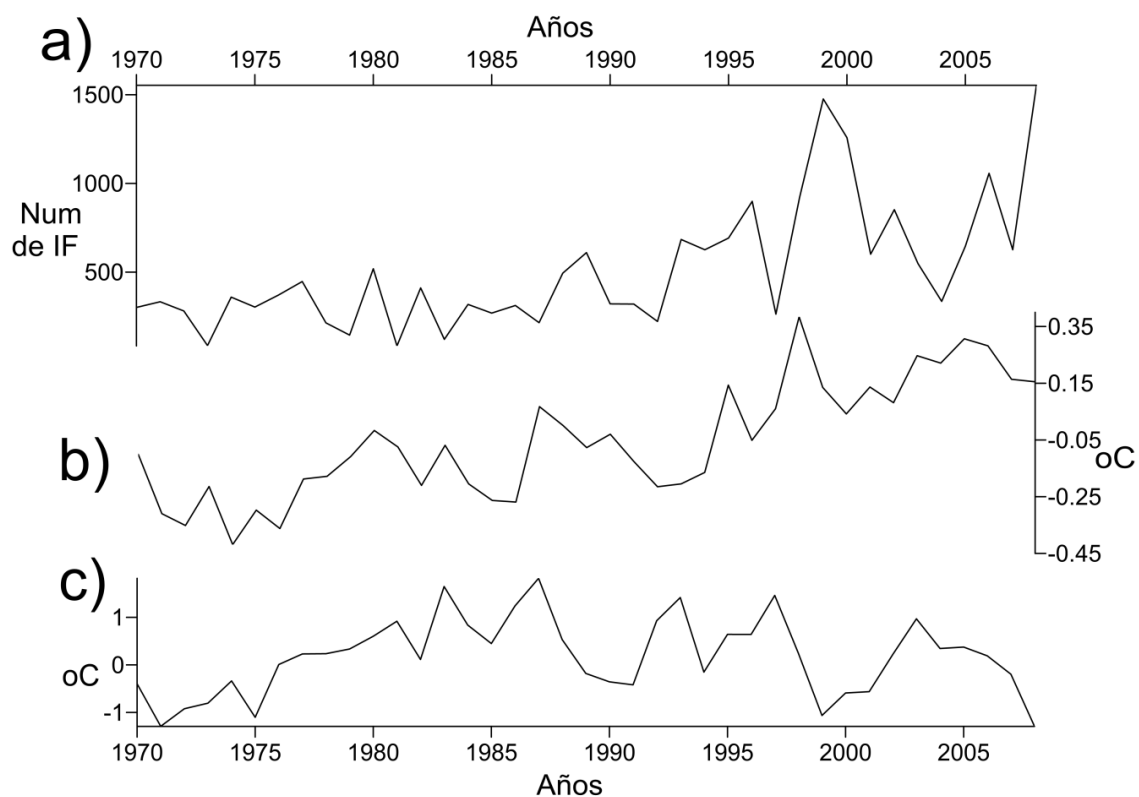


Figura 20. Estructuras de las series de a) número de incendios forestales en Chihuahua, b) Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) y c) Pacific Decadal Oscillation (PDO).

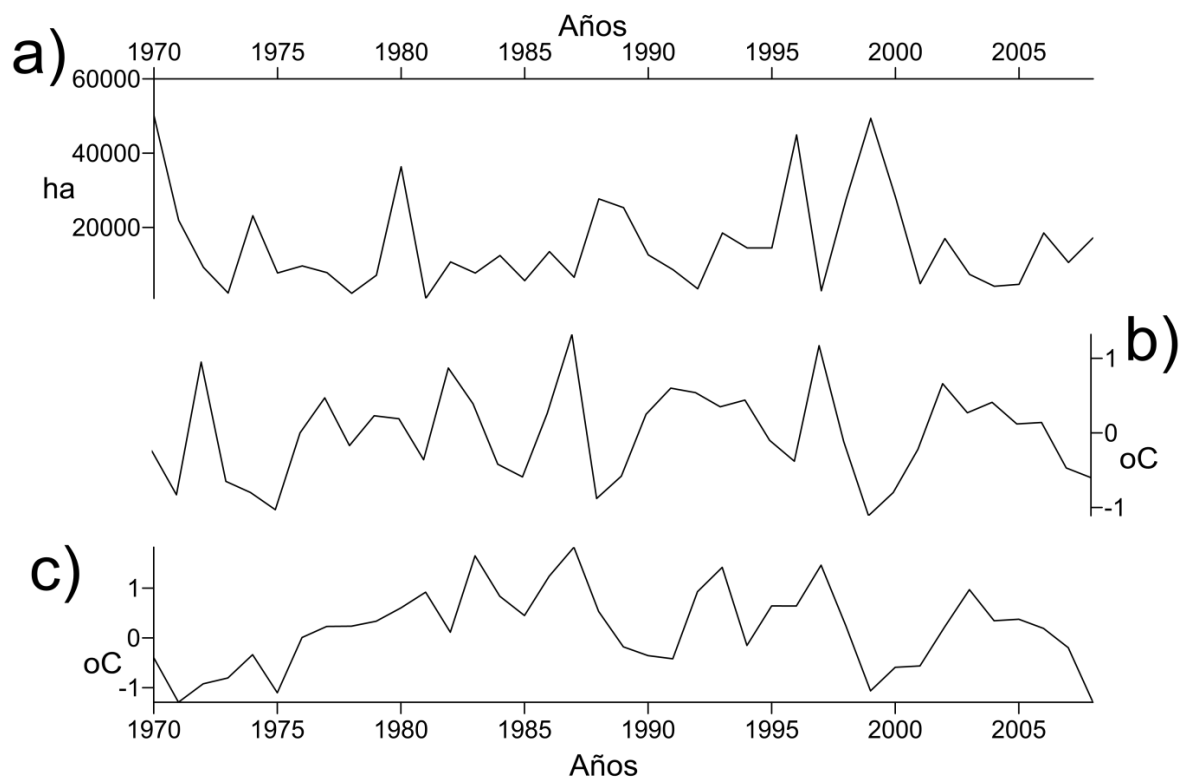


Figura 21. Estructuras de las series de a) superficie afectada por incendios forestales en Chihuahua, b) Oceanic Niño Index (ONI) y c) Pacific Decadal Oscillation (PDO).

Baja California: Se encontraron correlaciones positivas estadísticamente significativas entre la serie de lluvia acumulada de la estación 2036 y las series de incendios forestales de superficie afectada y de superficie/ N incendios (Tabla IX). El valor más alto de correlación ($r= 0.55$) fue con respecto a la superficie/ N incendios con 7 años de desfase.

A nivel estatal (Tabla X) se encontraron correlaciones significativas entre el número de incendios y el AMO, donde resalta un valor $r = 0.79$ con las series sin desfase. Esto indica que el número de incendios forestales aumenta cuando el AMO se encuentra en fase positiva. Al comparar la estructura de las series (Figura 23) se observa gran similitud en su comportamiento otorgando mayor evidencia a la fortaleza de la correlación.

Se encontraron correlaciones significativas al 95% entre la serie de lluvia acumulada de la estación 2036 y el ALPI, NPI y PDO (Tabla XI). El valor más grande de correlación (en valores absolutos) ocurre sin desfase con respecto al NPI ($r = -0.54$).

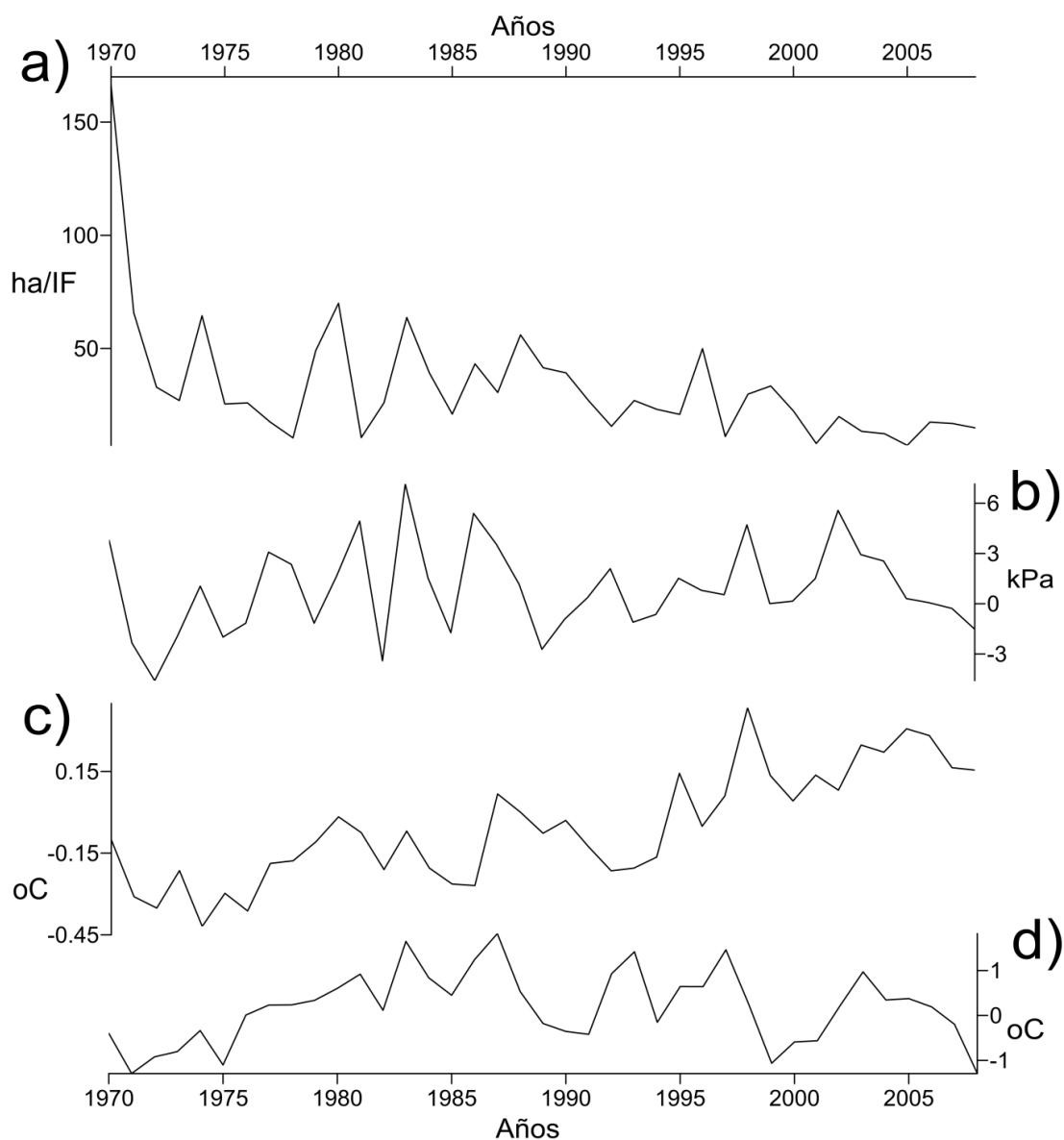


Figura 22. Estructuras de las series de a) efectividad de los incendios forestales en Chihuahua, b) Aleutian Low Pressure Index (ALPI), c) Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) y d) Pacific Decadal Oscillation (PDO).

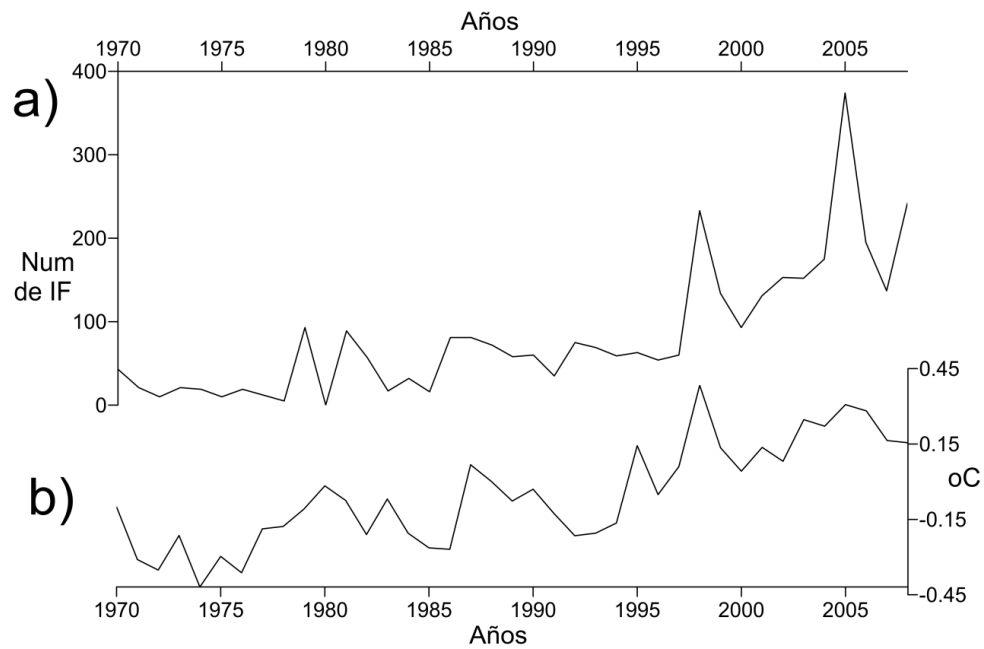


Figura 23. Estructuras de las series de a) número de incendios forestales en Baja California y b) Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO).

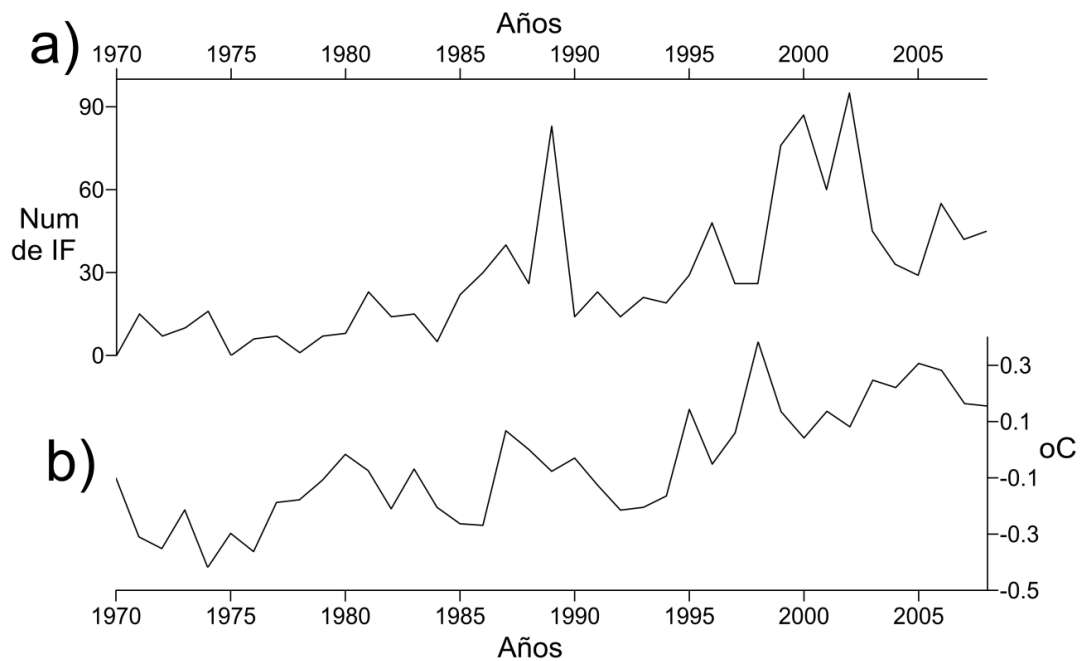


Figura 24. Estructuras de las series de a) número de incendios en Sonora y b) Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO).

Tabla XI. Correlaciones estadísticamente significativas entre las series de lluvia acumulada para cada estación cuya tendencia hacia el incremento fue significativa y los índices climáticos seleccionados., lag es el desfase en años, r es el valor de la correlación y SE es el error estándar.

Estado	Estación	Índice climático	lag	r	SE
Baja California Sur	3007	NPI	3	-0.367	0.169
	3028	AMO	0	0.545	0.162
			1	0.386	0.164
			2	0.459	0.167
			3	0.403	0.169
			4	0.377	0.171
			5	0.358	0.174
6	0.428	0.177			
3065	AMO	14	0.429	0.209	
Chihuahua	8097	AMO	1	-0.422	0.164
	8161	NAO	1	0.429	0.192
Baja California	2036	ALPI	0	0.404	0.186
		NPI	3	0.405	0.196
			0	-0.540	0.186
PDO	1	0.383	0.189		
Nuevo León	19031	AMO	8	0.381	0.186
			9	0.418	0.189
			10	0.392	0.192
			11	0.431	0.196
	19048	NAO	8	-0.372	0.186
			0	0.412	0.164
			0	0.464	0.164
	19053	NAO	1	-0.373	0.167
19061	AMO	0	-0.334	0.164	
19061	NAO	5	0.473	0.186	
Sonora	26077	AMO	0	0.374	0.162
			1	0.395	0.164
			2	0.414	0.167
			3	0.543	0.169
			4	0.480	0.171

Tabla XI, continuación.

Estado	Estación	Índice climático	lag	r	SE
Sonora	26077	NPI	0	-0.446	0.162
	26083	PDO	2	0.438	0.196
	26092	NPI	6	0.403	0.196

Nuevo León: Se encontraron correlaciones estadísticamente significativas entre las series de lluvia acumulada y las series de incendios forestales de Nuevo León (Tabla IX). El valor más alto de correlación fue de 0.44, y se observa entre la serie de lluvia de la estación 19048 y la serie de superficie/ N incendios con 10 años de desfase entre las series.

A nivel estatal se encontraron correlaciones significativas entre las series de incendios forestales y algunos índices climáticos (Tabla X). La correlación resultó positiva entre el número de incendios y el AMO ($r= 0.46$) y negativa entre el número de incendios y el ONI ($r= -0.36$). La superficie afectada resultó correlacionada con el NPI ($r= 0.43$) mientras que la superficie/ N incendios se correlacionó con el NPI, ALPI y NAO. El valor más grande de correlación ocurre entre la serie de número de incendios y el AMO sin desfase entre las series ($r = 0.46$).

Se encontraron correlaciones significativas al 95% entre las series de lluvia acumulada y el AMO, NAO, ONI y PDO (Tabla XI). El valor más grande de correlación (en valores absolutos) ocurre entre la serie de lluvia acumulada de la estación 19061 y el NAO ($r = 0.47$) con 5 años de desfase entre las series.

Sonora: Se encontraron correlaciones estadísticamente significativas entre las series de lluvia acumulada y el número de incendios forestales y las series de superficie afectada (Tabla IX). El valor más alto de correlación (en valores absolutos) fue de 0.61, entre la serie de lluvia de la estación 26092 y la serie de superficie afectada con 4 años de desfase.

A nivel estatal se encontró correlación significativa entre el número de incendios y el AMO, donde el mayor valor de correlación ocurre cuando no hay desfase entre las series (r

= 0.38) (Tabla X). De acuerdo a lo anterior el número de incendios forestales aumenta cuando el AMO está en fase positiva. Esta relación no es tan obvia en años particulares pero resulta más evidente cuando la atención se centra en las oscilaciones de baja frecuencia entre las series (Figura 24).

Se encontraron correlaciones significativas entre las series de lluvia acumulada y el AMO, NPI y PDO (Tabla XI). El mayor valor de correlación ocurre entre la serie de lluvia acumulada de la estación 26077 y el AMO con 3 años de desfase ($r = 0.54$).

8. DISCUSIÓN

Brito-Castillo (2012) encontró que muchas estaciones localizadas en el norte de México (NMX) poseen una característica común: tendencia hacia el incremento en los acumulados de lluvia anual, de verano e invierno. Si bien hay muchas otras estaciones en el NMX que al parecer no muestran ninguna tendencia, o por el contrario la tendencia es hacia la disminución de las lluvias, el patrón general de las estaciones que muestran tendencia estadísticamente significativa es hacia el incremento. Este resultado motivó la necesidad de realizar un análisis más detallado cuyo propósito fue interpretar correctamente los cambios que se observan en los patrones de lluvia en el NMX. Debido a que las estaciones cuyos registros muestran tendencias significativas están dispersas en todo el NMX (ver Figura 1), se decidió agruparlas según los contornos de los parteaguas de las cuencas hidrológicas. En la agrupación, se tomaron en cuenta todas las estaciones localizadas en el NMX y no solo las que tienen más de 40 años de registros. De este modo, se intentó demostrar que si las tendencias hacia el incremento en las lluvias en el NMX son una característica regional, al agrupar las estaciones en zonas más pequeñas (como aquí se hace), la serie promedio calculada a partir de los datos de todas las estaciones localizadas en cada grupo o región, deberá mostrar tendencia estadísticamente significativa. Si este es el caso, el resultado se interpreta como una señal de tendencia lo suficientemente fuerte como para considerar que la tendencia es en efecto una característica regional (común a todas las series). Este procedimiento exploratorio carece de una respuesta sobre las causas que dieron origen a las tendencias, ya que el entendimiento de los cambios y perturbaciones climatológicas requiere estudiar las variaciones y evolución de diversos forzamientos asociados al sistema climático (Ramaswamy *et al.* 2006). Particularmente en regiones con una amplia variación en la latitud, como por ejemplo en la península de Baja California, la serie promedio no hace una distinción del origen de las lluvias, pero como se sugiere más arriba, si la tendencia hacia el incremento es una característica regional, aún las estaciones cuyos registros son cortos deberán mostrar señales de esa característica común. Los registros cortos son útiles para verificar la ocurrencia de eventos extremos que en algunas ocasiones inciden en la dirección que toma la tendencia, particularmente cuando éstos ocurren al

inicio o al final de la serie. Un análisis posterior intenta explicar las causas de las tendencias considerando otros atributos o características de las series individuales.

Con la metodología aquí aplicada, se encontró la existencia de patrones regionales de lluvia, desde que se determinó que las tendencias de algunas SPP son estadísticamente significativas. A pesar de que la cantidad de estaciones que registraron eventos extremos es relativamente pequeña (Tablas IV a-d) estas se encuentran suficientemente bien representadas en las SPP para contribuir a la tendencia.

Se encontraron varios casos entre las SPP donde las medias y varianzas resultaron sin diferencias (Tablas III a-c) de donde se observaron 3 clases de situaciones: casos que no parecen tener una descripción obvia, otros bajo la posible influencia de un forzamiento climático común y algunos con similitudes aparentemente aleatorias. A continuación se discute a detalle:

La similitud encontrada entre las regiones 2 y 6 se presentó en los periodos anual y de verano (Tablas III-a y -c), este resultado puede ser porque ambas zonas son áridas y la contribución de lluvia de verano en zonas áridas es mucho mayor que la contribución de lluvia de invierno al acumulado de lluvia anual, sin embargo debido a la distancia geográfica que existe entre ellas es cuestionable considerar agruparlas como una sola región, por lo tanto se concluye que la relación encontrada es atribuible a causas aleatorias. Los siguientes casos tuvieron similitud únicamente en el periodo de invierno y su explicación es también atribuible al azar: regiones 1 y 3, 2 y 5, 2 y 7, y 3 y 7 (Tabla III-b).

La similitud encontrada entre las regiones 3 y 5 se presentó en los periodos anual y de verano (Tablas III-a y -c), estas zonas son contiguas y el resultado tiene sentido toda vez que el acumulado anual de precipitación recibe un aporte mayor de las lluvias de verano que de invierno. En este caso el sistema de circulación monzónica de verano tiene un mayor peso en la media y varianza de la precipitación de ambas regiones que los sistemas extratropicales generadores de lluvia de invierno.

La similitud encontrada entre las regiones 2 y 4 se presentó en los periodos de invierno y de verano (Tablas III-b y -c), pero no en el anual lo que resulta incongruente, por lo tanto la explicación de este resultado no es obvia y se considera un caso raro.

Las regiones 4 y 6 presentaron similitud en los tres periodos analizados (anual, invierno y verano) (Tablas III-a-c), lo mismo se encontró entre las regiones 5 y 6. Al relacionar estos resultados se esperaría que no hubiera diferencias entre las regiones 4 y 5, sin embargo esto sólo ocurrió en el periodo de invierno (Tabla III-b), por lo tanto no se puede afirmar que toda esta zona, que es del altiplano, tiene medias y varianzas similares, hecho que se ve reforzado al no encontrar la misma correspondencia de similitudes en verano. De lo anterior se deduce que los procesos que afectan la precipitación en esta área no tienen la misma influencia en toda la zona y que además esto varía de acuerdo a la estación (invierno o verano), por lo que se concluye que para el altiplano:

Los resultados del periodo anual son reflejo de lo que sucede en verano. Durante el invierno la zona se ve afectada por sistemas extratropicales que indican que tanto la variabilidad de las lluvias como la media, no muestran diferencias estadísticamente significativas. Durante el verano en la zona sur (regiones 5 y 6) no se muestran diferencias significativas en los estadísticos (Tabla III-c), lo que indica que los efectos que dan origen a las lluvias y que están asociados a la circulación monzónica son diferentes entre la zona del altiplano hacia el norte (región 4), y la del altiplano hacia el sur.

Del análisis discutido resalta (como ya se mencionó antes) que la SPP4, cuya tendencia es estadísticamente significativa, resultó sin diferencias en medias y varianzas con la SPP6 durante los 3 periodos (anual, verano e invierno) (Tablas III-a-c). Hay que decir que estas regiones corresponden a la zona del Altiplano y podría sospecharse que la explicación de la varianza de la precipitación de ambas regiones este asociada por procesos similares, por ejemplo correlaciones con índices climáticos en común. En la tabla V se observa que la SPP4 an está correlacionada con el NAO y el PDO, pero no se reporta ninguna correlación para la SPP6 an. Sin embargo al tener en cuenta las oscilaciones de baja frecuencia de las SPP, consultando las tablas VI-a y VI-d se distingue que efectivamente estas regiones

tienen 4 forzamientos en común: ALPI, AMO, NAO y PDO. El ALPI y el NAO son índices atmosféricos, mientras que el AMO y el PDO son oceánicos.

Vega Camarena (2012) reporta que para el Estado de Chihuahua la principal teleconexión de la precipitación anual es el AMO y en invierno el PDO y el ENSO. La SPP4 abarca una parte considerable de Chihuahua y es una serie anual. Las tablas V y VI-a muestran correlaciones con el PDO, resaltando una con valor de 0.89, mientras que el AMO resultó correlacionado sólo en la tabla VI-a con valores negativos de alrededor de 0.4, hay que decir también que la correlación más grande fue con el NAO (0.93). Únicamente en el análisis de series individuales (tabla XI) dominó el Atlántico con correlaciones con el AMO y el NAO. De esto se puede decir que en este caso las teleconexiones de mayor influencia son respecto al Atlántico mediante el NAO y con el Pacífico con el PDO. Aunque el signo de los valores de correlación del AMO y el PDO coincide con los resultados del trabajo de Vega Camarena (2012), lo referente a la dominancia del AMO no, esto puede deberse a que Vega Camarena utilizó información de un mayor número de estaciones distribuidas en todo Chihuahua, mientras que la región 4 de este trabajo no abarca la totalidad del territorio estatal (tomando en cuenta también un menor número de estaciones) y finalmente Vega Camarena usó promedios anuales y no SPP.

En general, analizando las correlaciones entre los índices climáticos y las SPP se encontraron más correlaciones significativas, así como valores de correlación más altos, al hacer el análisis con las SPP filtradas mediante promedios móviles (Tablas VI-a-d), esto indica la relación de las oscilaciones de baja frecuencia entre los índices y las SPP. Sin embargo hay que resaltar que este método reduce la ventana de tiempo estudiada.

Se encontró una correlación con un valor de 0.93 entre la SPP4 an y el NAO con un año de desfase (Tabla VI-a). Este dato es valioso porque no se trata de una coincidencia de fases, ya que esto indica que el 80% de la explicación de la varianza de la lluvia es explicada por las variaciones del NAO, de modo que puede resultar útil para hacer predicciones, no sólo a un año sino también a 2 y 3 años, ya que los valores de correlación también son altos (0.8) en esos casos. Algo similar ocurre con el PDO, que presentó valores de correlación de 0.8

sin desfase y a 1 y 2 años de desfase (Tabla VI-a). Un tercer caso es el de la SPP6 an y el AMO, donde la correlación resultó negativa, con valores de 0.7 sin desfase y a 1 y 2 años de desfase (Tabla VI-d).

En todas las veces el AMO y el PDO (que son índices oceánicos) resultaron correlacionados con las SPP, lo que sustenta la hipótesis planteada de que la mayor parte de la explicación de la varianza de la lluvia en el NMX está determinada por las variaciones del Atlántico y del Pacífico. Cabe resaltar que particularmente las regiones del Altiplano (SPP4 y SPP6) fueron las que tuvieron los valores de correlación más grandes.

Se puede afirmar entonces que algunos índices climáticos están asociados a la explicación de la varianza de la precipitación de las SPP (en algunos casos en gran proporción). Ahora se discutirá acerca de la influencia de ciclones tropicales. Para la región 4 en general, la información no se consideró suficiente como para determinar influencia ciclónica sobre los valores extremos de precipitación y lo mismo en la región 6. En la región 7 se encontraron valores muy altos de lluvia acumulada, pero la evidencia tampoco se consideró suficiente. En la región 1 si se consideró que hubo afectaciones ciclónicas, especialmente en la zona sur, y que pudieran estar influyendo en la tendencia de la SPP porque los años de eventos extremos son de los más recientes del periodo de estudio (figura 11).

Hasta el momento se ha aclarado que existen patrones regionales y que las SPP están mayormente influenciadas por fenómenos de escala planetaria (teleconexiones) tanto atmosféricos como oceánicos, más que por fenómenos de escala sinóptica (ciclones), ahora falta cruzar esta información con la ocurrencia de incendios forestales y es lo que se discute en seguida.

En la tabla IX se muestran correlaciones significativas al 95% a distintos desfases. Si la correlación es positiva esto es que a más lluvia mayor número de incendios, de superficie afectada o de efectividad, y si es negativa es que a menor cantidad de lluvia mayor número de incendios, de superficie afectada o de efectividad.

Observando la columna de número de incendios: en el caso de Baja California Sur (BCS) se observa correlación sin desfases (Tabla IX), esto no es precisamente lo que se esperaría, ya que la ocurrencia de los incendios debería ser posterior a los años lluviosos. Esto es debido a que como se ha explicado en la literatura, durante una temporada lluviosa hay crecimiento de vegetación y por lo tanto de material orgánico disponible que funciona como combustible si en la siguiente temporada las lluvias son escasas. Una posible explicación de esto es que el periodo anual de las series de incendios forestales es de enero a diciembre y el de las series de lluvia es de mayo a abril, por lo tanto un mismo año de la serie de incendios abarcaría series de lluvia de dos años distintos. Cabe mencionar que al tener en cuenta los periodos de lluvia, la determinación del año de enero a diciembre es artificial.

La tabla IX también muestra que las estaciones con tendencia positiva significativa de BCS están correlacionadas con la superficie afectada sin desfases, es decir que a más lluvia mayor será la superficie afectada por incendio (en el párrafo anterior se planteó una posible explicación a esto), y también hubo correlaciones con la efectividad (superficie/ N incendios) con valores r de entre 0.37 y 0.64 a distintos desfases. Cabe decir que la región 1 y particularmente la zona sur (que es BCS) está afectada por ciclones, de manera que si estos eventos influyen en las tendencias entonces también podrían estar asociados a los incendios.

A diferencia de BCS, en Sonora (Son) los resultados son muy distintos, porque hay correlaciones a diferentes desfases (Tabla IX), de manera que se esperaría que los forzamientos asociados a las correlaciones en BCS y en Sonora sean diferentes entre sí. Sin embargo al observar las correlaciones con los índices climáticos (Tabla X) resultó que BCS y Sonora comparten el AMO como forzamiento sobre el número de incendios. Una posible explicación es que la tendencia positiva de las series de lluvia simplemente haya coincidido con la fase positiva del índice climático y esto se soporta al observar que los valores de correlación entre BCS y Son con el AMO son relativamente bajos y que las estructuras de las series no son similares. Estas diferencias pueden estar asociadas a los tipos de vegetación de cada zona. Esta es sólo una hipótesis que se sugiere para estudios posteriores,

en base a que la Comisión Nacional Forestal *et al.* (2008) señalan al combustible como el principal factor determinante para que se inicie o no un incendio y que a su vez ello está en función de las características propias del combustible (cantidad, tamaño, textura, continuidad del combustible, densidad de la madera, humedad etc.), de donde resulta congruente sospechar que el tipo de ecosistema y de vegetación sea de importancia.

El AMO fue el índice con mayor número de correlaciones significativas (Tabla X), ya que resultó significativo en todos los Estados analizados, particularmente en relación al número de incendios. La CONAFOR (citado en Cruz Aguirre, 2012) ha señalado que una alta cantidad de material combustible (follaje seco) puede influir en la ocurrencia de incendios forestales y que el origen de este combustible puede estar asociado a fuertes lluvias. Al tener en cuenta que el AMO influye en la ocurrencia de lluvias extremosas y sequías en el hemisferio Norte y particularmente en Norteamérica (NOAA, 2005), la correlación frecuente del AMO con las series de número de incendios resulta coherente.

Se encontró un caso con un valor de correlación particularmente alto, el número de incendios en BC presentó una correlación de 0.79 con el AMO (Tabla X). Este resultado es importante porque esta correlación es real y no se trata de una coincidencia con la fase del índice. Esto se comprueba al observar la similitud entre las estructuras de ambas series (Figura 23). Por lo tanto esta información puede ser útil para hacer predicciones, ya que este resultado indica que más de la mitad de la explicación de la varianza del número de incendios forestales en BC es explicada por las variaciones del AMO. No obstante la tendencia de lluvia acumulada de BC no tuvo correlación con el AMO (Tabla XI), entonces podría ser que la relación entre el AMO y el número de incendios forestales en BC sea en función de las sequías.

Al observar la tabla XI también resulta que el AMO es el índice correlacionado más veces, por lo menos en una estación de cada Estado (excepto en BC). En la hipótesis se planteó que también el PDO sería uno de los índices de mayor influencia en la varianza de las tendencias de precipitación, sin embargo en el análisis local (es decir para series de estaciones individuales) el PDO resultó correlacionado únicamente en una estación de BC,

una de Nuevo León y otra de Sonora (Tabla XI); mientras que en el análisis regional (es decir para las SPP) resultó correlacionado únicamente con la SPP4 anual (Tabla V), aunque hay que decir que al hacer el análisis de correlación con las SPP filtradas con promedios móviles el PDO (Tablas VI-a-d) si resultó significativamente correlacionado todas las veces.

Los resultados de correlación entre los índices climáticos y las series de lluvia difieren en el análisis local y regional: en el local predomina el AMO y en el regional el ONI y el NAO. Según Seager *et al.* (2009), parte de la variabilidad del clima en el NMX es explicada por la observada en los Océanos Pacífico y Atlántico, el resultado de este trabajo, a escala regional concuerda en cuanto a la influencia predominante del Atlántico, pero no del Pacífico, esta diferencia puede deberse a cuestiones de escalas de tiempo y espacio, ya que el trabajo de Seager (2009) fue para todo México y utilizó un periodo de datos distinto. Esta explicación propuesta se sustenta desde que a escala interdecenal (aunque aún regional) el resultado sí coincide en cuanto a la dominancia del Pacífico y el Atlántico.

9. CONCLUSIONES

Existen tendencias estadísticamente significativas hacia el incremento y patrones regionales de lluvia en las regiones 4 y 6 en el periodo anual y en las regiones 1 y 7 en el periodo de verano. De las cuales SPP4 an y SPP6 an, que pertenecen a la zona del Altiplano, comparten algunos forzamientos oceánicos y atmosféricos (ALPI, AMO, NAO y PDO).

Existen mas y mayores valores de correlación estadísticamente significativos al comparar las series de los índices climáticos y las SPP teniendo en cuenta las oscilaciones de baja frecuencia de ambas series.

A nivel regional, se encontraron correlaciones altamente significativas y valiosas en la zona del Altiplano. En la región 4 el NAO y el PDO pueden ser útiles para hacer predicciones, toda vez que se obtuvieron valores de correlación significativos de 0.9 y 0.8 respectivamente, y ello se sustenta al observar que las estructuras de las series son muy

parecidas; y lo mismo en la región 6 donde el AMO tuvo un valor de correlación significativo de -0.7.

Existe influencia ciclónica sobre los valores extremos de la región 1 y en la tendencia de su SPP. Aunque hubo sospechas en los casos de las regiones 4, 6 y 7, se consideró que no hubo suficiente información para concluir algo al respecto.

En BCS y en Sonora las tendencias de lluvia están correlacionadas con el número de incendios, en Coahuila con la superficie afectada y en BC con la efectividad.

En Sonora y BCS las tendencias de lluvia están correlacionadas con el número de incendios, pero son casos distintos, ya que en BC la relación resultó sin desfases y en Sonora a distintos años de desfase, sin embargo comparten un mismo forzamiento: el AMO; y se observa que en ambos Estados las estructuras de las series de incendios son distintas. Estas diferencias pueden estar asociadas a los tipos de vegetación de cada zona, pero, como ya se mencionó en la discusión, esto se plantea como una hipótesis para estudios posteriores.

El AMO es el índice que más veces se correlaciona con el número de incendios y en el caso de BC es útil para hacer predicciones ya que el valor de su correlación es alto (0.79) y las estructuras de ambas series son muy parecidas, por lo que no se trata de una coincidencia.

El AMO también es el índice que en el análisis local, más veces se correlaciona con las series de lluvia.

Los forzamientos asociados a la precipitación son distintos según se hizo en el análisis local o regional. A nivel local parece ser que el AMO predomina y a nivel regional el ONI y el NAO. No obstante al correlacionar los índices climáticos con las SPP tomando en cuenta las oscilaciones de baja frecuencia se observa que efectivamente los índices predominantes son el AMO y el PDO, de manera que la hipótesis planteada al inicio de este trabajo resultó ser cierta a escala de tiempo y espacio interdecenal y regional respectivamente. Cabe aclarar que al realizar análisis de regresión múltiple se encontró que el AMO contribuye

con un mayor porcentaje a la explicación de la varianza de las series regionales, y en el modelo de regresión no está incluido el PDO. Este resultado indica que aún cuando hay correlación significativa entre el PDO y las series regionales de precipitación, este índice no aporta información adicional diferente a la que es aportada por el AMO en el modelo de regresión múltiple.

10. LITERATURA CITADA

Beamish, R.J., C.E. Neville, A.J. Cass. 1997. Production of Fraser River sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in relation to decadal-scale changes in the climate and the ocean. *Can J Fish Aquat Sci.* 54: 543-554.

Brito-Castillo, L., S.C. Díaz-Castro, R.S. Ulloa-Herrera. 2009. Observed tendencies in maximum and minimum temperatures in Zacatecas, Mexico and possible causes. *Int J Climatol.* 29: 211-221. DOI: 10.1002/joc.1733

Brito-Castillo, L. 2012. Regional Pattern of Trends in Long-Term Precipitation and Stream Flow Observations: Singularities in a Changing Climate in Mexico. En Guoxiang Liu (ed.) *Greenhouse gases-Emission, Measurement and Management*. Editorial INTECH open access. Croatia. 504p. ISBN: 978-953-51-0323-3.

Comisión Nacional Forestal, J. Cibrian-Tovar, R. Martínez-Domínguez, A. Raygoza-Martínez. 2008. *Incendios Forestales. Serie Fascículos*. Editorial IAG Color S.A de C.V. 3ª Edición. México D.F. 45p. ISBN: 978-607-7558-10-1.

CONAFOR. 2013. Comisión Nacional Forestal, sitio web en: <http://www.conafor.gob.mx> (abril de 2013).

Cruz-Aguirre. 2012. *Incendios Forestales: México 50 años de atraso* (se puede consultar en <http://www.sinembargo.mx/23-02-2012/158799>, abril de 2013).

Díaz-Castro, S.C., C. Salinas, S. Hernández. 2008. Variability of rainfall from tropical cyclones in northwestern Mexico and its relation to SOI and PDO. *Atmosfera.* 21: 213-223.

Domínguez-Duarte, S. 2010. *Análisis de eventos hidrometeorológicos extremos en Sonora. Tesis para obtener el título de Licenciado en Ecología*. Centro de Estudios Superiores del Estado de Sonora. Unidad Académica Hermosillo. Hermosillo, Sonora, 94p.

Drury, S.A., T.T. Veblen. 2008. Spatial and temporal variability in fire occurrence within the Las Bayas forestry reserve, Durango, Mexico. *Plant Ecol.* 197:299-316. DOI: 10.1007/s11258-007-9379-5.

El Universal. 2012. Sequía en Chihuahua. Sitio web en <http://www.eluniversal.com.mx/notas/826196.html> (abril de 2012).

Englehart, P.J., A.V. Douglas. 2004. Characterizing regional-scale variations in monthly and seasonal surface air temperature over Mexico. *Int J Climatol.* 24: 1897-1909. DOI: 10.1002/joc.1117.

Farfán, L.M., 2011. Eastern Pacific tropical cyclones and their impact over western Mexico. En: Klapp et al. (eds.) *Experimental and theoretical advances in fluid dynamics, Environmental Science and Engineering.* Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 517p. DOI: 10.1007/978-3-642-17958-7_9. ISBN: 978-3-642-17957-0.

Fulé, P.Z., L.L. Yocom, C. Cortés-Montaña, D.A. Falk, J. Cerano, J. Villanueva-Díaz. 2012. Testing a pyroclimatic hypothesis on the Mexico-United States border. *Ecology.* 93 (8): 1830-1840.

García-Arróliga, N., R. Marín-Cambranis, K. Méndez-Estrada. 2010. Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2009. Secretaría de Gobernación. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Primera edición. México, D.F. 254p. ISBN: 978-607-7558-19-4.

Golden Gate Weather Services. 2012. Sitio web en <http://ggweather.com/enso/oni.htm> (enero de 2013).

Gutiérrez-Ruacho, O.G., L. Brito-Castillo, S.C. Díaz-Castro, C.J. Watts. 2010. Trends in rainfall and extreme temperatures in Northwestern Mexico. *Clim Res.* 42: 133-142. DOI: 10.3354/cr00874.

Heyerdahl, E.K., E. Alvarado. 2003. Influence of climate and land use on historical surface fires in pine-oak forests, Sierra Madre Occidental, Mexico. Veblen T.T, Baker W.L.,

Montenegro G., Swetnam T.W. (eds.) Fire in climate changes in temperate ecosystems of the western America. Springer-Verlag. New York. 466p. ISBN: 979-0-387-95455-4.

Hurrell, J. & National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). Last modified 10 Sep 2013. "The Climate Data Guide: North Pacific (NP) Index by Trenberth and Hurrell; monthly and winter". Retrieved from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/north-pacific-np-index-trenberth-and-hurrell-monthly-and-winter>.

INEGI. 2012. Estadísticas a propósito del día mundial forestal. Aguascalientes. Instituto Nacional de Estadística y Geografía sitio web en <http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/Contenidos/estadísticas/2012/forestal0.doc> (mayo de 2013).

Mantua, N.J., S.R. Hare, Y. Zhang, J.M. Wallace, R.C. Francis. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *B Am Meteorol Soc.* 78: 1069-1079.

Monin, A.S., Y.A Shishkov. 2000. Climate as a problem in physics. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk.* 170: 419-445. DOI: 10.3367/UFNr.0170.200004d.0419

NOAA. 2005. Frequently asked questions about the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO). National Oceanic and Atmospheric Administration sitio web en http://www.aoml.noaa.gov/phod/amo_faq.php (mayo de 2013).

NOAA. 2012. El monitor de sequía de Norteamérica (North America Drought Monitor). National Oceanic and Atmospheric Administration sitio web en <http://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/drought/nadm/index.html> (noviembre de 2012).

Organización Meteorológica Mundial. 1992. Vocabulario Meteorológico Internacional. Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial. Segunda edición. Suiza. 784p.

Pavia, E.G., F. Graef, J. Reyes. 2008. Annual and seasonal surface air temperature trends in Mexico. *Int J Climatol*. 29: 1324-1329. DOI:10.1002/joc.1787.

Ramaswamy, V., J.W. Hurrell, G.A. Meehl. 2006. Why do temperatures vary vertically (from the surface to the stratosphere) and what do we understand about why they might vary and change over time? En: T.R. Karl, S.J. Hassol, C.D. Miller, W.L. Murray (eds.) *Temperature Trends in the Lower Atmosphere: Steps for Understanding and Reconciling Differences*. A Report by the Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, Washington, DC. 165p.

Rasmusson, E., J. Wallace. 1983. Meteorological Aspects of the El niño/Southern Oscillation. *Science*. 222(4629): 1195-1202.

Seager, R., M. Tink, M. Davis, M. Cane, N. Naik, J. Nakamura, C. Li, E. Cook, D.W. Stahle. 2009. Mexican drought: an observational modeling and tree ring study of variability and climate change. *Atmosfera*. 22(1): 1-31.

Torres-Rojo. 2004. Estudio de tendencias y perspectivas del sector forestal en América Latina al año 2020. Informe Nacional México. Depósito de documentos de la FAO. Food and Agriculture Organization sitio web en <http://www.fao.org/docrep/006/j2215s/j2215s04.htm> (abril de 2013).

Vega-Camarena, J.P. 2012. Variabilidad interanual de las lluvias en el Norte de México y su teleconectividad con el Pacífico y el Atlántico. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Hidrometeorología. Universidad de Guadalajara. Centro universitario de ciencias exactas e ingenierías división de ciencias básicas/ departamento de física. Guadalajara, Jalisco. 85p.

Villers-Ruíz, M.L. 2006. Incendios Forestales. *Revista ciencias de la UNAM*. 81(enero-marzo): 61-66.

Weiss, J.L., J.T. Overpeck. 2005. Is the Sonoran Desert losing its cool? *Global Change Biol*. 11: 2065-2077. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.01020.x.

Wigley, T.M.L. 2006. Appendix A: Statistical Issues Regarding Trends. En: T.R. Karl, S.J. Hassol, C.D. Miller, W.L. Murray (eds.) *Temperature Trends in the Lower Atmosphere: Steps for Understanding and Reconciling Differences*. A Report by the Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research, Washington, DC. 165p.