



SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES



INFORME FINAL

Tendencias climáticas de fenómenos hidrometeorológicos extremos en México durante los últimos 40 años

CLAVE: 48492

FONDO: S0013- COMISION NACIONAL DEL AGUA

Responsable Técnico: Dr. Martín José Montero Martínez
Teléfono: (777) 329 3600 ext. 824
mmontero@tlaloc.imta.mx

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

En colaboración con:
Dr. Jorge Sánchez Sesma.
Dr. José Antonio Salinas Prieto.
Dr. Luís Brito Castillo (CIBNOR).

Diciembre de 2010

México, 2010

Contenido

1 RESUMEN.....	5
2 OBJETIVOS	6
3 MÓDULO DE TENDENCIAS DE TORMENTAS DE MAGNITUD MODERADA BASADA EN TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE CONGLOMERADOS (CLUSTERS)	8
3.1 RESUMEN.....	8
3.2 INTRODUCCIÓN.	8
3.3 METODOLOGÍA.....	10
3.4 RESULTADOS.....	11
3.4.1 Zona Noroeste (zno).....	13
3.4.2 Zona Noreste (zne).....	19
3.4.3 Zona Occidente (zoc)	27
3.4.4 Zona Centro (zcn)	31
3.4.5 Zona Sur (zsr)	39
3.4.6 Zona Sureste (zse).....	47
3.5 CONCLUSIONES.	55
3.6 REFERENCIAS.....	56
3.7 ANEXO.....	57
4 MÓDULO DE TENDENCIAS DE VALORES EXTREMOS ASOCIADOS A HURACANES Y EL NIÑO	81
4.1 PARTE I. VIENTOS MÁXIMOS DE CICLONES TROPICALES DEL ATLÁNTICO (VM-CT): UNA REEVALUACIÓN DE ANÁLISIS DE VALORES Y SU ESCALA A LARGO PLAZO OSCILACIONES & TENDENCIAS PARA EL CARIBE Y GOLFO DE MÉXICO.	81
4.1.1 Resumen	81
4.1.2 Introducción.....	81
4.1.3 Antecedentes.....	81
4.1.4 Datos y métodos.....	83
4.1.5 Resultados y discusión	86
4.1.6 Conclusiones.....	94
4.1.7 Referencias	96
4.2 PARTE II. TENDENCIAS DEL ENSO Y DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL EN MÉXICO: UN ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL ENSO A NIVEL NACIONAL Y DE LAS TENDENCIAS ESTATALES PARA VERANO E INVIERNO.	98
4.2.1 Resumen	98

4.2.2	Introducción.....	98
4.2.3	Tendencias del ENSO	98
4.2.4	Tendencias de la precipitación estatal.....	100
4.2.5	Definición de eventos ENSO.....	100
4.2.6	Análisis de la precipitación en México asociada al ENSO	102
4.2.7	Análisis de la precipitación en México asociada al ENSO (5 fases)	107
4.2.8	Conclusiones.....	110
4.2.9	Referencias	111
4.2.10	Anexos.....	114
5	MÓDULO DE TENDENCIAS DE FRENTE FRÍOS TANTO EN INTENSIDAD COMO EN DURACIÓN.....	146
5.1	RESUMEN.....	146
5.2	INTRODUCCIÓN.	146
5.3	ANTECEDENTES.....	147
5.4	METODOLOGÍA.....	148
5.5	RESULTADOS.....	158
5.6	CONCLUSIONES.	193
5.7	REFERENCIAS.....	194
6	MÓDULO DE TENDENCIAS DE CAUDALES Y SU SIGNIFICANCIA ESTADÍSTICA	195
6.1	RESUMEN.....	195
6.2	ANTECEDENTES.....	195
6.3	JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO DE TENDENCIAS.	196
6.4	METODOLOGÍA.....	198
6.4.1	Análisis de homogeneidad al interior de las series.	199
6.4.2	Evaluación por décadas los cambios en la variabilidad de caudales medios (Qmed), la lluvia(X) y temperatura del aire en superficie (Ta).....	200
6.4.3	Estimando el valor de la tendencia y su significancia estadística en X, Ta y Qmed.....	200
6.4.4	Buscando mecanismos de correlación para explicar si dichos cambios son o no consecuencia del cambio climático.....	201
6.5	RESULTADOS.....	202
6.5.1	Tendencias de caudales medios.	203
6.5.2	Tendencias de caudales máximos.	203
6.5.3	Variabilidad interanual e interdecadal.....	203
6.6	DISCUSIÓN.....	204
6.6.1	Evaluación por décadas.	204
6.6.2	Estimando el valor de la tendencia y su significancia estadística.....	206
6.6.3	Explicación de los cambios.	206
6.7	REFERENCIAS.....	207



Tendencias climáticas de fenómenos
hidrometeorológicos extremos en México
durante los últimos 40 años



6.8 ANEXO..... 230

7 FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS QUE HAN OBTENIDO EL GRADO CON PRESUPUESTO DEL PROYECTO HASTA LA FECHA DE ENTREGA DE ESTE INFORME (INDICAR NOMBRE, NÚMERO DEL ESTUDIANTE Y NIVEL) 254

1 RESUMEN

El presente trabajo nace como una propuesta conjunta para atender los Términos de Referencia de la Convocatoria CNA-CONACYT 2006/01. El área estratégica de la demanda del sector atendido fue la del Sector Hidrológico Nacional, en específico, los estudios de tendencias de fenómenos significativos.

El problema abordado es que los sectores de medio ambiente y recursos naturales, de protección civil, y de hecho el gobierno (los tres niveles) en general, requieren información objetiva sobre el hecho de si tendencias importantes se pueden detectar en la historia registrada en las bases de datos antes mencionadas, no necesariamente con énfasis en la señal directa de la temperatura, sino con énfasis en los denominados eventos extremos, aquellos que pueden producir peligro de algún tipo a la población.

Los estudios presentados aquí se dividen en cuatro módulos:

- i) Tendencias de tormentas de magnitud moderada basada en técnicas de análisis de conglomerados, en el cuál se utilizó la técnica conocida como PAM para identificar variaciones espacio-temporales (período 1961-2000) de patrones de precipitación (dividida en tres categorías, alta, media y baja) para seis diferentes regiones en el país;
- ii) Tendencias (a nivel estatal) de valores extremos asociados a huracanes y el Niño, donde se analizan las características de las lluvias promedio y extremas durante las diferentes fases del ENSO (Niño, Niña y Neutro). Además, se realiza una evaluación de los valores, tendencias y oscilaciones del riesgo asociado con las velocidades de viento de ciclones tropicales basado en reconstrucción histórica de campos de viento de los mismos. Finalmente, se proporciona una perspectiva multidecadal de la actividad de ciclones tropicales, sus vientos máximos, y sus implicaciones climáticas y meteorológicas;
- iii) Tendencias de frentes fríos tanto en intensidad como en duración, en el cuál se presenta un análisis y diagnóstico sobre la evolución de frentes fríos (FF) en México. Considerando que la actividad de FF está modulada principalmente por la dinámica de El Niño y La Niña, se presenta la actividad de intensidad y frecuencia de FF tanto para años con evento Niño como Niña, así como la variabilidad espacial y temporal mediante Funciones Empíricas ortogonales (FEO), diagnosticando los contrastes entre ambos episodios en FF que afectaron México.
- iv) Tendencias de caudales y su significancia estadística, de las 130 series de precipitación analizadas, solo 7 resultaron ser homogéneas por los criterios de Fisher y Student, y además con tendencias que son estadísticamente significativas, tanto al decremento, como al incremento. Los decrementos de los caudales van desde 0.2 a 0.7 $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \times \text{año}$, mientras que los incrementos fluctúan entre 0.01 y 0.05 $\text{m}^3 \text{s}^{-1} \times \text{año}$. Los detalles del valor de las tendencias en temperaturas y lluvia se pueden consultar en Brito-Castillo et al. (2009) y Gutiérrez-Ruacho et al. (2010), resultados de este proyecto.

Estos cuatro módulos en su conjunto intentan contribuir al conocimiento sobre tendencias climáticas de diferentes variables y/o fenómenos en el país.

2 OBJETIVOS

No. de Módulo	Metas y Objetivos finales originales	Metas y Objetivos finales alcanzados
1. Tormentas	Estimación de tendencias climáticas mensuales y estacionales de tormentas de magnitud moderada por períodos decadales de 1961 a 2000.	Obtención de tendencias de patrones espacio-temporales de precipitaciones significativas para 6 regiones en México por períodos decadales de 1961-2000 usando una técnica de análisis de conglomerados. El método como tal resulta original al no encontrarse literatura referenciada.
2. Huracanes y ENSO	Estimación de tendencias de valores extremos de los eventos significativos de precipitación durante la ocurrencia de El Niño. Buscar mecanismos de correlación de los extremos con otras variables.	Se analizan las características de las lluvias promedio y extremas durante las diferentes fases del ENSO (Niño, Niña y Neutro) y también, se realiza el mismo análisis de promedios y extremos pero considerando fases más detalladas del ENSO (Niño severo, Niño, Neutro, Niña y Niña severa). El análisis de tendencias se realizó a nivel estatal que considerando lluvias de verano y de invierno. Evaluación de los valores, tendencias y oscilaciones del riesgo asociado con las velocidades de viento de ciclones tropicales (CT) sobre el área de CGM basado en reconstrucción histórica de campos de viento de CT. Perspectiva multidecadal de la actividad de CT, sus vientos máximos, y sus implicaciones climáticas y meteorológicas.
3. Frentes fríos	Determinar los tiempos de residencia de frentes fríos. Análisis y diagnóstico de la evolución de frentes en México.	Se estimó la precipitación asociada a los FF identificados en etapas previas, analizando la actividad de intensidad y frecuencia de FF tanto para años con evento Niño como Niña,

		<p>diagnosticando los contrastes entre ambos episodios en FF que afectaron México. Considerando que la actividad de frentes fríos (FF) está modulada principalmente por la dinámica de El Niño y La Niña, se presenta la actividad de intensidad y frecuencia de FF tanto para años con evento Niño como Niña, así como la variabilidad espacial y temporal mediante Funciones Empíricas Ortogonales (FEO), diagnosticando los contrastes entre ambos episodios en FF que afectaron México.</p>
4. Caudales	<p>Estimar el valor de la tendencia y su significancia estadística en Qmx, X, y Ta</p>	<p>Se observaron desfases en el inicio y conclusión de la temporada de lluvias (García-Paez, 2009), y tendencias de diferente signo tanto en lluvias como en temperaturas extremas (Gutiérrez-Ruacho, 2010, Domínguez-Duarte, 2010), que tienen correspondencia con lo observado en los escurrimientos superficiales. De las 130 series analizadas, solo 7 resultaron ser homogéneas por los criterios de Fisher y Student, y además con tendencias que son estadísticamente significativas, tanto al decremento, como al incremento. Los decrementos de los caudales van desde 0.2 a 0.7 m³ s⁻¹ × año, mientras que los incrementos fluctúan entre 0.01 y 0.05 m³ s⁻¹ × año.</p>
5. Nueva base de datos climatológica para P.	<p>Revisar los datos de CLICOM estación por estación realizando pruebas de homogeneidad normal estándar, no paramétricas, de regresión múltiple y de curvas de doble masa.</p>	<p>El Dr. Miranda dejó el IMTA desde la primera etapa y no hubo quién pudiera sustituir su labor en el proyecto. CONACYT fue notificado sobre esto.</p>

3 MÓDULO DE TENDENCIAS DE TORMENTAS DE MAGNITUD MODERADA BASADA EN TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE CONGLOMERADOS (CLUSTERS)

3.1 Resumen.

Es indudable, hoy en día, la influencia del cambio climático (ya sea debido a causas naturales o antropogénicas) en varias regiones del mundo. Ciertamente una forma de corroborar esa influencia es observando cuales han sido los cambios y tendencias registrados en el clima durante las últimas décadas. El presente módulo intenta contribuir a esta temática explorando cuales son las tendencias climáticas de patrones espacio-temporales de eventos de precipitación significativa. Para tal identificación de patrones se propuso el uso de técnicas de análisis de conglomerados (en inglés *cluster analysis*) lo cual, en sí mismo, constituye una de las principales aportaciones de este módulo.

Para el análisis de resultados se probaron varias técnicas de análisis de conglomerados y finalmente se empleó la técnica PAM (*Partitioning Around Medoids*). Para la simplificación de los resultados se emplearon solo 3 conglomerados (grupos) categorizados como: cluster 1 (precipitación de intensidad baja), cluster 2 (precipitación de intensidad media) y cluster 3 (precipitación de intensidad alta). Se crearon 6 diferentes zonas de estudio a lo largo del país y se obtuvieron las tendencias espacio-temporales de patrones de precipitación en cada región del período 1961-2000.

3.2 Introducción.

Los eventos hidrometeorológicos extremos constituyen amenazas o peligros que pueden convertirse en factores desencadenantes de un desastre, el riesgo de que se produzca un desastre está determinado también por la concurrencia de diferentes factores de exposición y vulnerabilidad los cuales son los que determinan que un mismo evento peligroso pueda ocurrir sin generar prácticamente daños o bien desencadenar un desastre de grandes proporciones. En México los factores de exposición como la vulnerabilidad frente a los eventos hidrometeorológicos extremos se han incrementado durante las últimas tres o cuatro décadas, en los últimos cinco años del siglo XX las pérdidas resultaron ser cinco veces mayores que el promedio correspondiente a la primera mitad de la década de los años sesentas, un ejemplo son los daños que ocasionaron los huracanes Wilma y Stan en el 2005 los cuales presentaron intensas lluvias que causaron deslaves y daños materiales importantes en los estados de Chiapas, Veracruz y Quintana Roo, y en menos medida a Yucatán, Campeche y Tabasco, el huracán Wilma afectó el 80% de la infraestructura hotelera de Cancún, Cozumel, Isla Mujeres y Playa del Carmen.

La condición principal para la formación de tormentas de origen tropical es la presencia de masas de aire calientes y húmedas, estas tormentas son básicamente celdas convectivas individuales, las cuales son originadas debido a inestabilidades atmosféricas. Estas inestabilidades se presentan por la liberación de energía por convección (calentamiento

de la superficie) ó una convección forzada (forzamiento orográfico). Las tormentas raramente alcanzan un diámetro mayor a 10 Km y tienen una duración de entre 1 y 2 horas, cuando las tormentas prevalecen un periodo más largo estas simplemente tienen procesos cortos de repetición. Las tormentas bien desarrolladas están compuestas con cumulonimbos las cuales tienen un alcance a la troposfera llegando a una altura de hasta 20,000 m con velocidades de viento en la vertical de 10-14 m/s, en muchas partes de los trópicos se presentan en promedio 40 tormentas diarias para los meses de verano (McGregor y Nieuwolt, 1998).

Palecki *et al.* (2004) realizaron un estudio en el cual identificaron las características de la precipitación debido a las tormentas, dichas características estuvieron relacionadas con la disponibilidad del agua estacional, capacidad de vapor de agua atmosférico y el mecanismo de formación de tormentas, también incluyeron la precipitación total de la tormenta, intensidad y duración de la misma para un periodo de 1972-2002. Dicho estudio tuvo como finalidad el apreciar la tendencia que presentan las tormentas, se hizo uso de la técnica de análisis de conglomerados, tomaron en cuenta 1505 estaciones climatológicas distribuidas en 9 regiones de Estados Unidos las cuales manifestaran características estacionales de tormentas homogéneas. El estudio concluye que en el occidente de EU se presenta una disminución de la precipitación total y duración de las tormentas mientras que la intensidad aumento. Sin embargo, en el este experimentan, en general, un incremento en la precipitación y duración de las tormentas principalmente durante el invierno.

El término de análisis de conglomerados fue usado por primera vez por Tryon en (1939), más tarde difundido por Dunn en (1974), y posteriormente generalizado por Bezdek (1981) en sus diferentes estudios. El comienzo del análisis de conglomerados fue en los mercados de negocios donde se empleaban para realizar estudios de mercado, logrando identificar grupos de compradores en activo, pasivos, compulsivos etc., y dentro de estos grupos lograr identificar las necesidades, los gustos, la facilidad de adquisición, marcas de producto, entre otros. Estas técnicas se fueron adaptando poco a poco a otro tipo de estudios, hasta llegar a los más técnicos, como el caso actual.

Serafin *et al.* (2005) hablan sobre la aplicación de análisis de conglomerados para la verificación de los pronósticos de precipitación cuantitativa usando algunos métodos jerárquicos. Por otro lado, existen una mayor cantidad de trabajos realizados en los que se ha empleado el análisis de conglomerados en temas atmosféricos, como el de Jorba *et al.* (2004) donde emplearon estas técnicas con el objetivo de describir mejor las trayectorias y circulación troposférica. En trabajos más recientes Cabello *et al.* (2008) emplearon análisis de conglomerados para hacer la clasificación de trayectorias de aire contaminado usando en este trabajo el método no jerárquico de K-means.

El objetivo de este trabajo es obtener la tendencia y el patrón que presentan las tormentas significativas en seis regiones del país (**Figura 3.1**) durante 1961-2000 en cuatro meses representativos de las estaciones del año, empleando una metodología estadística multivariable conocida como análisis de conglomerados, a la base de datos MAYA.



Instituto Mexicano de
Tecnología del Agua

3.3 Metodología.

Tendencias climáticas de fenómenos
hidrometeorológicos extremos en México
durante los últimos 40 años

SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES



El análisis de conglomerados es principalmente una herramienta de análisis de datos de exploración, por esta razón es una herramienta inferencial. Dado un ejemplo de un vector X contenido en una fila de una matriz ($n \times k$) de X , el procedimiento definirá grupos y asignará miembros de grupos variando en los niveles de agregación. A diferencia del análisis discriminante, el procedimiento no incluye reglas para asignar los miembros para las observaciones futuras de Y . Sin embargo, un análisis de conglomerados nos puede traer grupos de salidas en los datos que podrían de otra forma ser pasados por alto, es posible dirigirlo utilizando una estratificación empírica de los datos ayudándonos o sugiriéndonos bases físicas para las observaciones estructuradas de los datos. Comúnmente en el análisis de conglomerados se implementan procedimientos jerárquicos. Esto es que son construidos un conjunto de grupos jerárquicamente, cada uno de estos son construidos por la fusión de pares de grupos definidos previamente. El procedimiento comienza considerando que n observaciones de X no tienen una estructura grupal o, un equivalente, que el conjunto de datos consistentes de N grupos contienen una observación cada uno.

El primer paso es encontrar los dos grupos por ejemplo vectores de datos que son cercanos en su dimensión espacial K , y combinar estos dentro de un nuevo grupo. Estos son ahora $n-1$ grupos, uno de los cuales tiene dos miembros. Sobre cada paso subsecuente, los dos grupos que son más cercanos son combinados para formar un gran grupo. Este proceso continua hasta $(n-1)$, todos los pasos de n observaciones han sido agregadas a un solo grupo. El grupo N de agrupamiento (*clustering*) en el comienzo de este proceso y el grupo 1 de agrupamiento en el final de este proceso no son útiles. Sin embargo, esperamos un agrupamiento natural de los datos dentro de un número realizable de grupos de información que podrían emerger a alguna etapa intermedia. Esto es, uno espera que el vector del cluster de datos n o el grupo conjunto en su espacio dimensional k dentro de algunos números G , $1 < G < n$, grupos que reflejan procesos de generación de datos similares. El resultado ideal es una división de los datos que minimizan las diferencias entre los miembros de un cluster dado y maximizan diferencias entre los miembros de clusters diferentes (Wilks, 1995).

El método empleado aquí de **Particionamiento Alrededor de Medoides (PAM)** es parecido en cierto sentido a k -medias. También trata de minimizar una función objetivo: minimizar las sumas de las distancias, pero es mucho más costoso, pues pasa por cada posible n -tupla de medias, compara sus distancias con todas las demás sumas de distancias, y escoge la menor; luego asigna elementos a este conglomerado. Como se aprecia, el concepto de *centroide* usado en k -medias se convierte aquí en *medoides*, no en el sentido de la mediana de los datos, sino en el sentido de que los centros forman parte de los datos. Entonces para un pre-especificado número de clusters K , el procedimiento busca clasificar los K medoides, $M = (m_1, \dots, m_K)$ de todas las observaciones a clasificar.

Para encontrar M hay que minimizar la suma de las distancias de las observaciones a su más cercano medoide,

$$M^* = \arg \min_M \sum_i \min_k d(x_i, m_k)$$

donde d es una medida de disimilaridad, x_i es un elemento y m_k un posible medoide. La función objetivo consiste en minimizar la suma de distancias a los K medoides. Esto matemáticamente es equivalente a minimizar el promedio de las distancias.

Las ventajas del método PAM es que es más robusto que k -medias ante ruido y *outliers*, es eficiente en bases de datos pequeñas, pero tiene la desventaja que no escala bien a bases de datos grandes.

3.4 Resultados.

La técnica de análisis de conglomerados descrita anteriormente fue implementada usando el programa estadístico R. Se escogieron 6 zonas de estudio (**Figura 3.1**) para probar la técnica de análisis de conglomerados como medio de detección de las zonas de precipitación máximas (y por ende de las tormentas significativas) en dichas regiones utilizando la base de datos de precipitación mensual del SMN conocida como MAYA (resolución espacial de $0.2^\circ \times 0.2^\circ$). Los tres tipos de clusters analizados representan las zonas de precipitación con intensidad baja (cluster 1, área en color rojo); intensidad media (cluster 2, área en color verde) e intensidad alta (cluster 3, área en color azul). Los clusters obtenidos año con año para cada región se muestran en el **Anexo** al final de éste módulo.

El análisis de resultados de cada una de las figuras y tablas de esta sección muestra las comparaciones entre las medias de clusters en los períodos 1961-1980 y 1981-2000, el cluster moda para el período 1961-2000 y la tendencia de crecimiento entre categorías de clusters para el período 1961-2000 (ejemplo **Figura 3.2**).

Además, se presenta la variación interanual del porcentaje de cobertura en la región de cada uno de los clusters para una zona y tiempo determinados, así como los promedios decadales de esas áreas de cobertura (ejemplo **Figura 3.3**).

Finalmente, se muestran los patrones espaciales más frecuentes (a lo largo de los 40 años de estudio) y cuantas veces se presentan en los períodos 1961-1980, 1981-2000 y 1961-2000 (ejemplo **Tabla 3.1**). En el caso de patrones espaciales de precipitación más complejos, como es el caso de los meses de verano, se presenta únicamente el patrón espacial más frecuente determinado por una similitud de por lo menos el 85% en la comparación pixel a pixel en los diferentes patrones espaciales de una zona determinada: es decir, que el patrón espacial más frecuente encontrado es similar a sus otros patrones hasta en el 85% de los puntos (pixeles) de la región completa (ejemplo **Figura 3.6**).

Así, presentamos los resultados por zona de estudio:

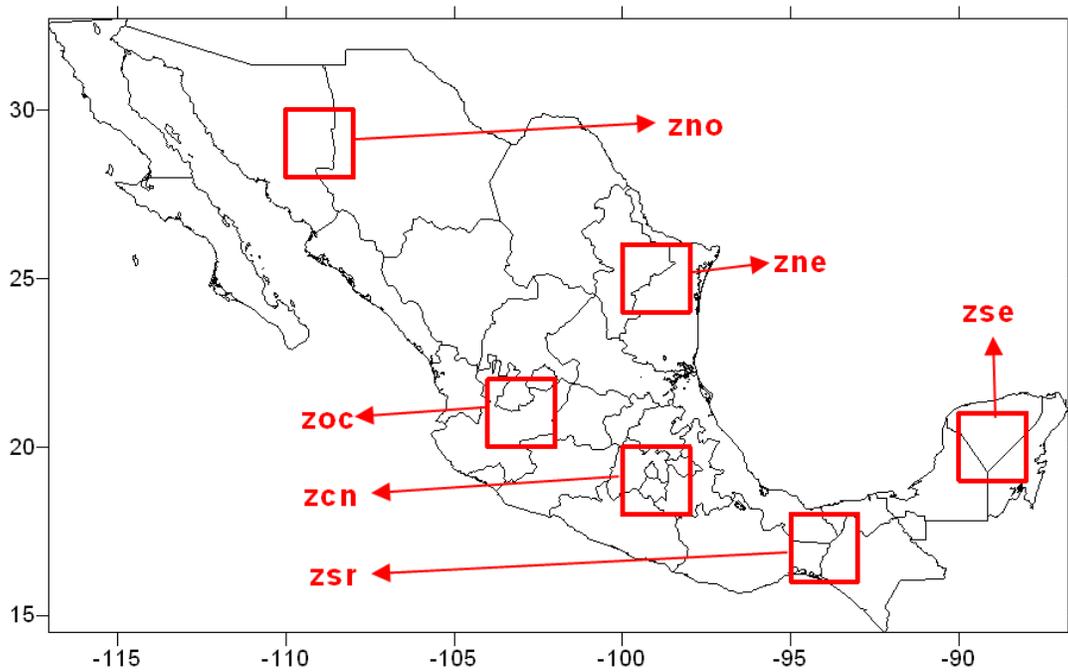


Figura 3.1 Las 6 zonas de estudio del presente módulo.

3.4.1 Zona Noroeste (zno)

La zona noroeste de estudio (**Figura 3.1**) muestra que la zona de máximos de precipitación se mantiene hacia el noroeste para ambos períodos climatológicos (**Figura 3.2**). Sin embargo, se nota un cambio importante en relación a la región de precipitaciones bajas que es hacia el sur en el período 1961-1980 y cambia hacia el este en el siguiente período 1981-2000. La tendencia calculada corrobora lo anterior con valores positivos y negativos hacia el sur y este respectivamente de la zona analizada. Por otro lado, los promedios decadales del área de cobertura geográfica de los clusters muestra una ligera tendencia negativa de las precipitaciones máximas entre los 60s y 80s, recuperándose un poco en la última década de los 90s (**Figura 3.3**). Por último, la **Tabla 3.1** nos muestra que el patrón más dominante de la región se presenta en aproximadamente el 15% de las veces durante el período completo 1961-2000 con una presencia más marcada en los últimos 20 años (25%).

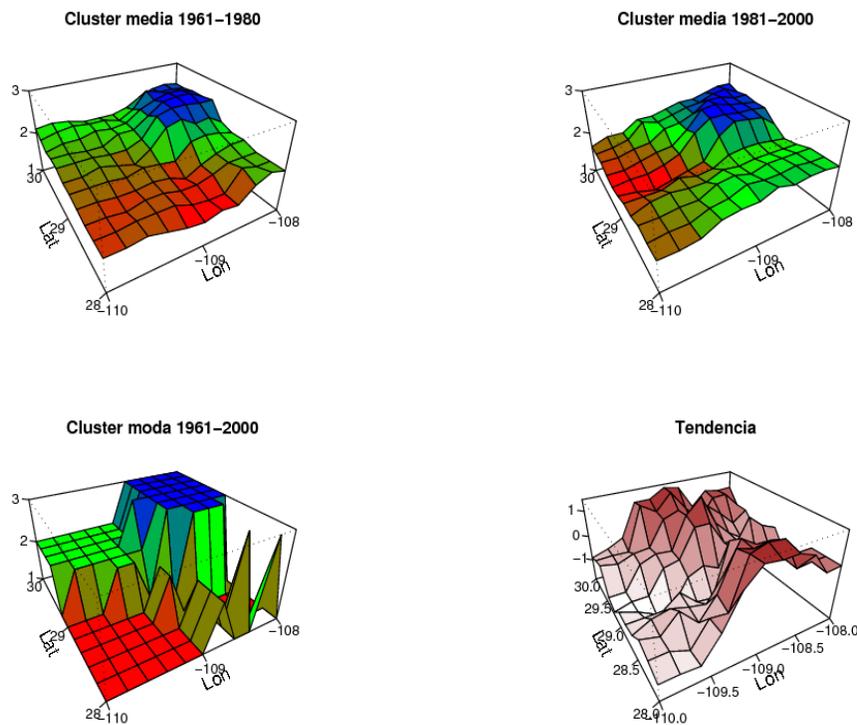


Figura 3.2 Media de los clusters en los períodos 1961-1980 y 1981-2000, moda del periodo 1961-2000 y tendencia de los clusters para la zona noroeste durante el mes de enero.

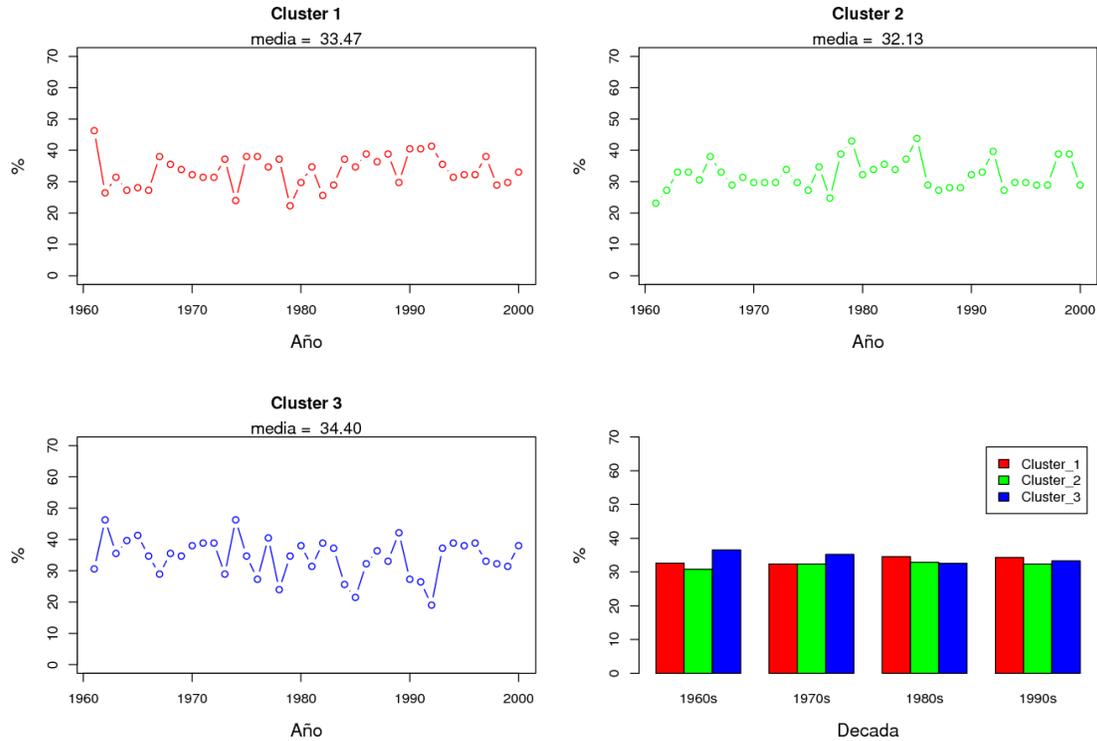


Figura 3.3 Variación interanual y promedios decadales del porcentaje de área cubierta de los tres tipos de clusters en la zona noroeste durante el mes de enero.

Periodo	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
1961-1980	1	4	2
1981-2000	5	1	2
1961-2000	6	5	4

Tabla 3.1 Patrones de cluster más frecuentes para la zona noroeste durante el mes de enero.

Los clusters de la zona noroeste mostraron algunos años con imposibilidad de determinar los tres tipos de clusters para el mes de abril (**Anexo A.1.2**, años 1972, 1974 y 2000) por lo que no mostramos el análisis de resultados para este mes.

Sin embargo, para el mes de julio nótese que la región de máxima precipitación se mantiene hacia el sur para todo el período estudiado (**Figura 3.4**) lo cual coincide físicamente con la entrada del monzón en la zona noroeste del país y con la orografía de la zona. Se muestra también una marcada tendencia positiva, cambiando de precipitaciones bajas a medias, en la región suroeste de la zona de estudio. Los promedios decadales muestran una tendencia decreciente en la región cubierta por precipitaciones medias, así como una oscilación (con mínimo relativo en los 70s (**Figura 3.5**)). Otra particularidad es que la diferencia entre los rangos de cobertura del cluster 2 con los restantes se va minimizando hacia la última década. Por último, se muestra el patrón de cluster más frecuente que aunque solo se presentó en tres años es consistente nuevamente con el tipo de precipitación monzónica de la región (**Figura 3.6**).

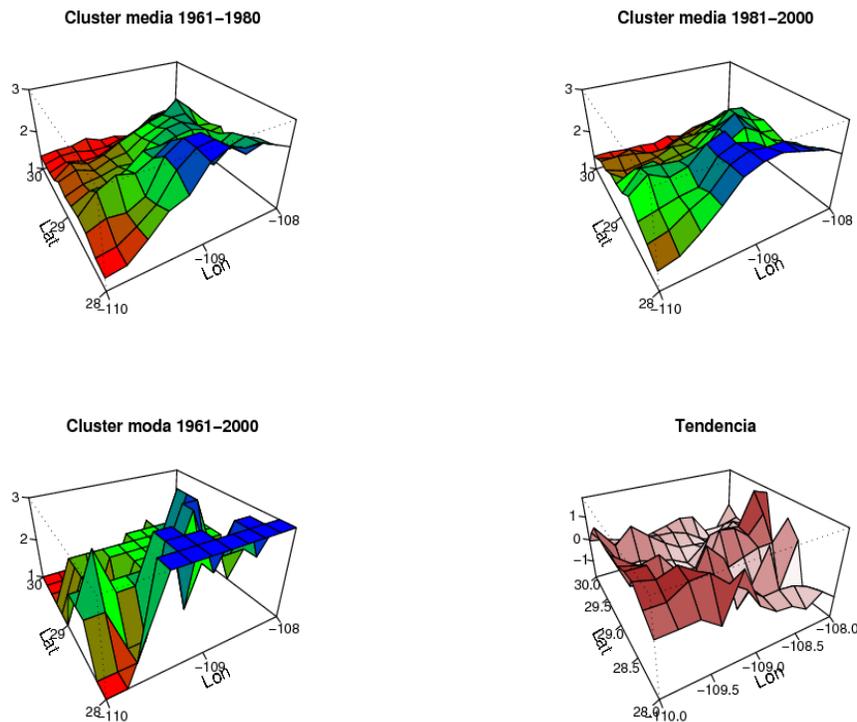


Figura 3.4 Media de los clusters en los períodos 1961-1980 y 1981-2000, moda del periodo 1961-2000 y tendencia de los clusters para la zona noroeste durante el mes de julio.

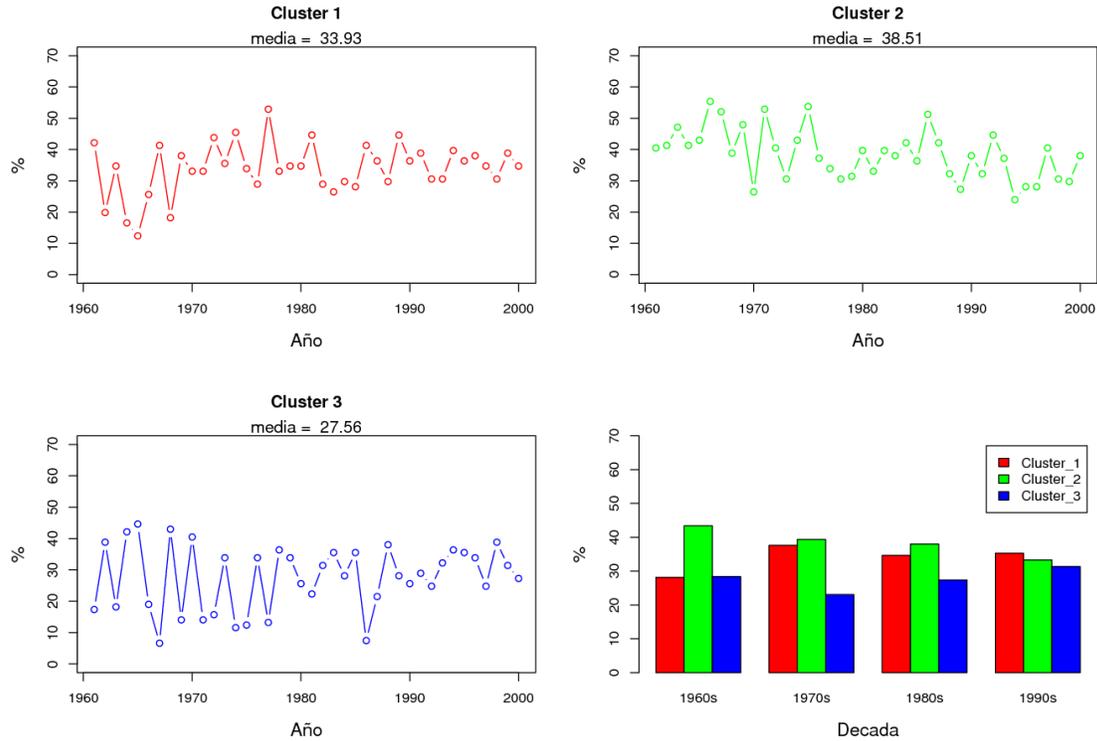


Figura 3.5 Variación interanual y promedios decadales del porcentaje de área cubierta de los tres tipos de clusters en la zona noroeste durante el mes de julio.

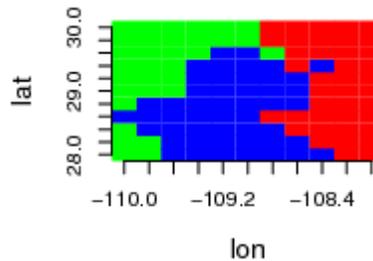


Figura 3.6 Patrón de cluster más frecuente con una similitud de hasta 85% entre los puntos dados (1970, 1979 y 1983) para la zona del noroeste durante el mes de julio.

En el mes de octubre se notan otra vez cambios importantes en la precipitación. Se observa como el área de cobertura de precipitaciones máximas en la zona tiende ligeramente a disminuir para los últimos 20 años; además del cambio en el área de cobertura de las precipitaciones bajas del este al sureste de la zona (**Figura 3.7**). Las tendencias máximas positivas se muestran al noroeste de la zona y las tendencias más negativas se ubican precisamente en el oeste (área de precipitaciones máximas). Los promedios decadales, sin embargo, no muestran una diferencia substancial en porcentaje de cobertura entre los tres clusters (**Figura 3.8**). Los tres diferentes patrones más frecuentes apenas representan el 10% del total cada uno (**Tabla 3.2**) y es notable que estos patrones vuelven a ser prácticamente geométricos.

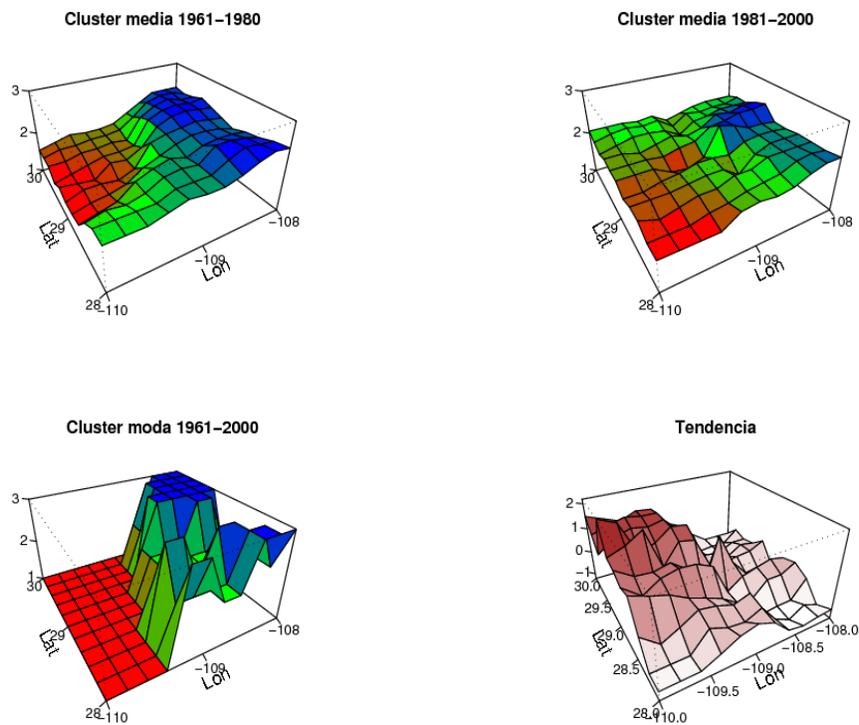


Figura 3.7 Media de los clusters en los períodos 1961-1980 y 1981-2000, moda del periodo 1961-2000 y tendencia de los clusters para la zona noroeste durante el mes de octubre.

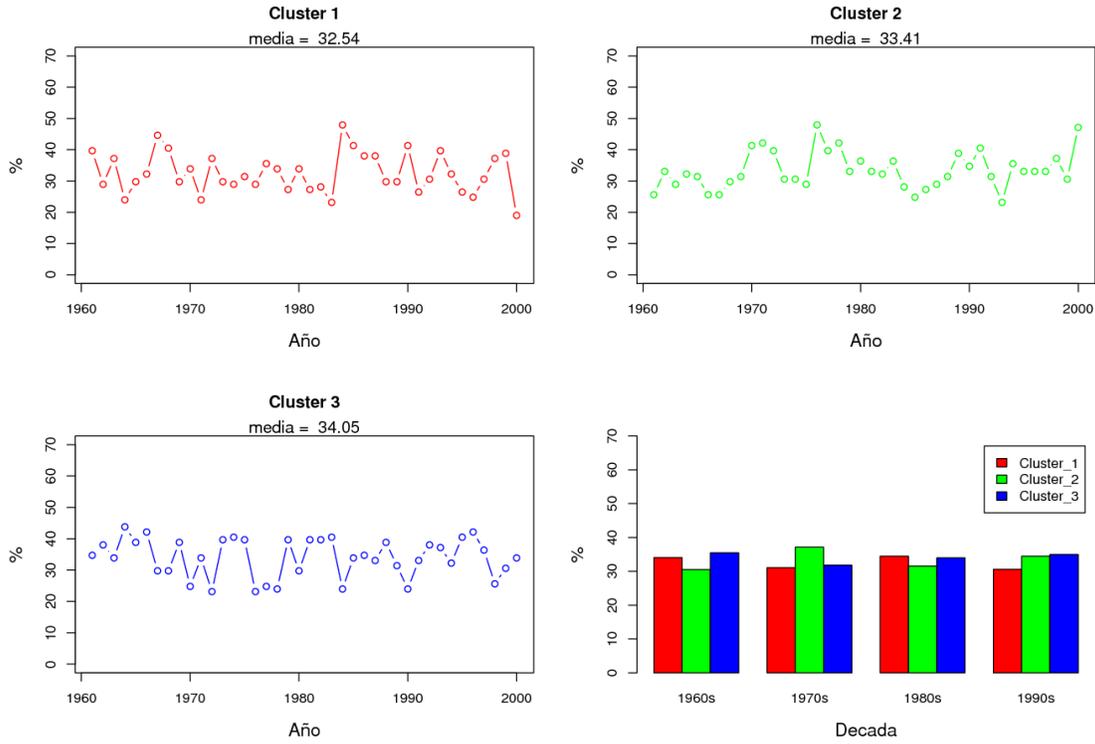


Figura 3.8 Variación interanual y promedios decadales del porcentaje de área cubierta de los tres tipos de clusters en la zona noroeste durante el mes de octubre.

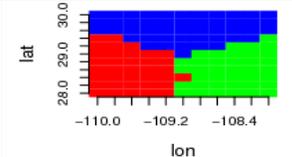
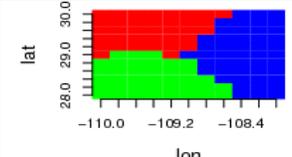
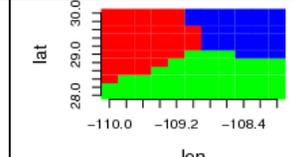
Periodo			
1961-1980	3	1	3
1981-2000	1	3	1
1961-2000	4	4	4

Tabla 3.2 Patrones de cluster más frecuentes para la zona noroeste durante el mes de octubre.

3.4.2 Zona Noreste (zne)

Esta zona presenta cambios radicales en la forma de precipitar de un período a otro. Nótese que la zona de precipitaciones bajas que al principio cubría todo el oeste en los siguientes 20 años solo cubre el suroeste, y la parte al noroeste de la zona cambia drásticamente a zona de lluvias fuertes (**Figura 3.9**). Por otro lado, la zona de lluvias fuertes que cubría la parte noreste se cambia para el último período al sureste y al noroeste (como ya se apuntó). Las tendencias más positivas se muestran al noroeste y las más negativas al noroeste de la zona. Los promedios decadales no muestran cambios substanciales en cuanto al porcentaje de cobertura, excepto quizás un ligero incremento de las precipitaciones medias en los últimos 20 años (**Figura 3.10**). Por último el patrón (geométrico) de cluster más frecuente representó apenas el 15% del total (**Tabla 3.3**).

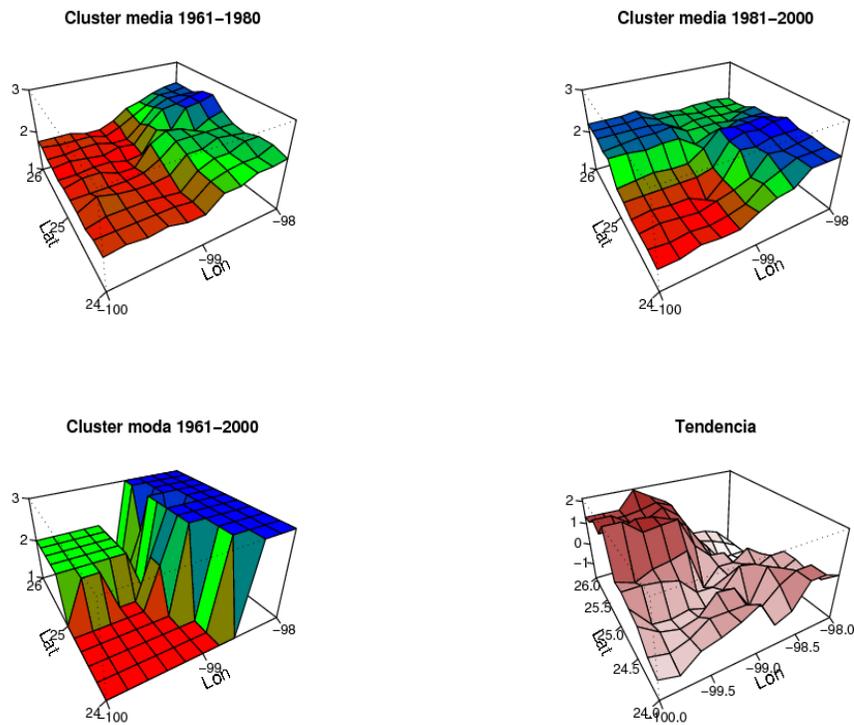


Figura 3.9 Media de los clusters en los períodos 1961-1980 y 1981-2000, moda del periodo 1961-2000 y tendencia de los clusters para la zona noreste durante el mes de enero.

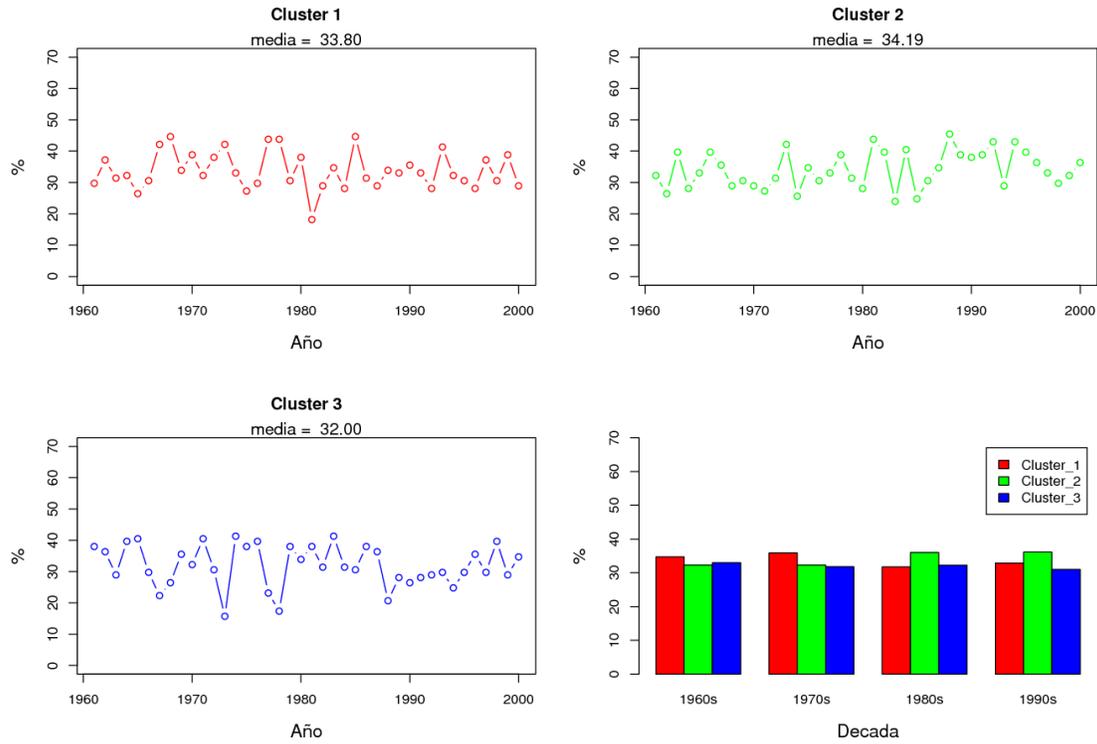


Figura 3.10 Variación interanual y promedios decadales del porcentaje de área cubierta de los tres tipos de clusters en la zona noreste durante el mes de enero.

Periodo			
1961-1980	4	1	2
1981-2000	2	3	2
1961-2000	6	4	4

Tabla 3.3 Patrones de cluster más frecuentes para la zona noreste durante el mes de enero.

Para este mes los cambios más notables se muestran en las precipitaciones bajas que en el primer período solo cubría el noroeste de la zona pasa a ser dominante a todo el oeste hacia el segundo período (**Figura 3.11**). Por otro lado, las tendencias varían de forma muy irregular por toda la zona sin notarse cambios muy grandes. Lo más notable, quizás, de los promedios decadales de cobertura es que se nota un incremento en el área cubierta por las precipitaciones máximas a costa de las precipitaciones mínimas que disminuyen paulatinamente en el mismo período (**Figura 3.12**). También es notable que el cluster moda, que coincide aproximadamente con los patrones más frecuentes (**Tabla 3.4**), no coincide en la ubicación de las precipitaciones máximas de las medias de los dos períodos. Es quizás esta una de las razones por las que estos tres patrones más dominantes tienen poca representación cada uno en el total de años analizados (10%).

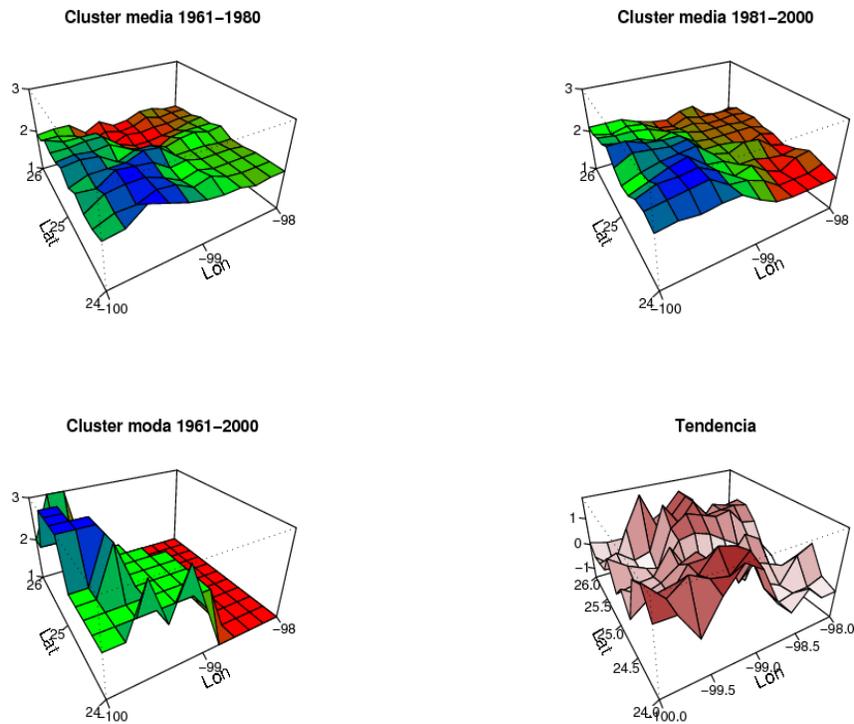


Figura 3.11 Media de los clusters en los períodos 1961-1980 y 1981-2000, moda del periodo 1961-2000 y tendencia de los clusters para la zona noreste durante el mes de abril.

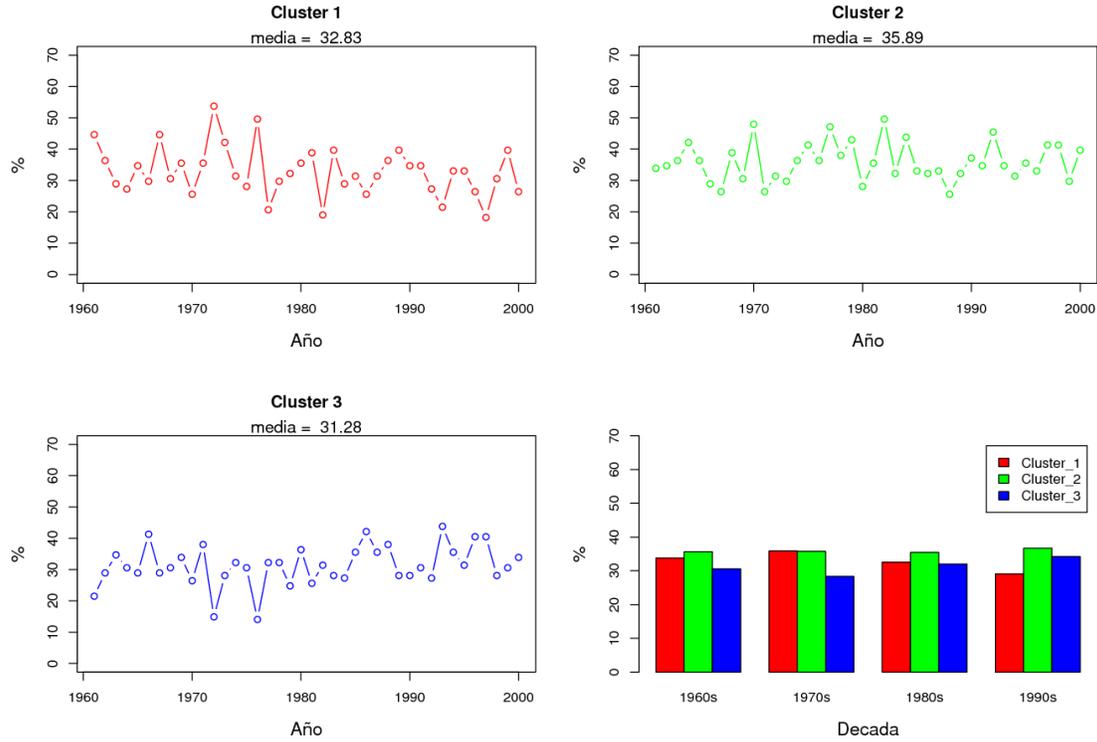


Figura 3.12 Variación interanual y promedios decadales del porcentaje de área cubierta de los tres tipos de clusters en la zona noreste durante el mes de abril.

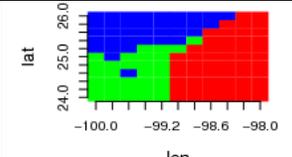
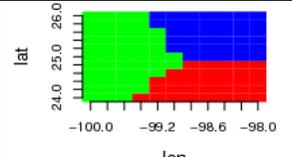
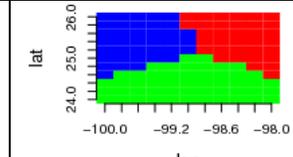
Periodo			
1961-1980	1	3	3
1981-2000	3	1	1
1961-2000	4	4	4

Tabla 3.4 Patrones de cluster más frecuentes para la zona noreste durante el mes de abril.

Los principales cambios observados para julio tienen que ver con la ampliación del área de dominio de las precipitaciones máximas del suroeste en los primeros 20 años al suroeste y sureste en los siguientes 20 años (**Figura 3.12**). En cuanto a las tendencias estas se muestran bastante variables y de magnitud (positiva y negativa) considerable en toda la zona dominando probablemente las tendencias positivas hacia el noroeste de la zona. Los promedios decadales muestran el aumento mencionado en el tiempo de las precipitaciones máximas y como se observa es a costa del decremento en el área de cobertura de las precipitaciones medias (**Figura 3.13**). También es notable que en el año 1975 el área de cobertura de las precipitaciones medias es casi del 70% algo que se corrobora en el patrón de ese año (**Anexo A.2.3**). El patrón de precipitación más dominante tuvo un 15% de frecuencia en los 40 años, sin embargo, lo notable es que todos los años cayeron en los últimos 20 y el patrón resulto ser bastante simétrico para ser verano (**Figura 3.14**).

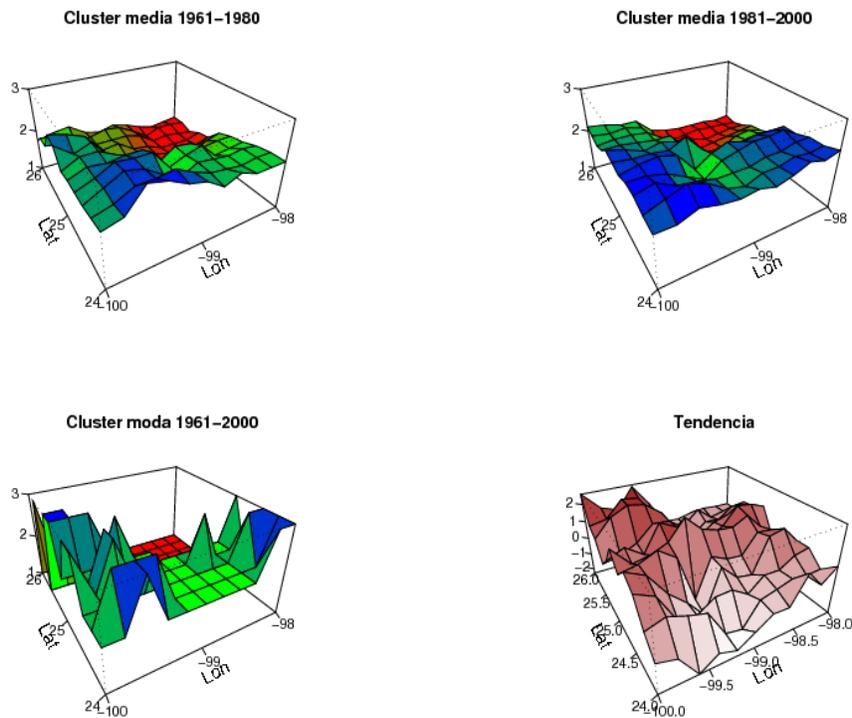


Figura 3.12 Media de los clusters en los períodos 1961-1980 y 1981-2000, moda del periodo 1961-2000 y tendencia de los clusters para la zona noreste durante el mes de julio.

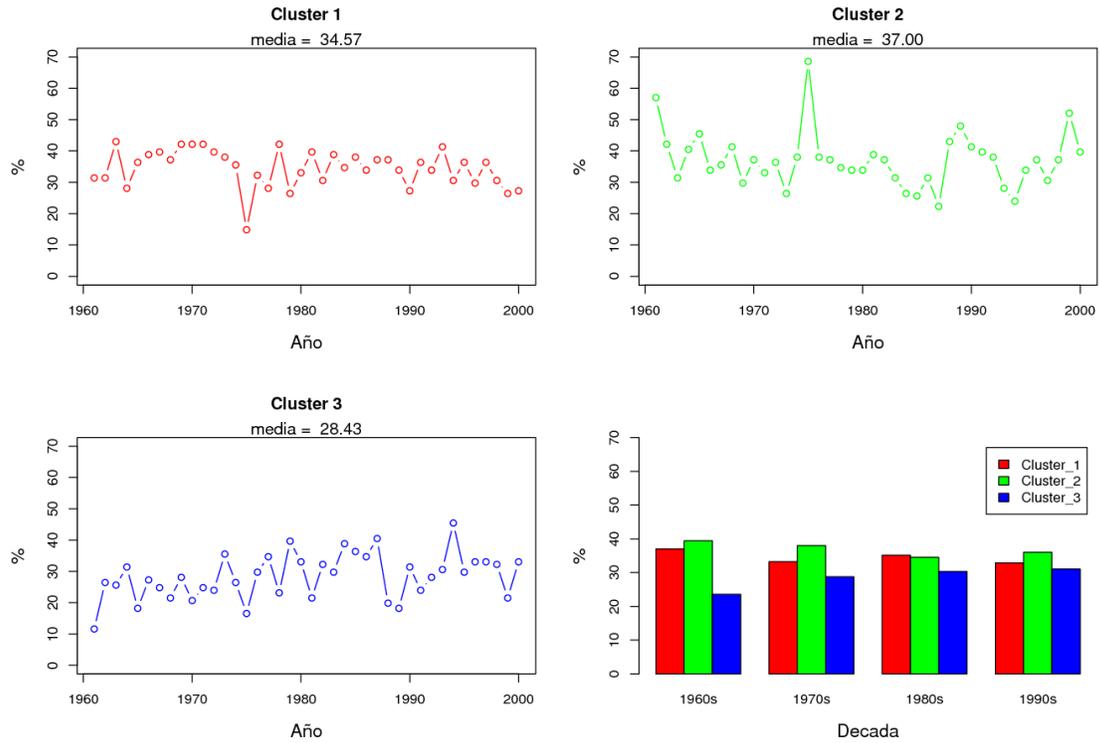


Figura 3.13 Variación interanual y promedios decadales del porcentaje de área cubierta de los tres tipos de clusters en la zona noreste durante el mes de julio.

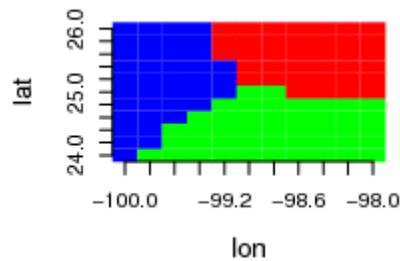


Figura 3.14 Patrón del cluster con una similitud de hasta 85% entre los puntos dados (1982, 1986, 1995, 1996, 1998, 2000) para la zona del noreste del mes de julio.

Para el mes de octubre, el cambio más significativo es que las precipitaciones máximas que dominaban el sur de la zona en los primeros 20 años, en el período subsecuente dominan solo una pequeña parte en el este (**Figura 3.15**). Las tendencias máximas positivas se muestran al noreste de la zona y tendencias negativas importantes hacia el suroeste. En cuanto a los promedios decadales también es notable que durante los primeros 30 años la cobertura de las precipitaciones bajas fue en aumento pero se estabiliza en la última década de los 90s (**Figura 3.16**). Los años 1963 y 1972 se caracterizan por una cobertura de casi el 70% de precipitaciones bajas y en particular en el 1963 podríamos decir que solo existieron dos clusters (1 y 2) ya que el de las precipitaciones máximas solo cubrió una porción muy pequeña (1.6%) del total. En cuanto al patrón de cluster más frecuente este se presentó en el 15% de las ocasiones (**Tabla 3.5**).

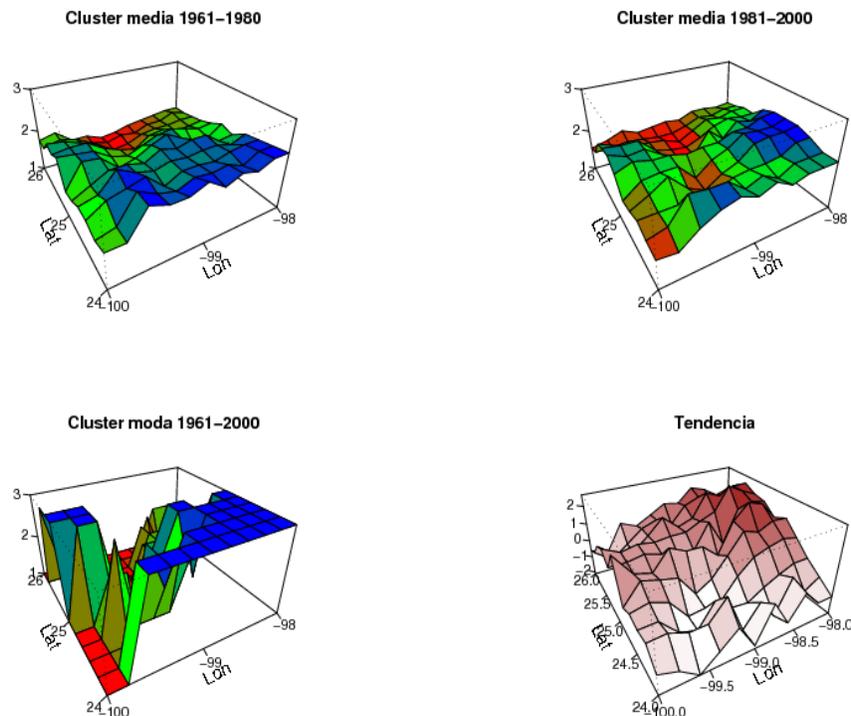


Figura 3.15 Media de los clusters en los períodos 1961-1980 y 1981-2000, moda del periodo 1961-2000 y tendencia de los clusters para la zona noreste durante el mes de octubre.

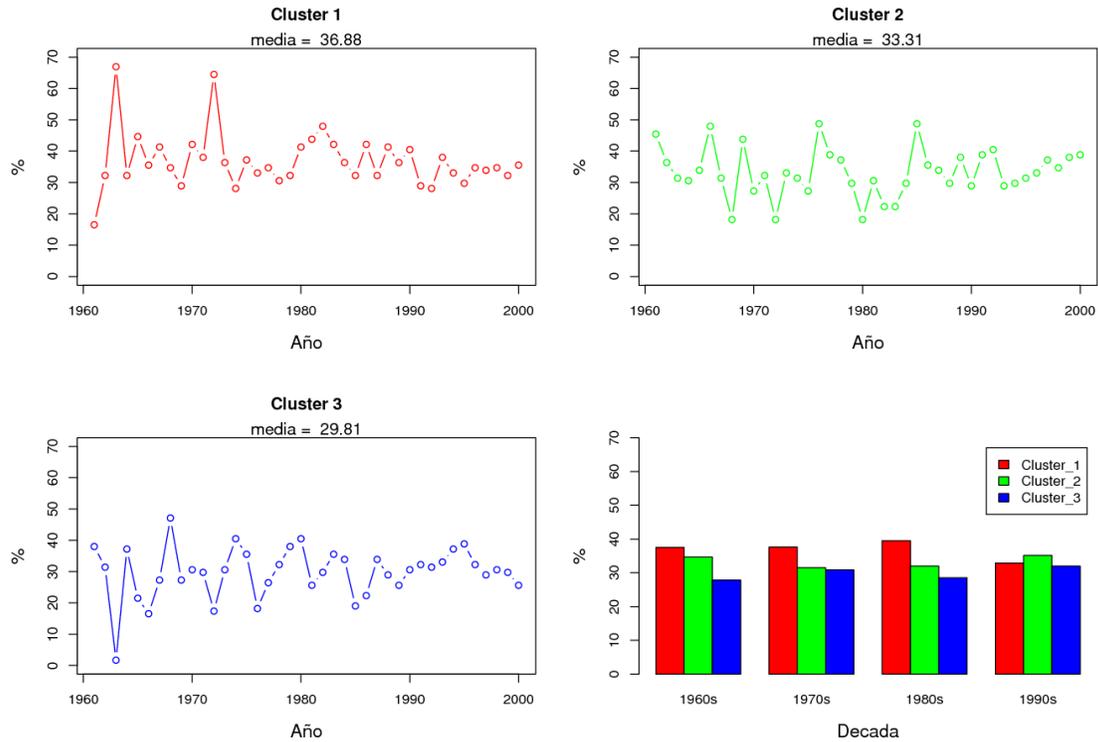


Figura 3.16 Variación interanual y promedios decadales del porcentaje de área cubierta de los tres tipos de clusters en la zona noreste durante el mes de octubre.

Periodo			
1961-1980	3	2	1
1981-2000	3	2	3
1961-2000	6	4	4

Tabla 3.5 Patrones del cluster más frecuentes con una similitud de hasta 80% entre los puntos dados. P1: 1967, 1970, 1975, 1984, 1988 y 1992, P2: 1964, 1971, 1983 y 1993, P3: 1977, 1982, 1986 y 1991, para la zona del noreste durante el mes de octubre.

3.4.3 Zona Occidente (zoc)

Debido a la imposibilidad de la metodología de definir clusters para algunos años de los meses de enero y abril (**Anexo A.3.1 y A.3.2**), no se muestran las estadísticas de resultados para estos meses. Para el mes de julio, sin embargo, se nota una consistencia en el patrón de precipitaciones bastante notable como puede apreciarse tanto en los clusters media y moda (**Figura 3.17**) y los resultados de años individuales en el **Anexo A.3.3**. Así también, los promedios decadales muestran una marcada diferencia entre los porcentajes de cobertura de los tres clusters, dominando las precipitaciones medias (más de 40%) y siendo las de menor cobertura las precipitaciones bajas (alrededor de 25%) (**Figura 3.18**). El patrón de precipitación más frecuente es consistente con las formas de los clusters media y moda y se presentó en aproximadamente 18% del total (**Figura 3.19**).

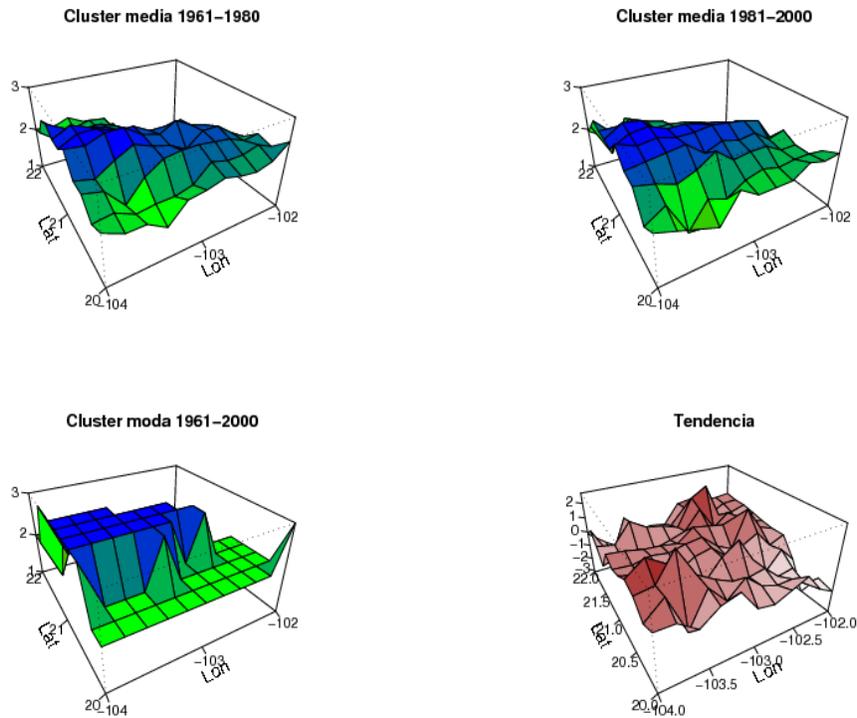


Figura 3.17 Media de los clusters en los períodos 1961-1980 y 1981-2000, moda del periodo 1961-2000 y tendencia de los clusters para la zona occidente durante el mes de julio.

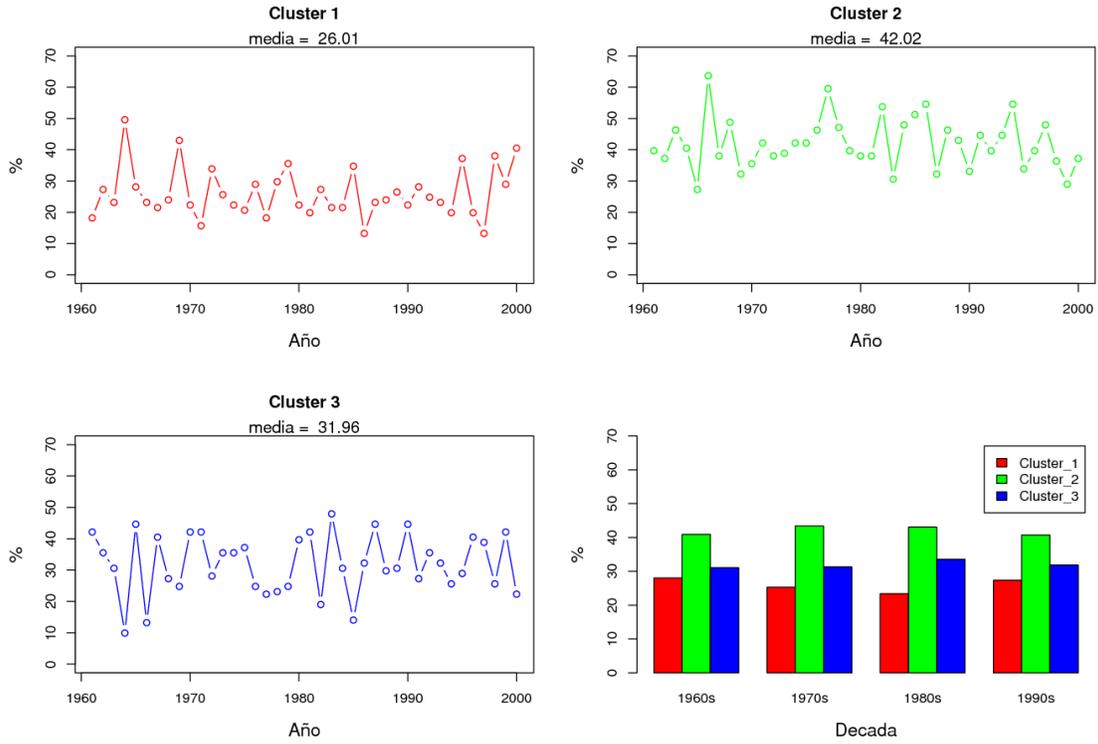


Figura 3.18 Variación interanual y promedios decadales del porcentaje de área cubierta de los tres tipos de clusters en la zona occidente durante el mes de julio.

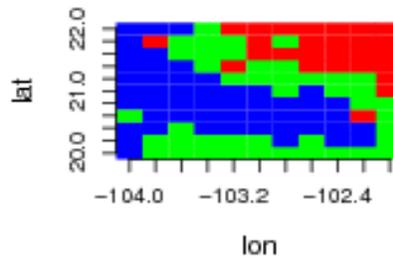


Figura 3.19 Patrón del cluster más frecuente con una similitud de hasta 85% entre los puntos dados (1970, 1971, 1980, 1981, 1983, 1992 y 1993) para la zona occidental del mes de julio.

Para el mes de octubre se nota que la forma de los clusters media no varía tan significativamente para los dos períodos comparándolo con otros casos (**Figura 3.20**). La tendencia máxima positiva se localiza al noroeste de la zona de estudio y las más negativas al noreste de la misma. Los promedios decadales muestran una cobertura de clusters mucho más homogénea que en el verano y los rangos de variación interanuales tampoco son muy significativos (**Figura 3.21**). Finalmente, los clusters para este mes resultaron ser casi geométricos pero el más frecuente solo se presentó en aproximadamente el 10% de las ocasiones (**Figura 3.22**).

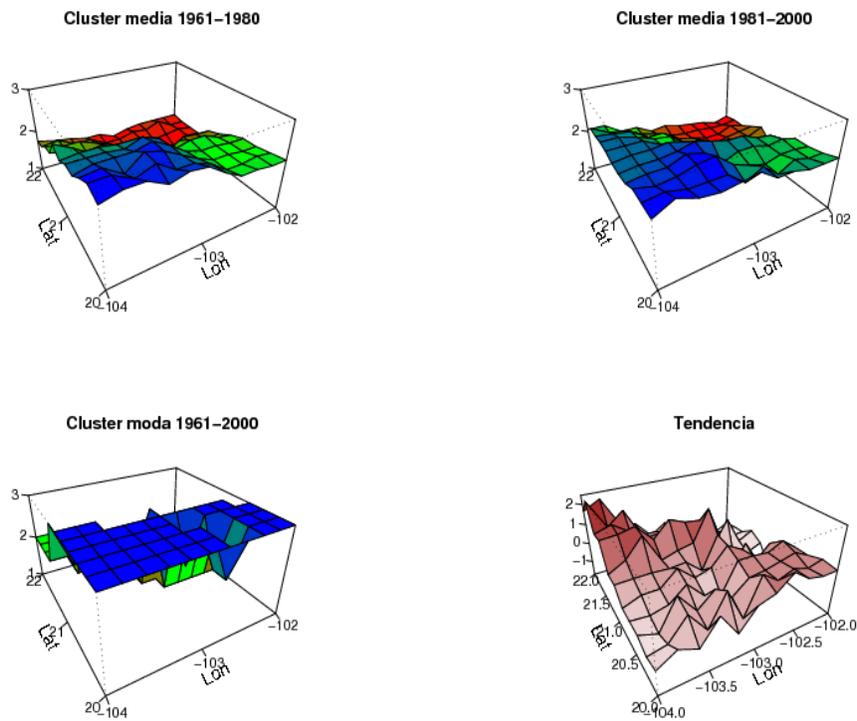


Figura 3.20 Media de los clusters en los períodos 1961-1980 y 1981-2000, moda del periodo 1961-2000 y tendencia de los clusters para la zona occidente durante el mes de octubre.

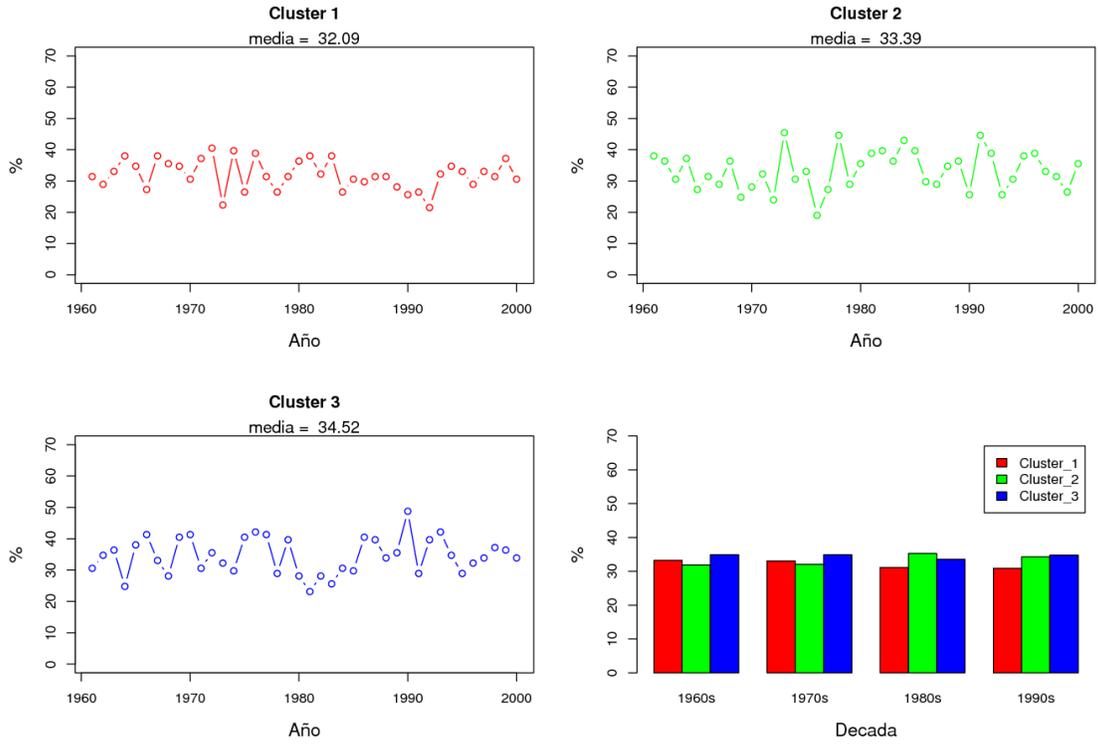


Figura 3.21 Variación interanual y promedios decadales del porcentaje de área cubierta de los tres tipos de clusters en la zona occidente durante el mes de octubre.

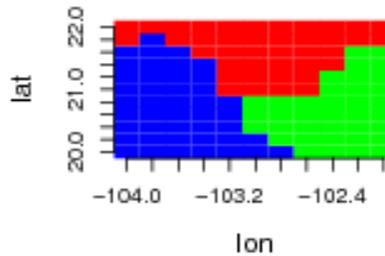


Figura 3.22 Patrón del cluster más frecuente con una similitud de hasta 85% entre los puntos dados (1963, 1974, 1998, 1999) para la zona occidental del mes de octubre.

3.4.4 Zona Centro (zcn)

En los resultados interanuales observamos que los clusters de enero para la zona centro vuelven a ser muy geométricos (**Anexo A.4.1**) y en el análisis se notan cambios importantes en la forma de precipitar de ambos períodos climáticos (**Figura 3.23**). Entre lo que más destaca son los cambios de distribución geográfica de las precipitaciones máximas y mínimas. El área de tendencias más positivas fue el noroeste de la zona y las más negativas al sureste. Los promedios decadales ni la variación interanual del área de cobertura de clusters muestran cambios significativos (**Figura 3.24**). Los dos patrones de cluster más frecuentes se presentaron el 15% del total cada uno con una mayor frecuencia en los últimos 20 años (**Tabla 3.6**).

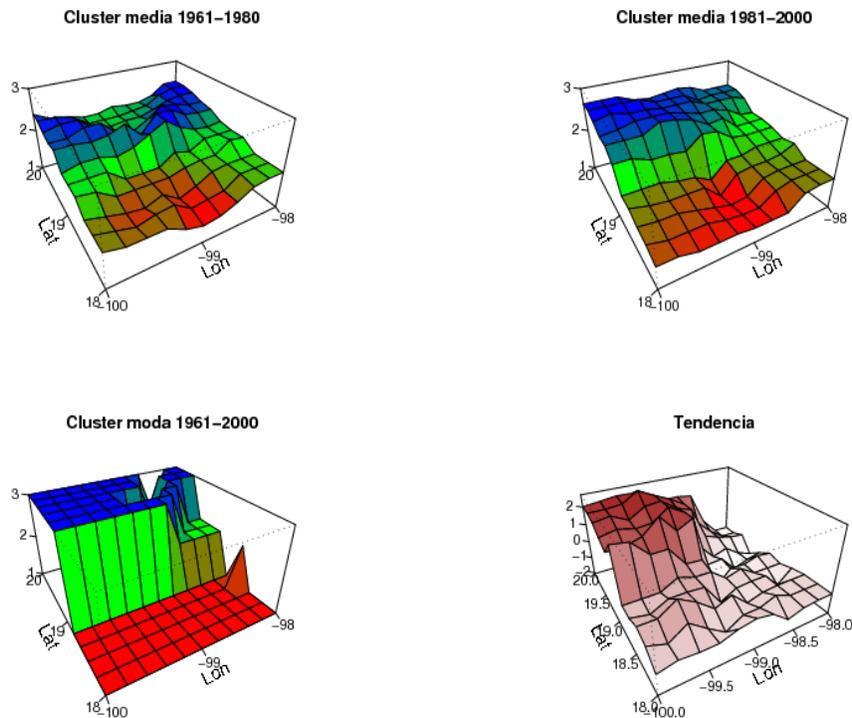


Figura 3.23 Media de los clusters en los períodos 1961-1980 y 1981-2000, moda del periodo 1961-2000 y tendencia de los clusters para la zona centro durante el mes de enero.

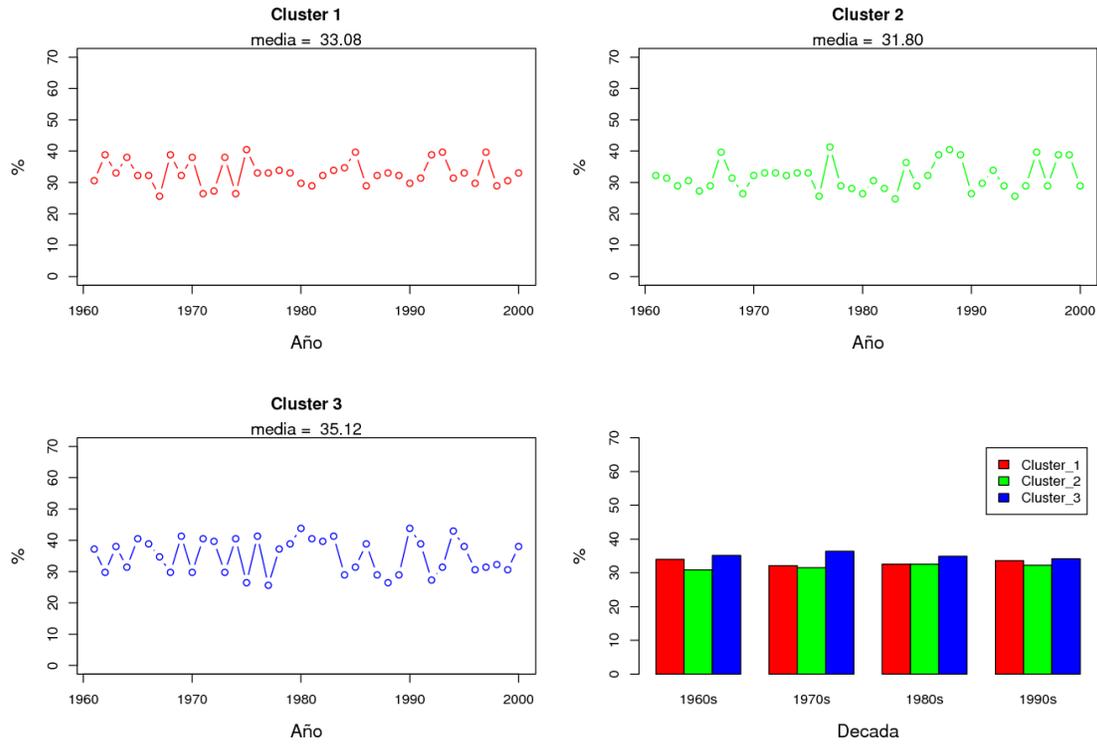


Figura 3.24 Variación interanual y promedios decadales del porcentaje de área cubierta de los tres tipos de clusters en la zona centro durante el mes de enero.

Periodo			
1961-1980	1	2	3
1981-2000	5	4	1
1961-2000	6	6	4

Tabla 3.6 Patrones de cluster más frecuentes para la zona centro del mes de enero.

Los resultados del mes de abril se caracterizan por los pocos cambios en los patrones de precipitación de la zona. Esto se comprueba al observar la poca variación entre los clusters media y moda, también las tendencias observadas son de poca magnitud y sin mostrar un área significativamente dominante (**Figura 3.25**). Los promedios decadales si muestran una mayor ganancia del área de cobertura de precipitaciones bajas hacia los últimos 20 años en comparación con el período inicial (**Figura 3.26**). Finalmente, el patrón de precipitación más frecuente vuelve a mostrar esta homogeneidad en los resultados, ya que se presenta en el 40% del total (**Tabla 3.7**).

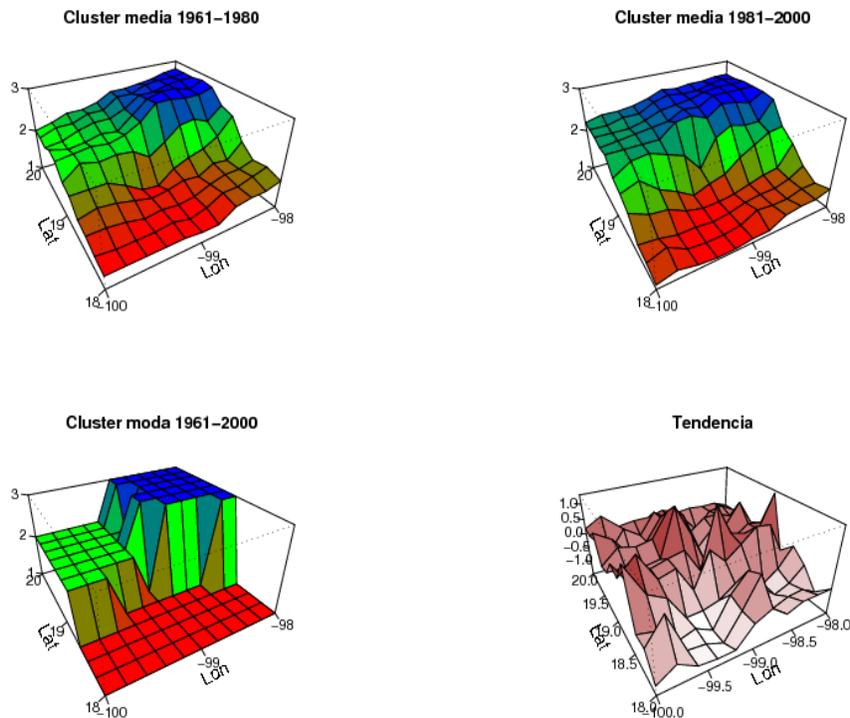


Figura 3.25 Media de los clusters en los períodos 1961-1980 y 1981-2000, moda del periodo 1961-2000 y tendencia de los clusters para la zona centro durante el mes de abril.

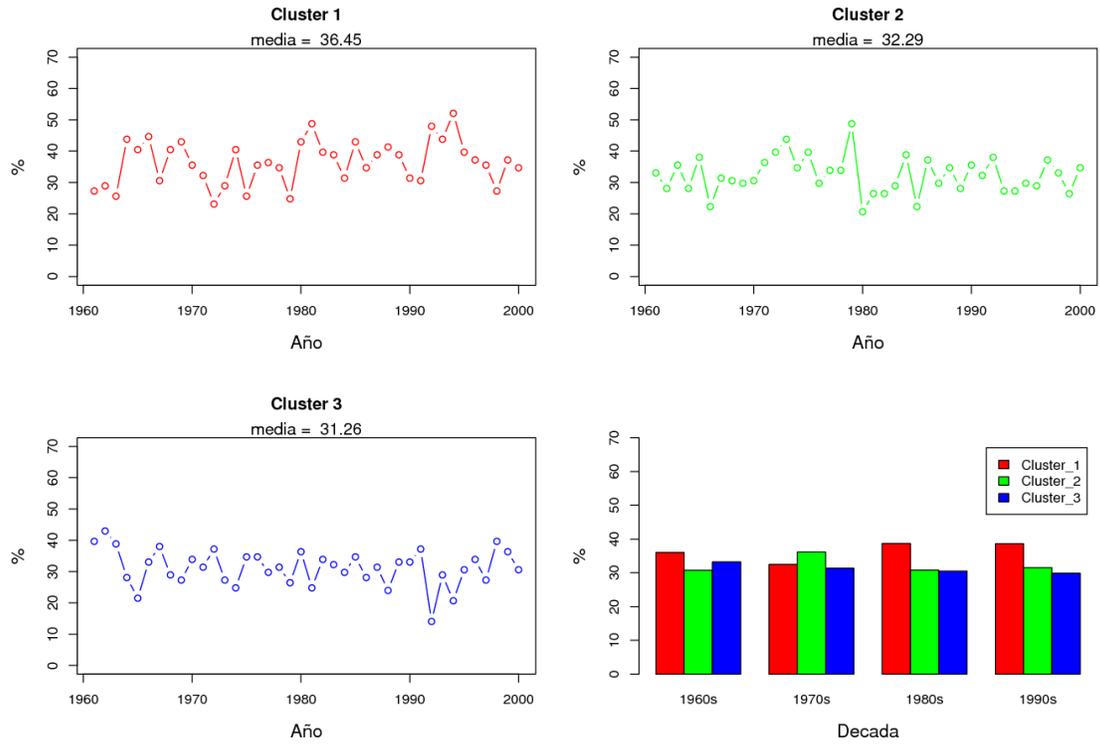


Figura 3.26 Variación interanual y promedios decadales del porcentaje de área cubierta de los tres tipos de clusters en la zona centro durante el mes de abril.

Periodo			
1961-1980	7	2	3
1981-2000	9	4	3
1961-2000	16	6	6

Tabla 3.7 Patrones de cluster más frecuentes para la zona centro del mes de abril.

A pesar de que las lluvias de verano generan un patrón de precipitación más complejo en la zona es sorprendente como, en ciertas zonas como esta, existe una huella bien definida que se repite prácticamente año con año (**Anexo A.4.3**). Lo anterior queda mostrado en las estadísticas de los clusters media y la similitud con el cluster moda (**Figura 3.27**). Las tendencias nuevamente no son lo suficientemente claras como para definir un patrón de crecimiento o decaimiento en alguna zona en particular. Los promedios decadales tampoco muestran algo notable excepto quizás que la zona de máximas precipitaciones es la que abarca siempre menor cobertura (**Figura 3.28**). Sin embargo, otra vez resalta la similitud de l patrón de precipitación más frecuente y su parecido con el cluster moda y las medias (**Figura 3.29**). Este patrón se presentó en aproximadamente el 28.5% del total, valor bastante alto para la temporada.

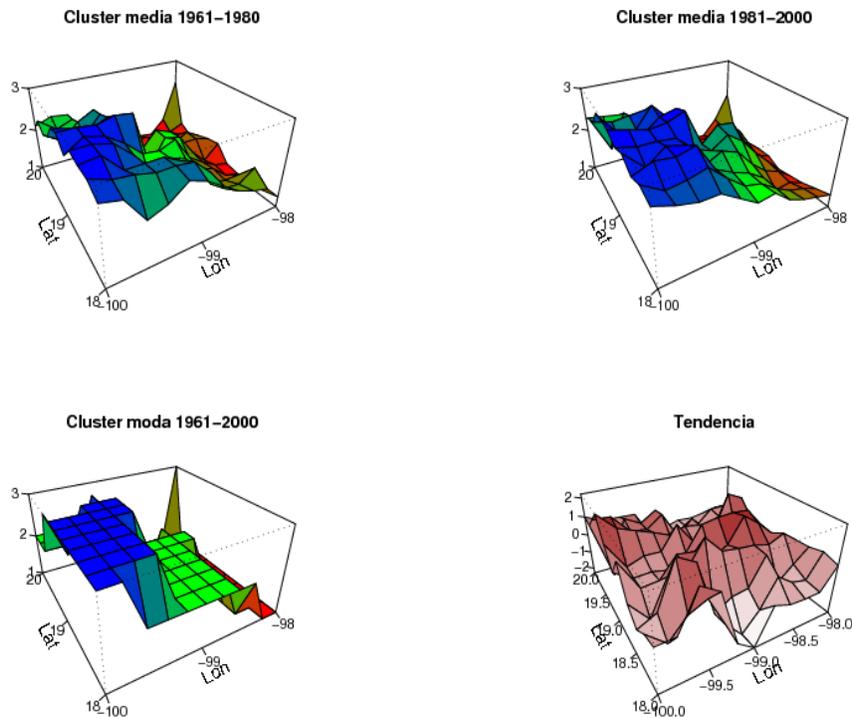


Figura 3.27 Media de los clusters en los períodos 1961-1980 y 1981-2000, moda del periodo 1961-2000 y tendencia de los clusters para la zona centro durante el mes de julio.

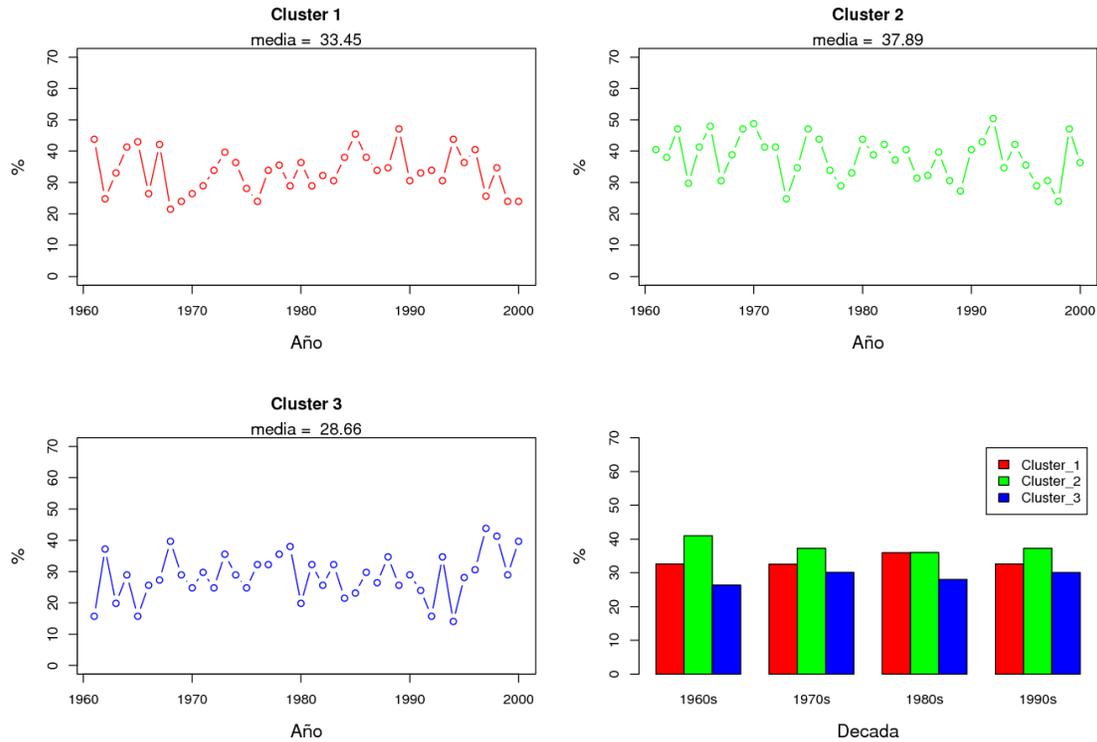


Figura 3.28 Variación interanual y promedios decadales del porcentaje de área cubierta de los tres tipos de clusters en la zona centro durante el mes de julio.

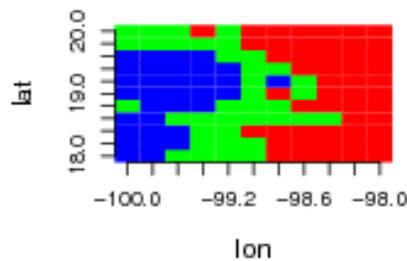


Figura 3.29 Patrón del cluster más frecuente con una similitud de hasta 85% entre los puntos dados (1967, 1971, 1977, 1978, 1982, 1983, 1986, 1988, 1989, 1993 y 1995) para la zona del centro del mes de julio.

Para octubre, los cambios más notables son la reducción en el área de cobertura de las precipitaciones máximas hacia los últimos 20 años y el aparente crecimiento de la zona de precipitaciones bajas hacia el sureste de la zona (**Figura 3.30**). Por otro lado, las tendencias muestran una clara tendencia positiva en el noreste de la zona y las tendencias más negativas hacia el sureste de la misma. Los promedios decadales también resaltan para los últimos 30 años del período de estudio un decremento en la zona de cobertura de las precipitaciones máximas y un incremento de las precipitaciones medias (**Figura 3.31**). El patrón más frecuente encontrado se presenta en un 20% del total (**Figura 3.32**).

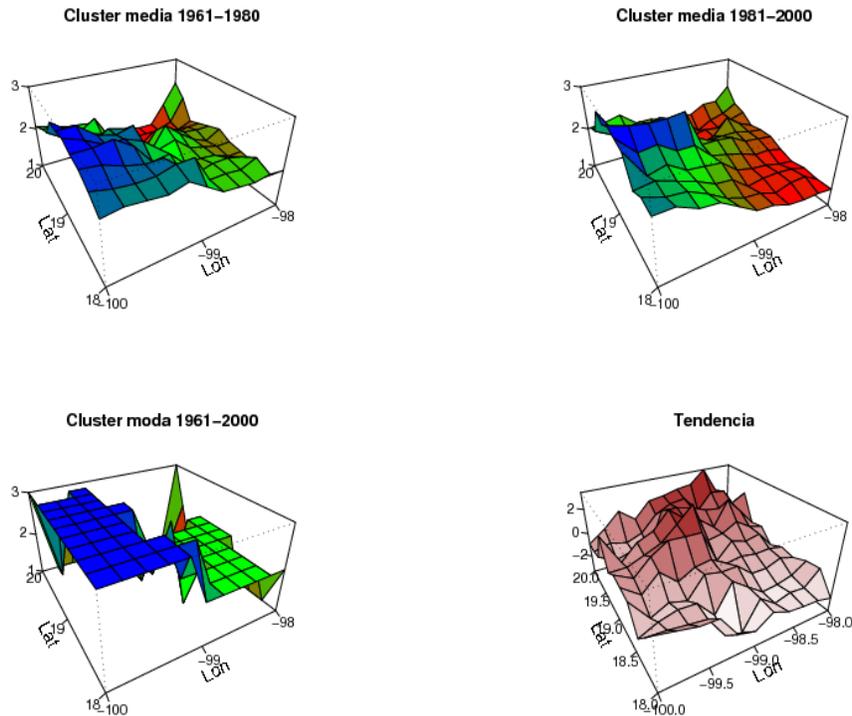


Figura 3.30 Media de los clusters en los períodos 1961-1980 y 1981-2000, moda del periodo 1961-2000 y tendencia de los clusters para la zona centro durante el mes de octubre.

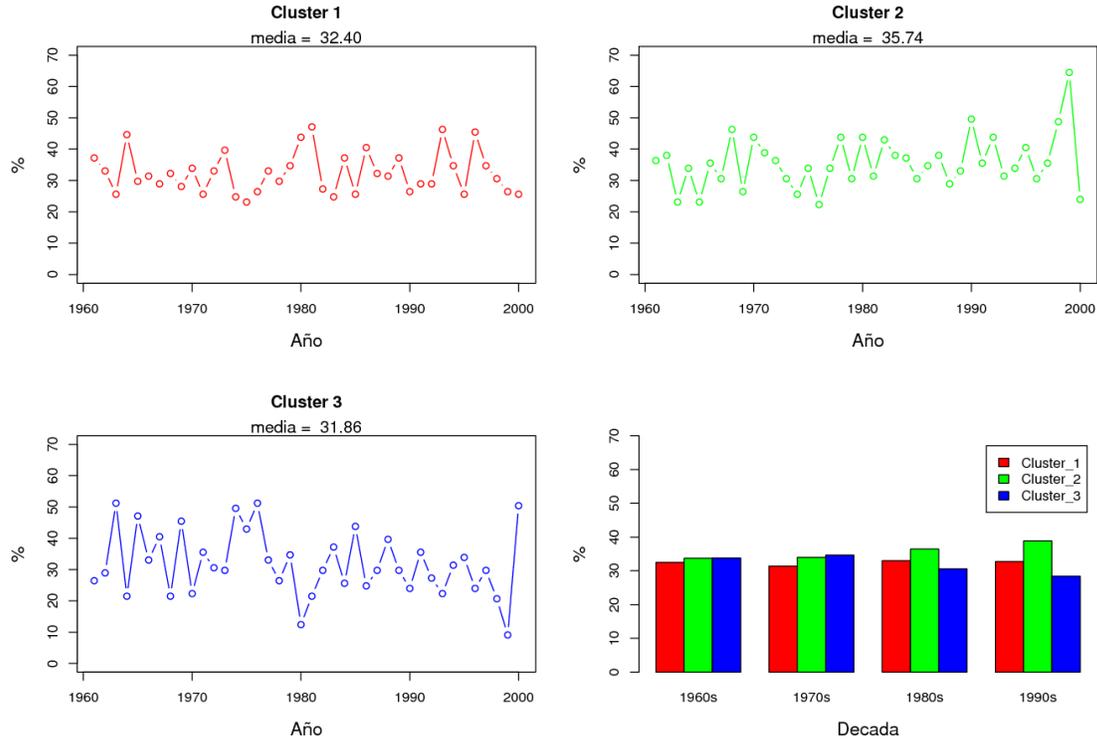


Figura 3.31 Variación interanual y promedios decadales del porcentaje de área cubierta de los tres tipos de clusters en la zona centro durante el mes de octubre.

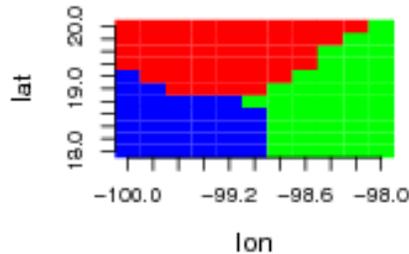


Figura 3.32 Patrón del cluster más frecuente con una similitud de hasta 85% entre los puntos dados (1961, 1967, 1968, 1970, 1979, 1985, 1989, 1997) para la zona del centro del mes de octubre.

3.4.5 Zona Sur (zsr)

Esta zona es muy interesante de analizar ya que se encuentra dentro de la región de mayor precipitación anual en todo el país. Nuevamente es sorprendente encontrar un patrón muy consistente en prácticamente todo el período (**Anexo A.5.1**). Como se puede ver en los productos estadísticos este patrón se encuentra bien definido con la zona de precipitaciones máximas hacia el noreste de la zona en forma de lengua y con la zona de precipitaciones bajas prácticamente cubriendo toda la parte sur de la región (**Figura 3.33**). Las tendencias únicamente destacan un valor positivo de unas cuantas celdas al noroeste de la zona. Los promedios decadales reafirman el dominio en cobertura de las precipitaciones bajas (**Figura 3.34**). Finalmente observamos como los dos patrones más frecuentes tienen similitud entre sí y la suma de ambos se presenta en el 88% de las ocasiones! (**Tabla 3.8**).

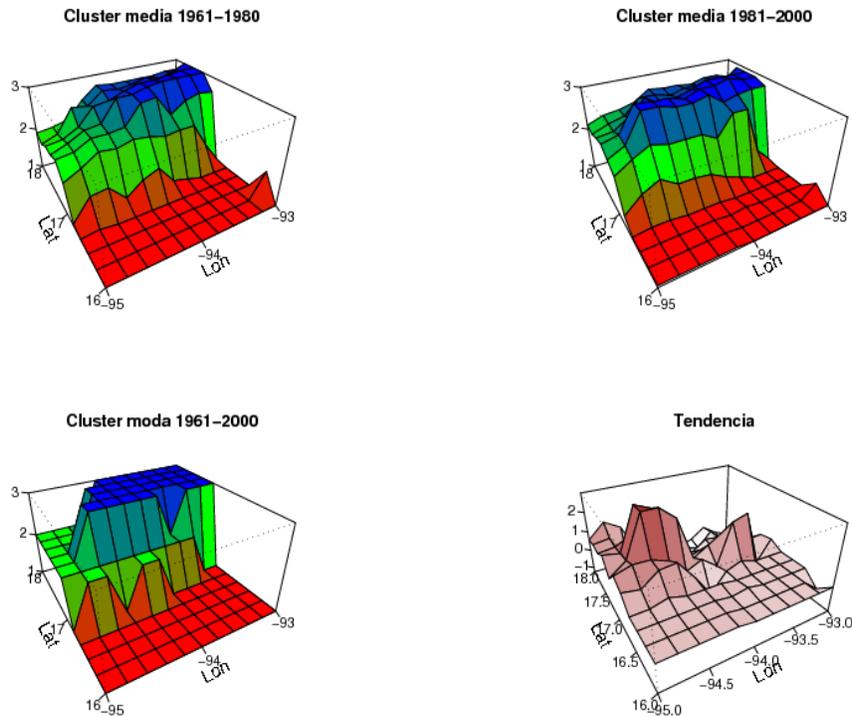


Figura 3.33 Media de los clusters en los períodos 1961-1980 y 1981-2000, moda del periodo 1961-2000 y tendencia de los clusters para la zona sur durante el mes de enero.

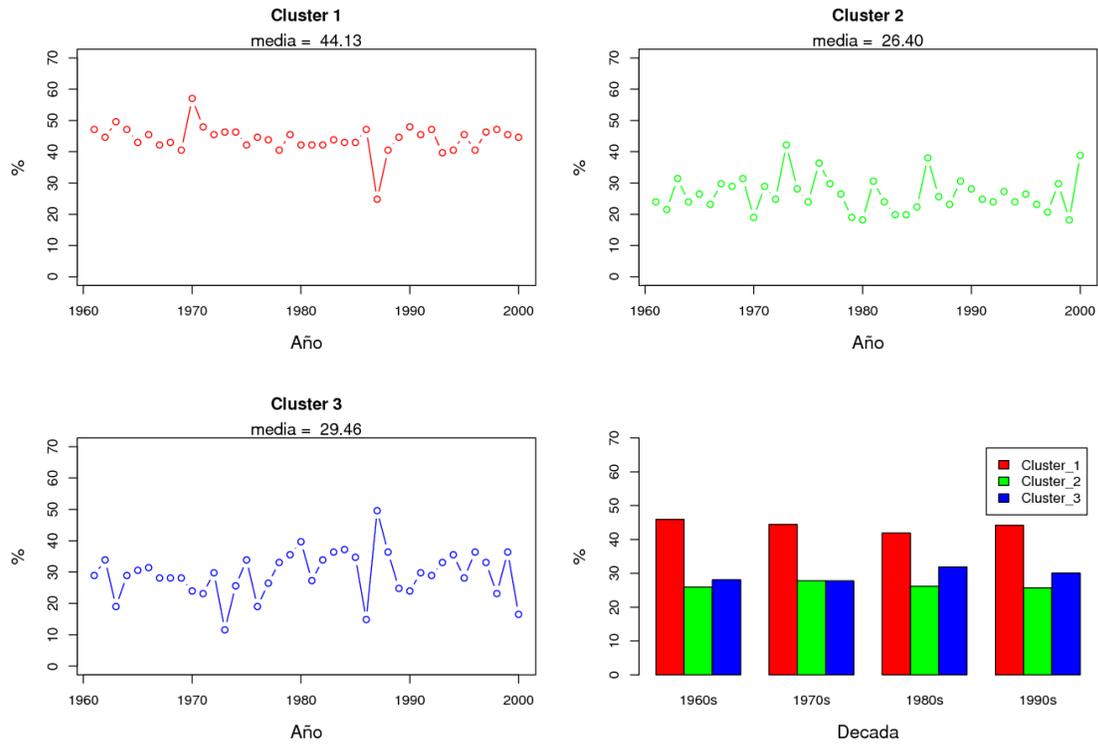


Figura 3.34 Variación interanual y promedios decadales del porcentaje de área cubierta de los tres tipos de clusters en la zona sur durante el mes de enero.

Periodo		
1961-1980	15	2
1981-2000	10	7
1961-2000	25	10

Tabla 3.8 Patrones del cluster más frecuentes para la zona sur del mes de enero.

Para el mes de abril se observa que conserva cierta continuidad, aunque no tan persistente, con el patrón de lluvias de enero; es decir, la región de precipitación mínima domina hacia el sur de la zona y la precipitación máxima al noreste de la misma (**Figura 3.35**). Nuevamente las tendencias máximas positivas se ubican al noroeste de la zona y las más negativas hacia el este de la zona. Sin embargo, la diferencia en área de cobertura de las precipitaciones bajas con el resto no es tan grande como en enero y la razón de esta diferencia es muy parecida en las cuatro décadas (**Figura 3.35**). También es notable la fuerte variabilidad interanual de los 3 clusters que ciertamente es mayor al de enero. Finalmente, los dos patrones de precipitación más frecuentes vuelven a ser bastante parecidos a los de enero y en suma se presentaron juntos el 35% de las veces (**Tabla 3.9**).

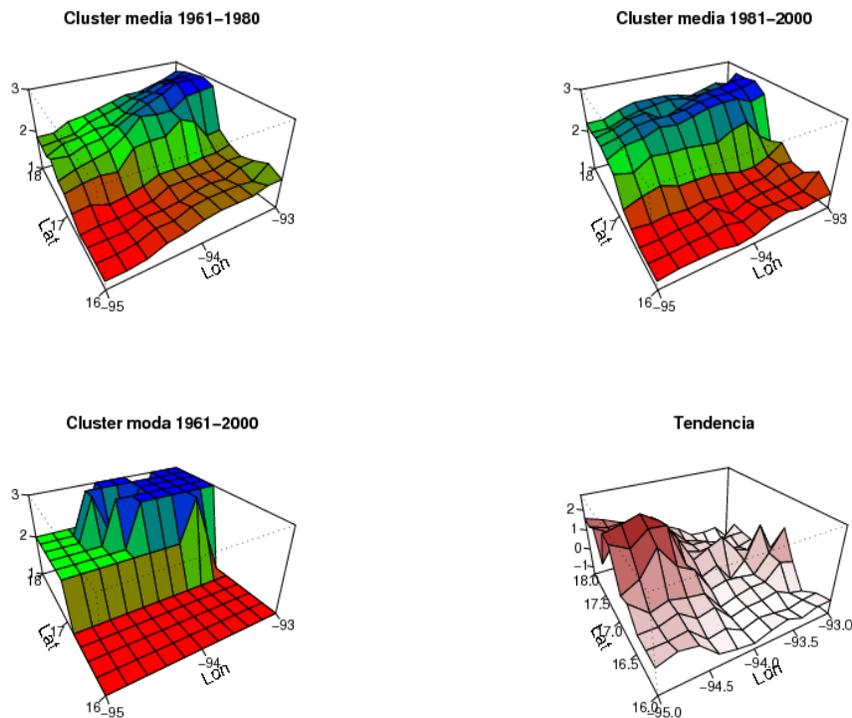


Figura 3.35 Media de los clusters en los períodos 1961-1980 y 1981-2000, moda del periodo 1961-2000 y tendencia de los clusters para la zona sur durante el mes de abril.

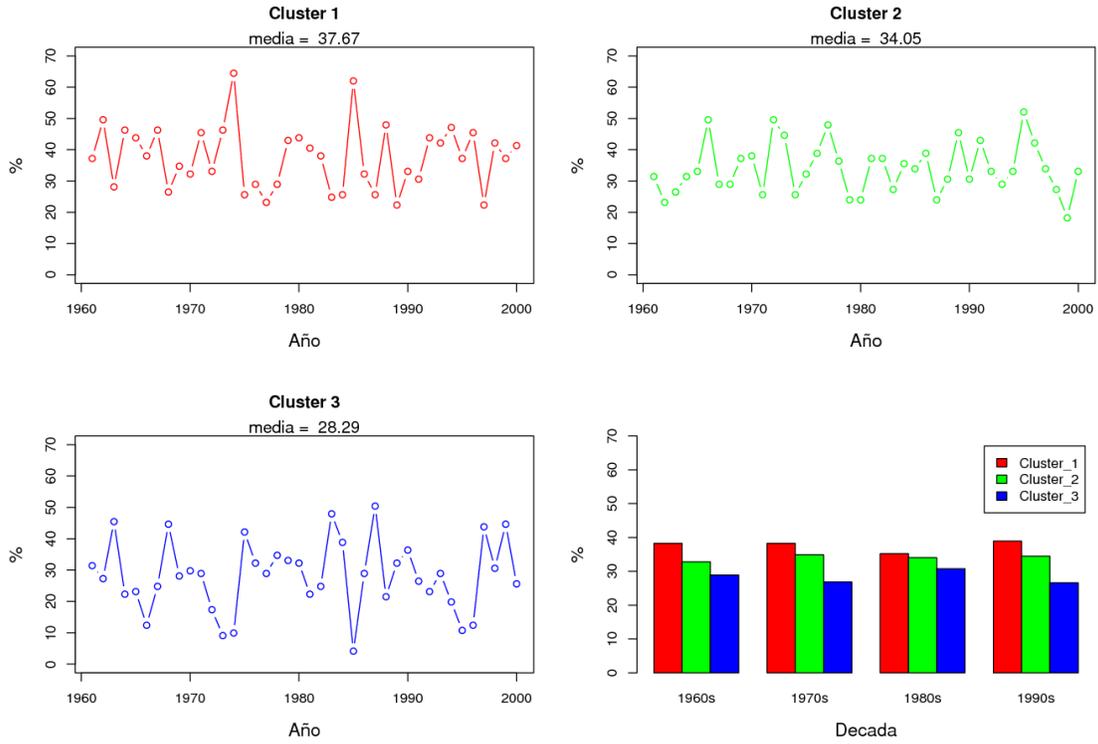


Figura 3.36 Variación interanual y promedios decadales del porcentaje de área cubierta de los tres tipos de clusters en la zona sur durante el mes de abril.

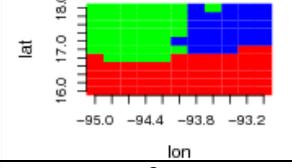
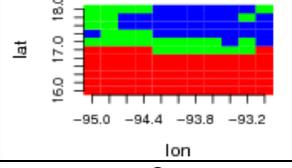
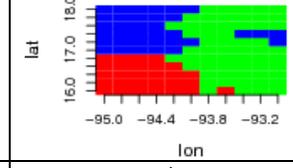
Periodo			
1961-1980	6	3	1
1981-2000	4	1	2
1961-2000	10	4	3

Tabla 3.9 Patrones de cluster más frecuentes para la zona del sur del mes de abril.

Para el mes representativo de verano, se observa que se sigue manteniendo sorprendentemente la constancia del patrón de precipitación más frecuente. Lo anterior se deduce de la similitud entre los clusters media y moda (**Figura 3.37**) y de los patrones más frecuentes (**Tabla 3.10**). Sin embargo, a diferencia de los meses de enero y abril, ahora se observa que las precipitaciones máximas en la zona dominan hacia el noroeste. Por otro lado, las tendencias más positivas se ubican el suroeste y las más negativas hacia el noreste. Algo notable es que los promedios decadales señalan un crecimiento monótono en el área de cobertura de precipitaciones mínimas a costa de la reducción en precipitaciones máximas (**Figura 3.38**). En total, los dos patrones de cluster más frecuentes se presentaron en casi el 50% del total (**Tabla 3.10**), algo sorprendente para la época del año y zona del país.

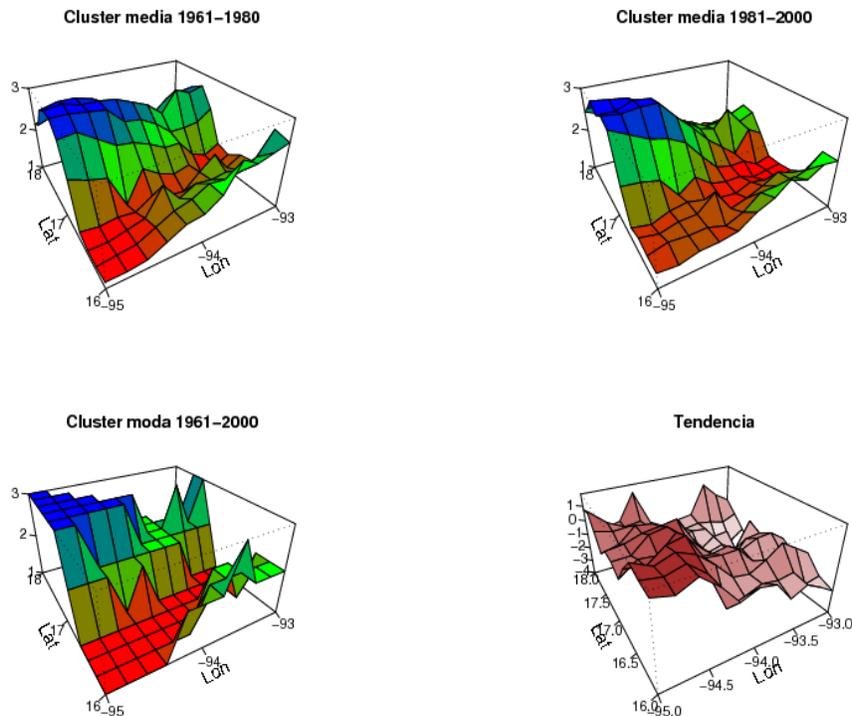


Figura 3.37 Media de los clusters en los períodos 1961-1980 y 1981-2000, moda del periodo 1961-2000 y tendencia de los clusters para la zona sur durante el mes de julio.

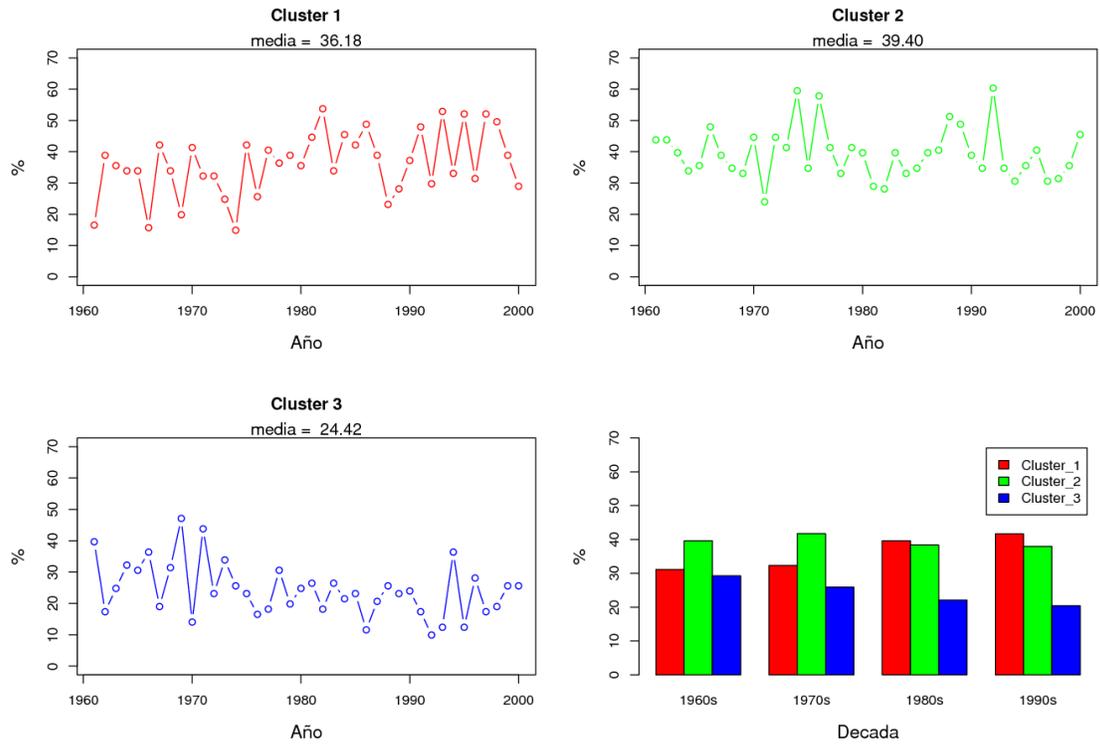


Figura 3.38 Variación interanual y promedios decadales del porcentaje de área cubierta de los tres tipos de clusters en la zona sur durante el mes de julio.

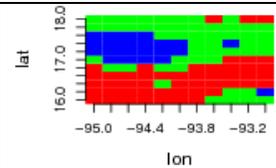
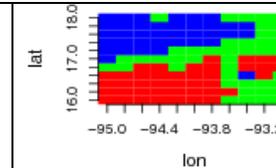
Periodo		
	lon	lon
1961-1980	3	5
1981-2000	7	4
1961-2000	10	9

Tabla 3.10 Patrones de cluster más frecuentes para la zona sur del mes de julio.

Para el otoño se observa que el patrón de precipitación vuelve a ser bastante similar al de enero y abril, lo que nos hace suponer que es el patrón dominante en la región en la mayor parte del año. Nuevamente confirmamos el parecido entre los clusters media y moda (**Figura 3.39**); sin embargo, en este caso las tendencias máximas positivas se ubican al suroeste de la zona. En el caso de los promedios decadales, se nota un ligero decremento en el área de cobertura de precipitaciones mínimas, siendo este cluster 1 el dominante en área para todo el período de estudio (**Figura 3.40**). El patrón más frecuente, que nuevamente es consistente con los clusters media y moda, se presentó en el 68% del total (**Figura 3.41**).

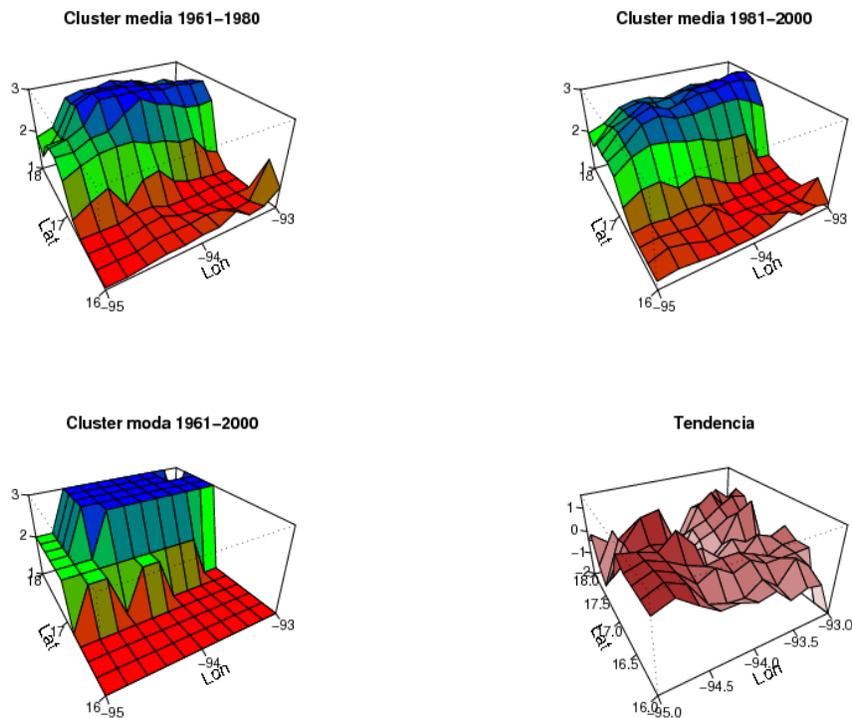


Figura 3.39 Media de los clusters en los períodos 1961-1980 y 1981-2000, moda del periodo 1961-2000 y tendencia de los clusters para la zona sur durante el mes de octubre.

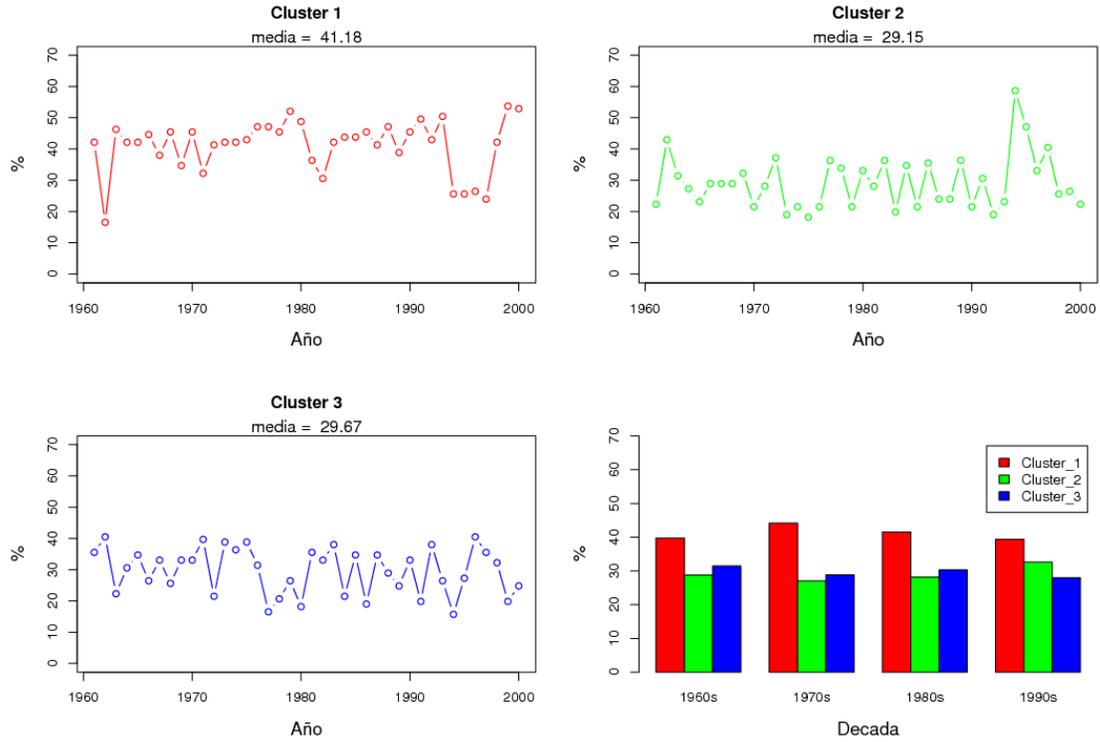


Figura 3.40 Variación interanual y promedios decadales del porcentaje de área cubierta de los tres tipos de clusters en la zona sur durante el mes de octubre.

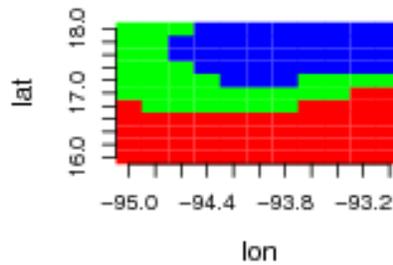


Figura 3.41 Patrón del cluster con una similitud de hasta 85% entre los puntos dados (27 años) para la zona sur del mes de octubre.

3.4.6 Zona Sureste (zse)

Para la zona de la Península de Yucatán se observa que en invierno las precipitaciones máximas dominan al sureste de la zona, mientras que se observa un cambio importante en la distribución de precipitaciones bajas y medias en los dos períodos climáticos analizados (**Figura 3.42**). Lo anterior se debe principalmente a que las tendencias máximas positivas se ubican al suroeste de la zona. Los promedios decadales no muestran cambios significativos, pero se observa una mayor variabilidad interanual en el área de cobertura de las precipitaciones máximas (**Figura 3.43**). Es notable que los tres patrones de precipitación más frecuentes todos tienden a decrecer en frecuencia para los últimos 20 años lo que supone un cambio importante en la forma de precipitar en la zona (**Tabla 3.11**).

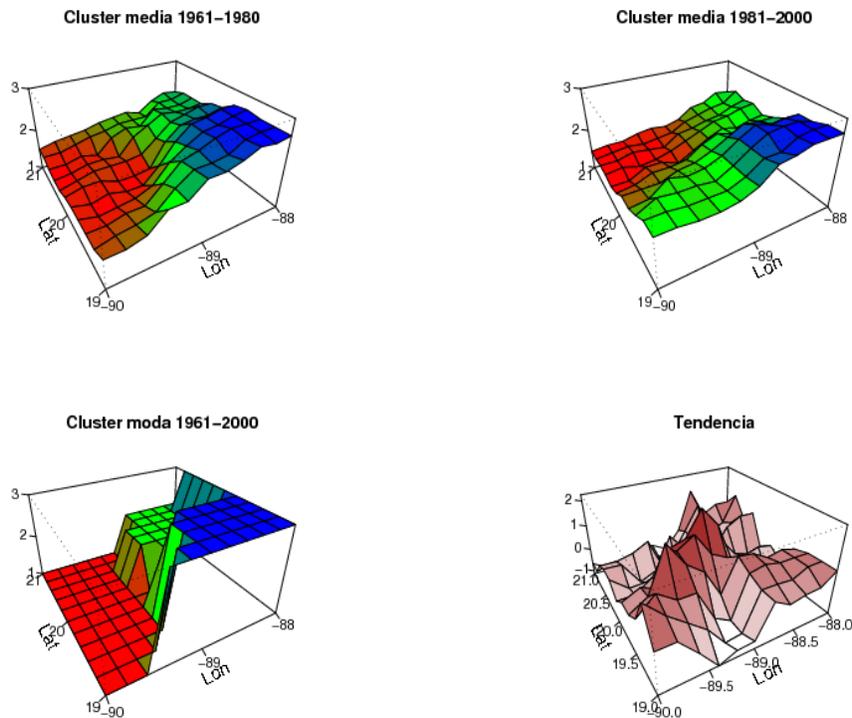


Figura 3.42 Media de los clusters en los períodos 1961-1980 y 1981-2000, moda del periodo 1961-2000 y tendencia de los clusters para la zona sureste durante el mes de enero.

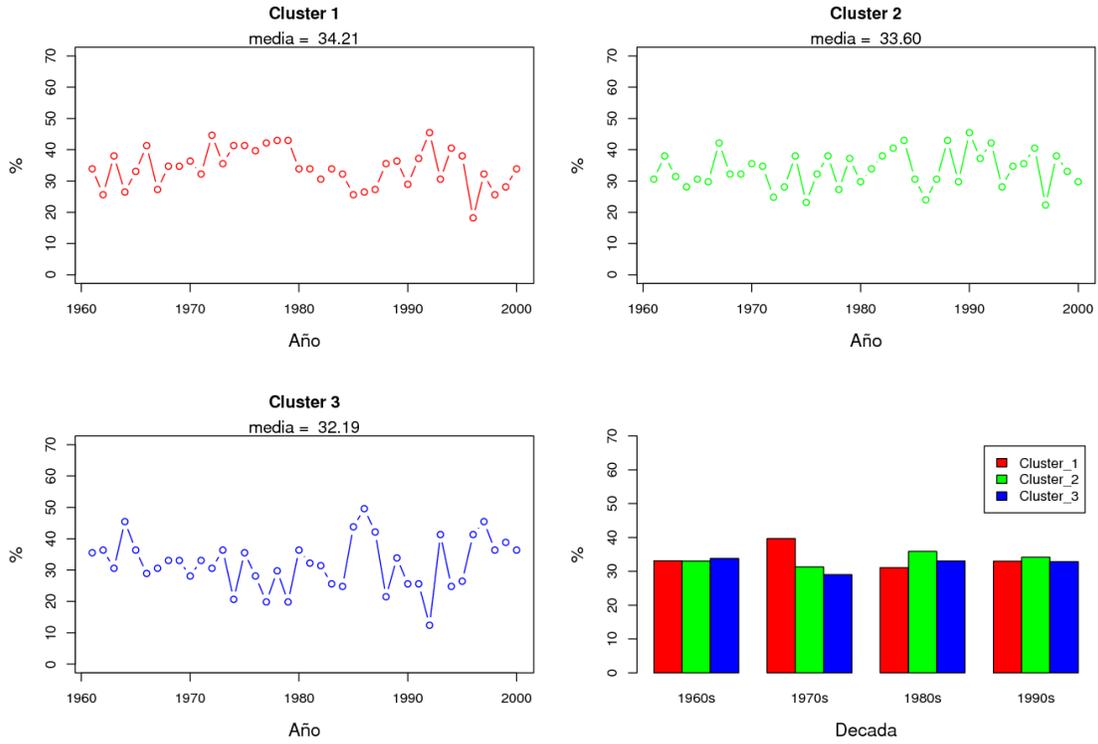


Figura 3.43 Variación interanual y promedios decadales del porcentaje de área cubierta de los tres tipos de clusters en la zona sureste durante el mes de enero.

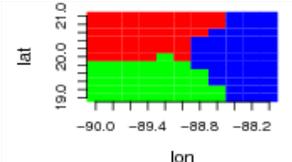
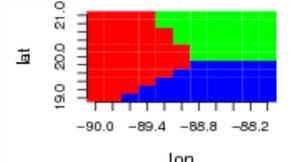
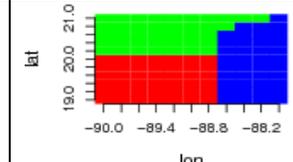
Periodo			
1961-1980	4	5	3
1981-2000	2	0	2
1961-2000	6	5	5

Tabla 3.11 Patrones del cluster más frecuentes para la zona sureste del mes de enero.

Para el mes de abril, se notan algunas modificaciones en el patrón de cluster media entre los dos períodos, como el traslado de la región de precipitaciones bajas del noroeste al norte, y la reducción de la región de precipitaciones máximas (**Figura 3.44**). Las tendencias más positivas se localizan al noroeste de la zona. Los promedios decadales del área de cobertura no muestran una tendencia significativa en ninguna de las tres categorías de precipitación (**Figura 3.45**). Finalmente los dos patrones de precipitación más frecuentes representan el 25% del total y coinciden con los resultados estadísticos mencionados anteriormente (**Tabla 3.12**).

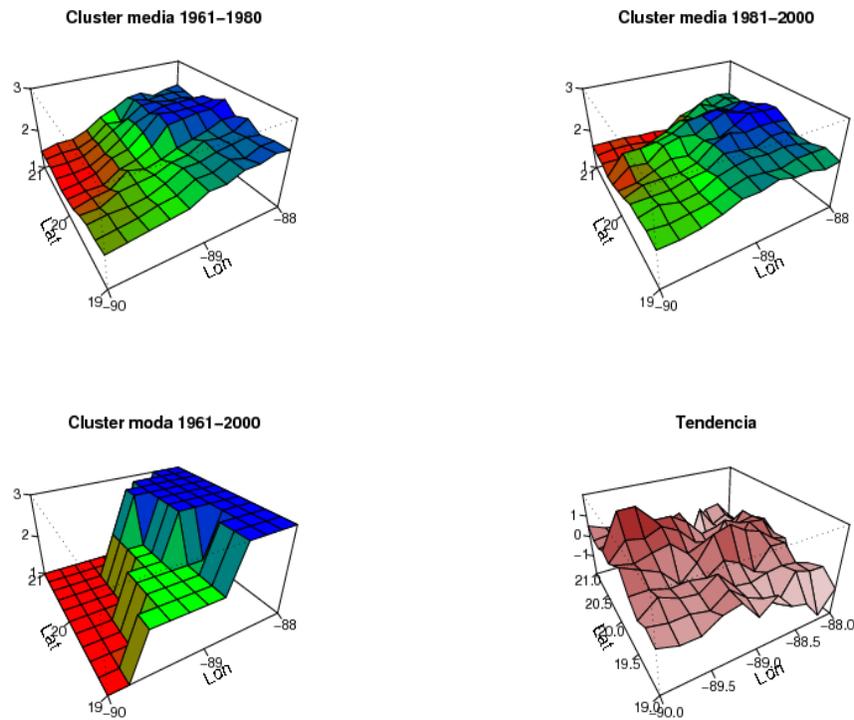


Figura 3.44 Media de los clusters en los períodos 1961-1980 y 1981-2000, moda del periodo 1961-2000 y tendencia de los clusters para la zona sureste durante el mes de abril.

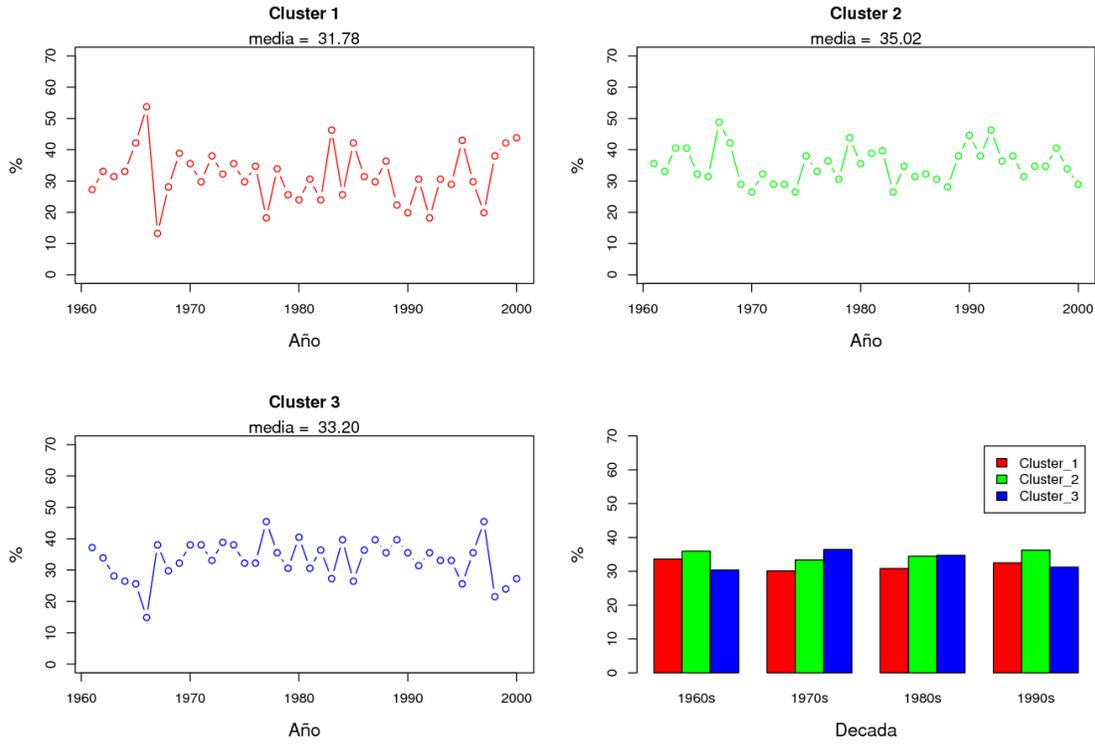


Figura 3.45 Variación interanual y promedios decadales del porcentaje de área cubierta de los tres tipos de clusters en la zona sureste durante el mes de abril.

Periodo			
1961-1980	2	2	3
1981-2000	3	3	1
1961-2000	5	5	4

Tabla 3.12 Patrones del cluster más frecuentes para la zona sureste del mes de abril.

Para el verano, se muestran cambios importantes en el cluster media de los dos períodos de estudio. Lo anterior se observa en cuanto la zona de precipitaciones bajas cambia del centro de la region al suroeste de la misma, y la zona de precipitaciones máximas se redistribuye de la zona periférica al noreste de la región (**Figura 3.46**). Se observa también que el cluster moda se comporta de forma bastante irregular, y las tendencias máximas positivas se encuentran al centro de la región y las máximas negativas al sur de la misma. También es notable que la variabilidad interanual de los tres tipos de clusters es alta y los promedios decadales no muestran una tendencia significativa en ningún caso (**Figura 3.47**). Por último el patrón de cluster más frecuente solo se mostro con una recurrencia del 10% y su forma no coincide con ninguna de los productos estadísticos arriba mencionados (**Figura 3.48**).

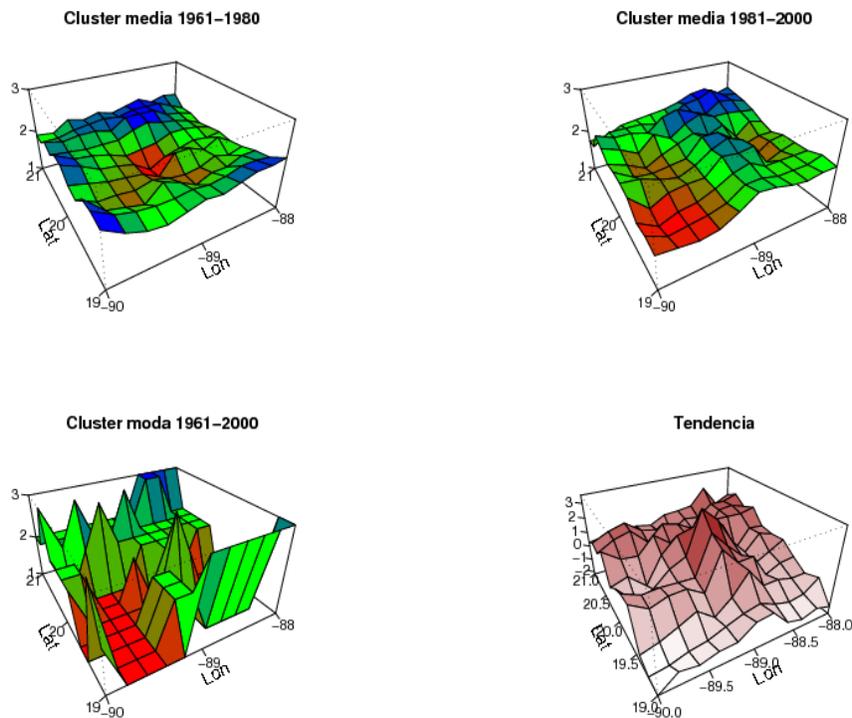


Figura 3.46 Media de los clusters en los períodos 1961-1980 y 1981-2000, moda del periodo 1961-2000 y tendencia de los clusters para la zona sureste durante el mes de julio.

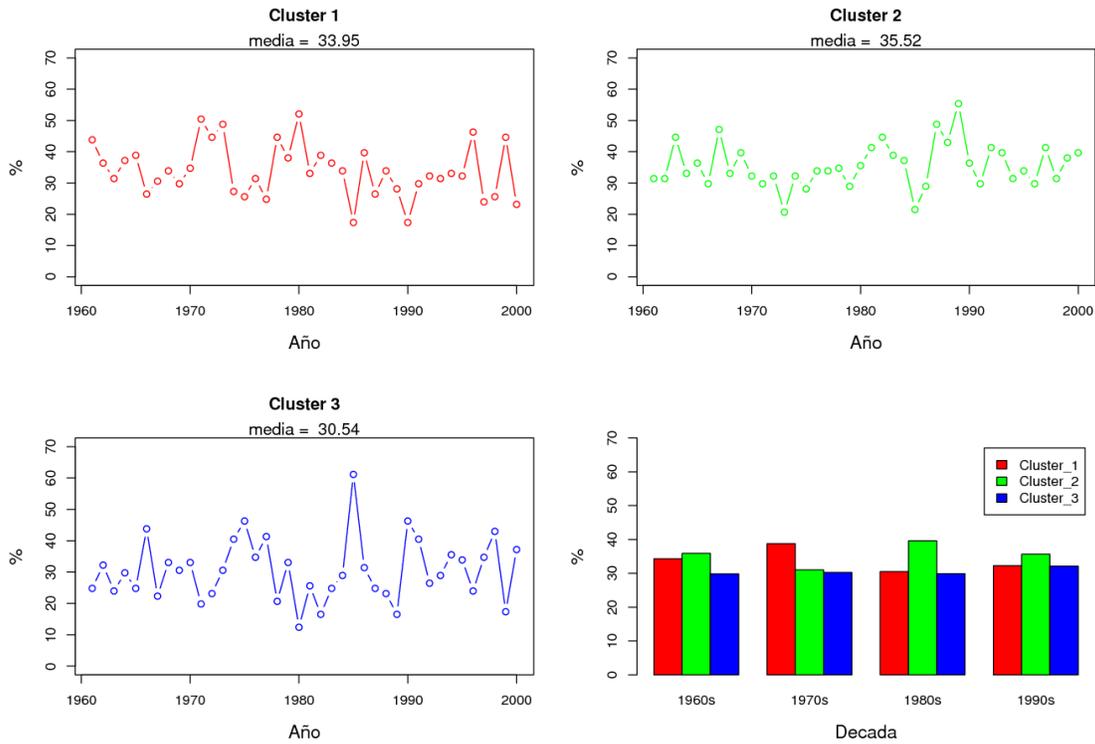


Figura 3.47 Variación interanual y promedios decadales del porcentaje de área cubierta de los tres tipos de clusters en la zona sureste durante el mes de julio.

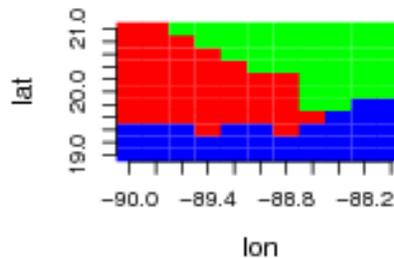


Figura 3.48 Patrón del cluster más frecuente con una similitud de hasta 85% entre los puntos dados (1964, 1970, 1976, 1992) para la zona del sureste del mes de julio.

En octubre, los cambios en el cluster moda de la precipitación de ambos períodos analizados vuelve a ser importante aunque no tan irregular como en el verano. Aquí se observa un corrimiento de la zona de precipitaciones bajas del noroeste hacia el centro de la zona, y la zona de precipitaciones máximas se ve drásticamente reducida en extensión hacia el sureste de la zona (**Figura 3.49**). El cluster moda es consistente en general con los dos patrones del cluster media y las tendencias máximas positivas se notan hacia la zona periférica oeste y sur de la zona y las negativas al centro. La variabilidad interanual aunque alta muestra una tendencia positiva muy marcada para las precipitaciones mínimas y negativa para las máximas, algo que se corrobora también en los promedios decadales (**Figura 3.50**). Por último el patrón de cluster dominante se mostro con una recurrencia del 12.5% en el período total de estudio (**Figura 3.51**).

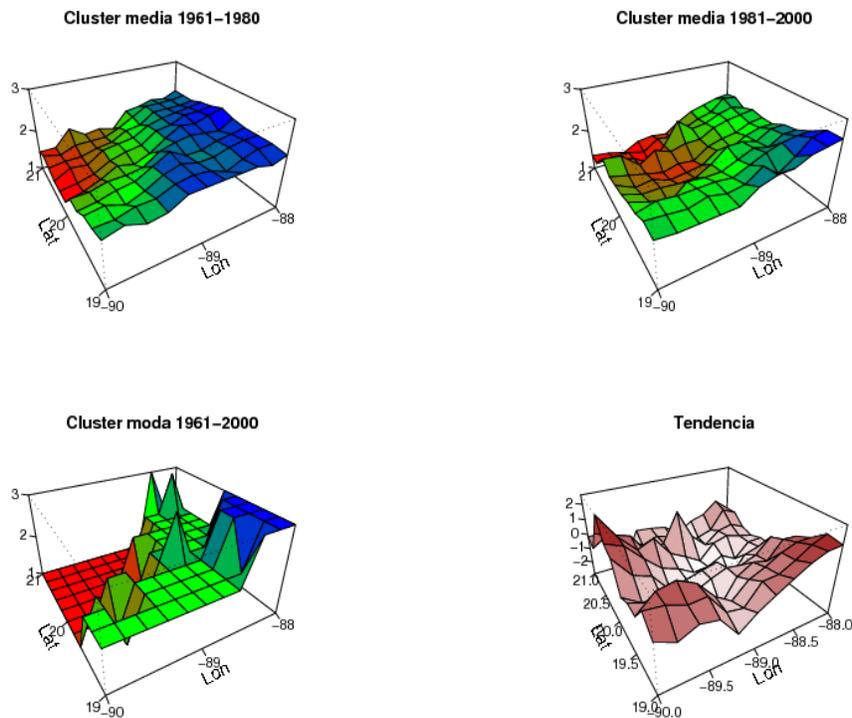


Figura 3.49 Media de los clusters en los períodos 1961-1980 y 1981-2000, moda del periodo 1961-2000 y tendencia de los clusters para la zona sureste durante el mes de octubre.

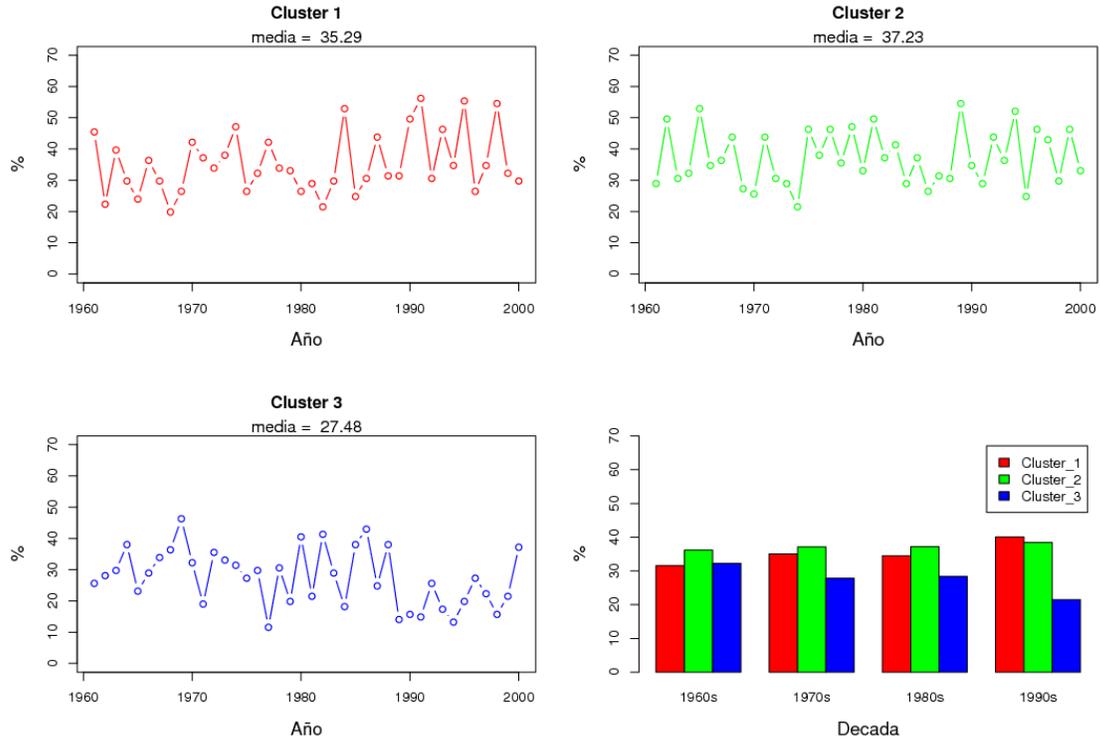


Figura 3.50 Variación interanual y promedios decadales del porcentaje de área cubierta de los tres tipos de clusters en la zona sureste durante el mes de octubre.

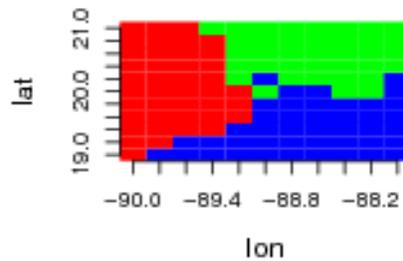


Figura 3.51 Patrón del cluster más frecuente con una similitud de hasta 85% entre los puntos dados (1963, 1972, 1980, 1984, 1990) para la zona del sureste del mes de octubre.

3.5 Conclusiones.

La idea general de aplicar técnicas de análisis de conglomerados ha demostrado ser viable para analizar los comportamientos espacio-temporales de la lluvia mensual a nivel regional y con ello identificar la *huella* de las tormentas significativas de la región.

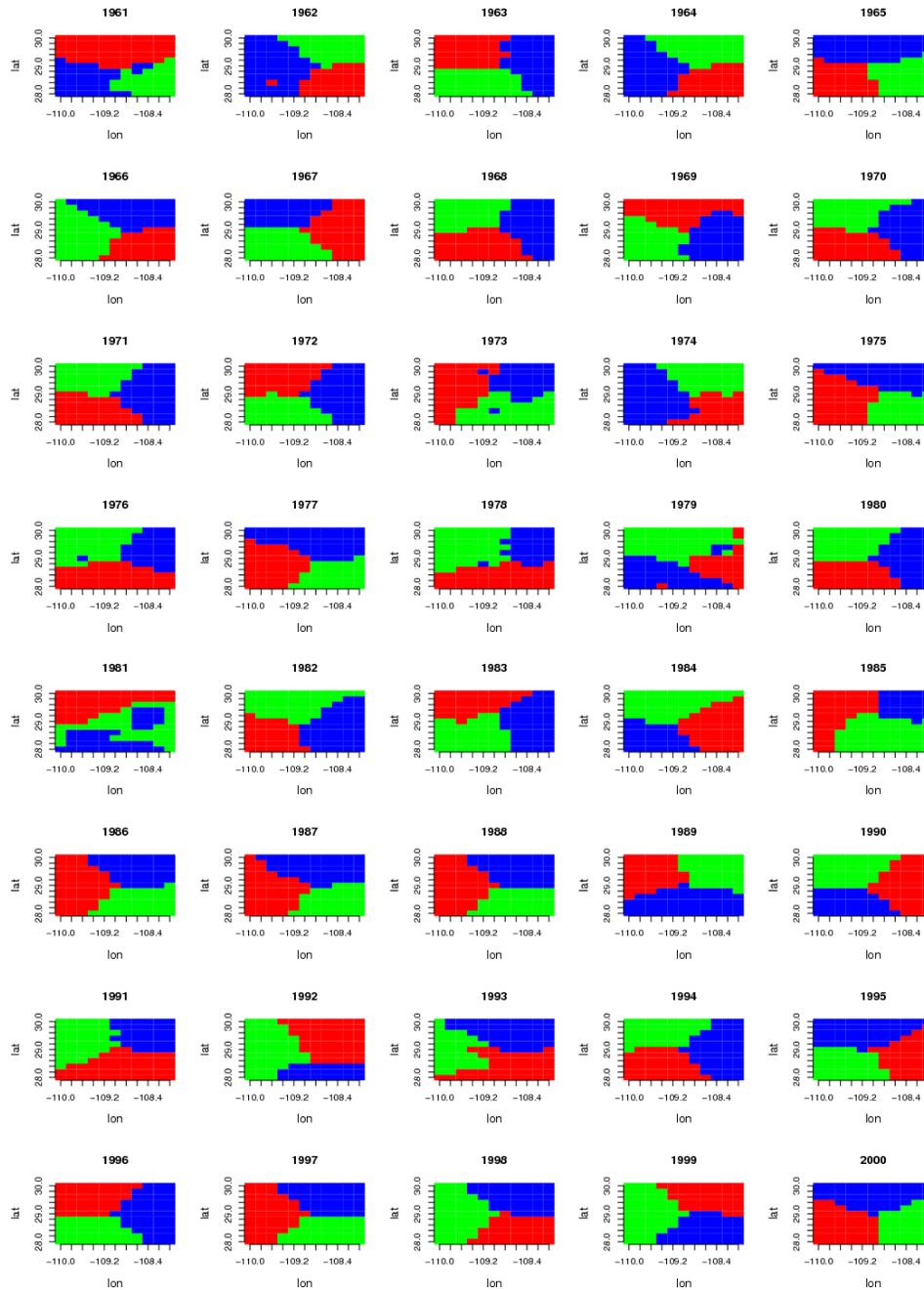
Dentro de los elementos a destacar tenemos:

- El patrón de lluvias de las regiones analizadas siempre resulto ser bastante *simétrico* para las lluvias invernales y primaverales (enero y abril, respectivamente). Lo anterior es consistente, físicamente, en cuanto que la lluvia invernal en nuestro país proviene, en su gran mayoría, del efecto de frentes fríos, los cuales son fenómenos sinópticos (de gran escala) cuya precipitación se distribuye de forma más homogénea que las precipitaciones convectivas de verano en una región determinada. La señal más notable se presentó en la zona sur en donde prácticamente toda la lluvia invernal está caracterizada por dos patrones significativos.
- Los patrones de precipitación más complejos, como era de esperarse, se dieron en la temporada húmeda (julio). Lo anterior es ciertamente debido a que el tipo de lluvia convectiva generada por efectos del monzón (en el noroeste y occidente) y por ondas del este y huracanes (centro, sur y sureste) deja una huella más *aleatoria* debido a la menor escala de sus elementos (el monzón combinado con efectos orográficos). Precisamente este último fenómeno se mostro de manera muy clara para los resultados del noroeste. Otro caso bastante notable fueron la consistencia de los patrones de precipitación más frecuentes encontrados para la zona sur y zona centro, resultado ciertamente inesperado y en donde es muy probable (aunque no demostrado aquí) que sean factores orográficos los que esten influyendo.
- En cuanto a los análisis de tendencias, casos notables fueron la marcada reducción en verano del área geográfica de las precipitaciones medias del noroeste a costa del aumento en la zona de precipitaciones máximas del monzón que se ha presentados durante los últimos 30 años del período analizado. Este mismo resultado se presenta también para la zona noreste, por lo que creemos que sería necesario un estudio más detallado que explorara las causas de este resultado. Para la misma zona noreste también es desatacable el cambio en el patrón de precipitación invernal y otoñal en el noreste durante los últimos 20 años (1981-2000). Nuevamente para la zona sur en el verano se presenta un resultado notable en cuanto que se observó que la fuerte tendencia positiva en el porcentaje de área abarcada por las precipitaciones bajas a costa de la fuerte disminución paulatina del área de precipitaciones máximas.

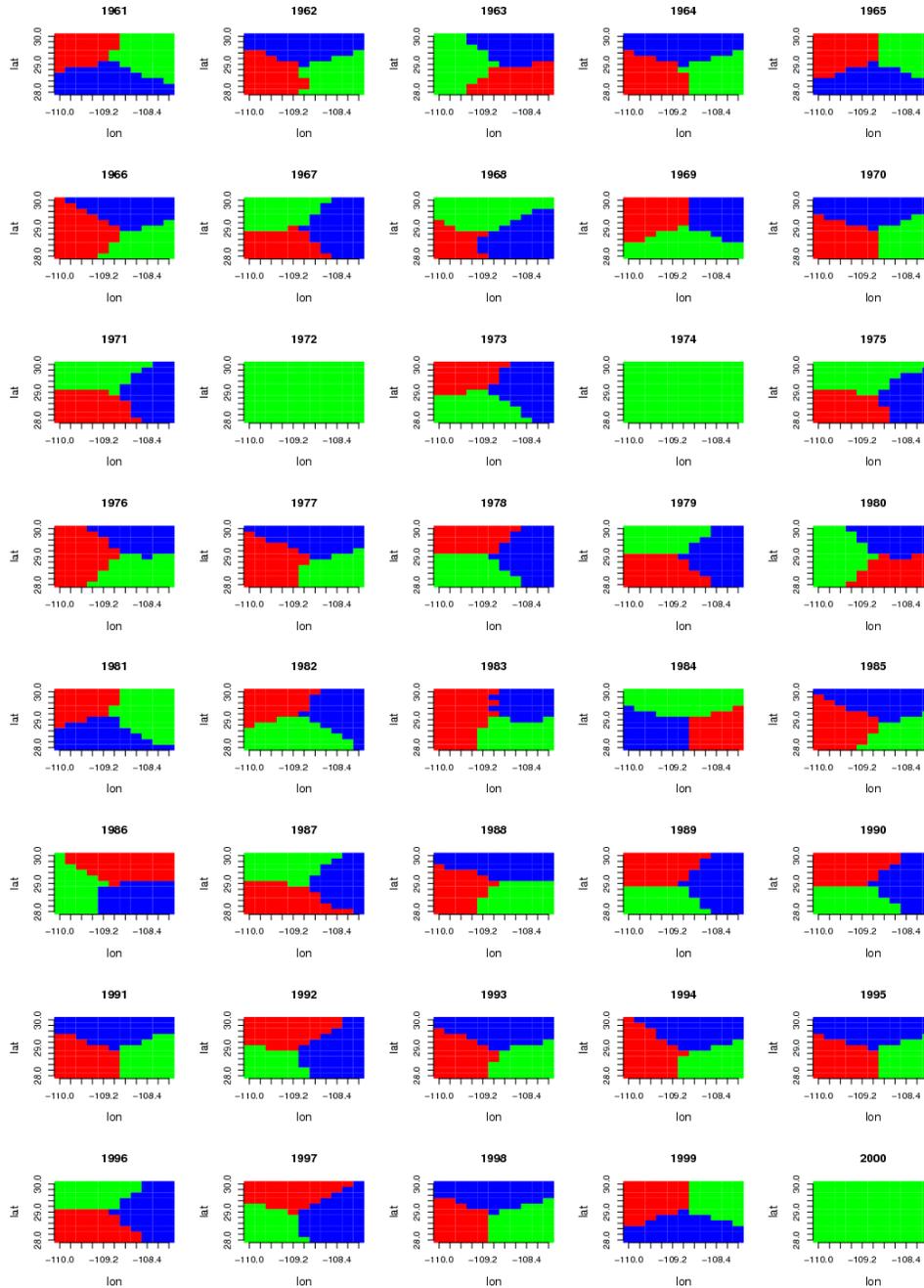
3.6 Referencias.

- Bezdek, J.C. (1981). *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*. ISBN 0306406713
- Cabello, Orza and Galiano (2008). Air Mass Origin and its Influence over the Aerosol Size Distribution: a Study in SE Spain, 7th EMS Annual Meeting and 8th European Conference on Applications of Meteorology, pp. 47-52.
- Dunn, J. (1974). "Well separated clusters and optimal fuzzy partitions". *Journal of Cybernetics*: 95–104.
- Jorba O., C. Pérez, F. Rocabosch, and J. M. Baldasano (2004). Cluster Analysis of 4-Day Back Trajectories Arriving in the Barcelona Area (Spain) from 1997 to 2002. *Journal of Applied Meteorology*, 43, 6: 887-901.
- McGregor, G.R., y S. Nieuwolt (1998). *Tropical Climatology*. Second Edition. John Wiley & Sons. 142-164 pp.
- Palecki M.A. *et al.* (2004). Storm Precipitation in the United States. Part I: Meteorological Characteristics. American Meteorological Society, Volumen 44, 933-946 pp.
- Serafin, S., A. Bertò, and D. Zardi (2005): Application of cluster analysis techniques to the verification of quantitative precipitation forecasts. 28th International Conference on Alpine Meteorology and MAP Meeting, Zadar (HR), May 23-May 27 2005. Proceedings, 395-398.
- Tryon, R. C. (1939). *Cluster analysis*. New York: McGraw-Hill.
- Wilks, D.S. (1995). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, ISBN-0-12-751965-3, 467 p.

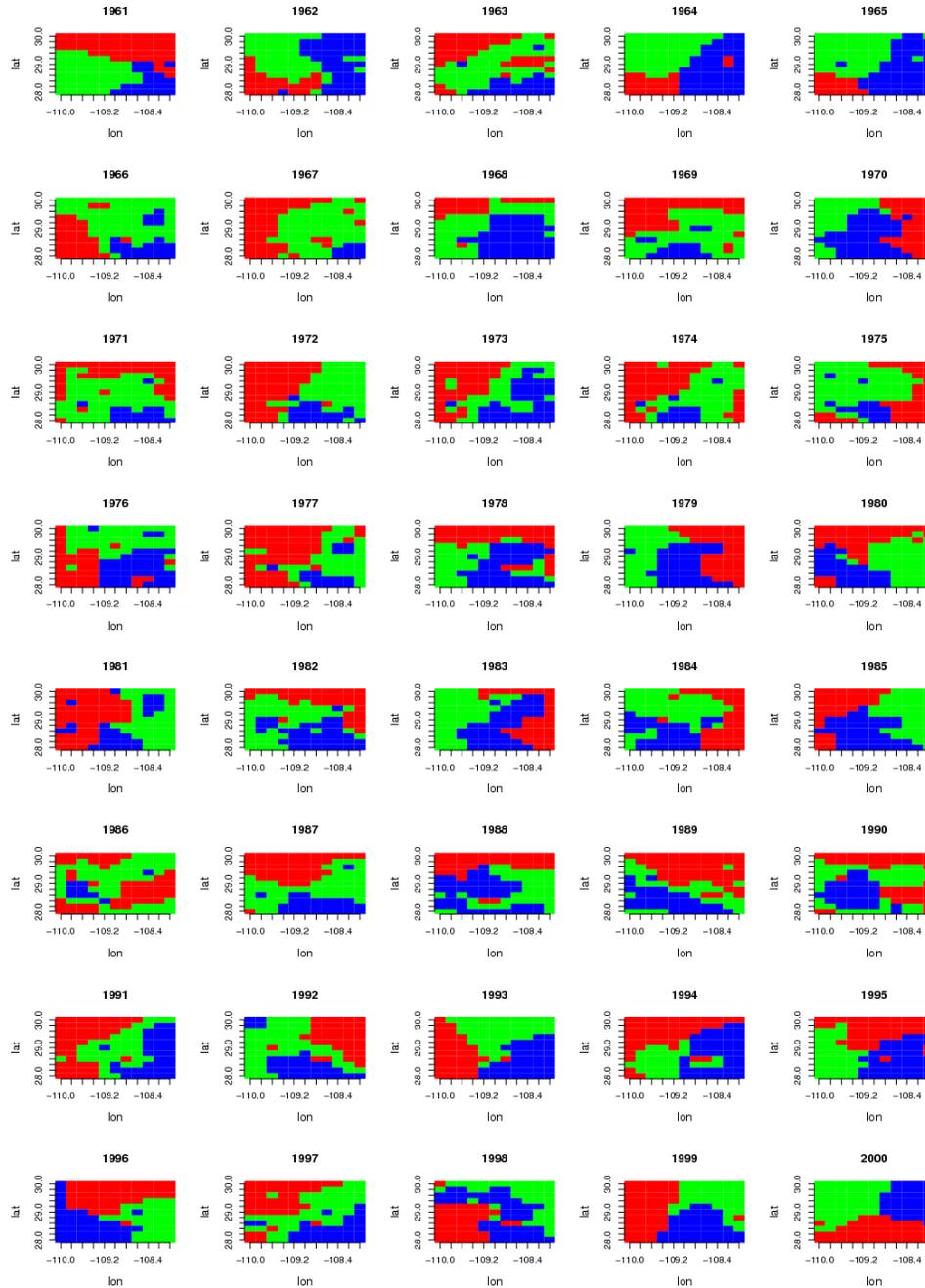
3.7 Anexo.



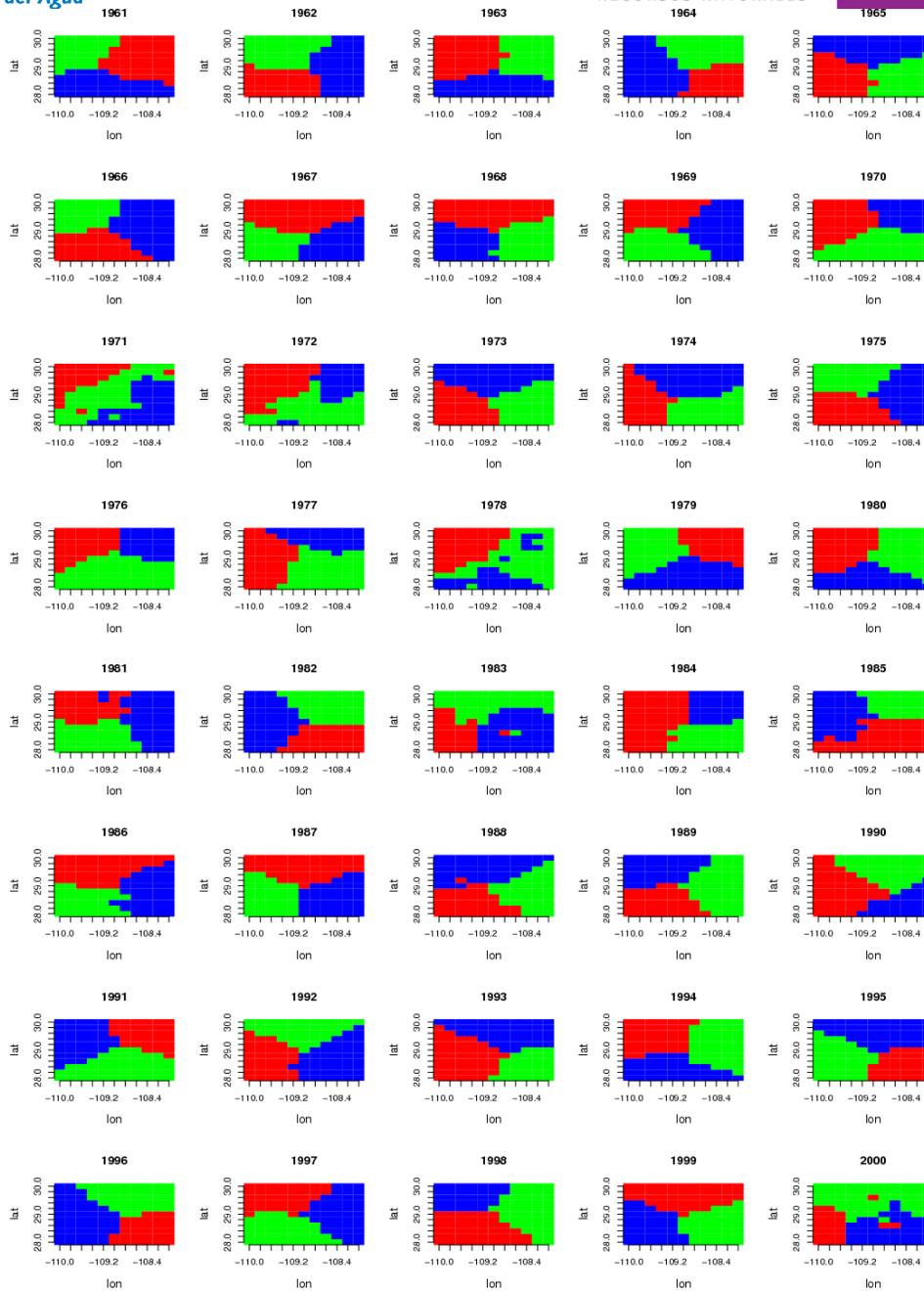
A.1.1 Distribución de clusters para la zona noroeste en enero.



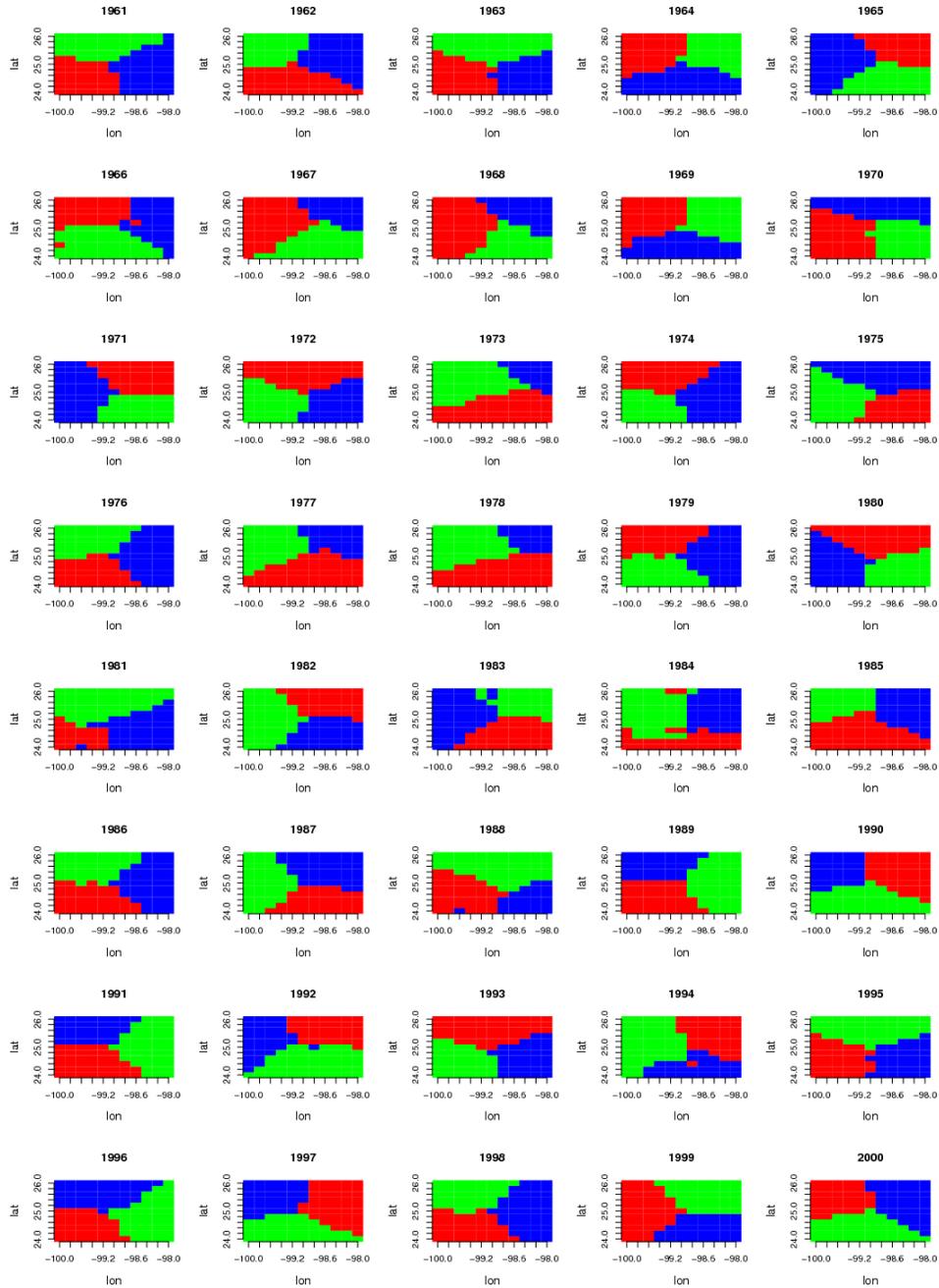
A.1.2 Distribución de clusters para la zona noroeste en abril.



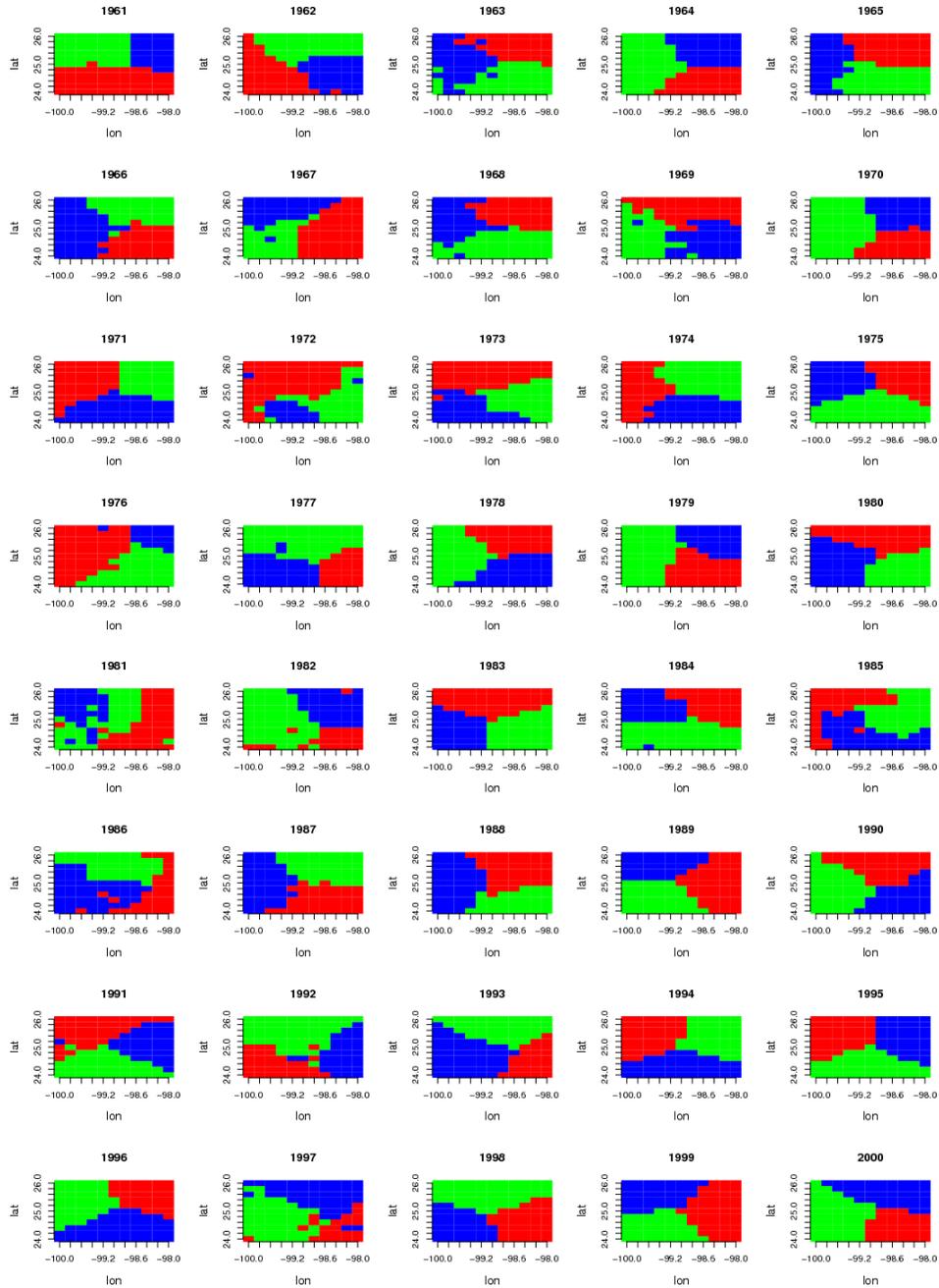
A.1.3 Distribución de clusters para la zona noroeste en julio.



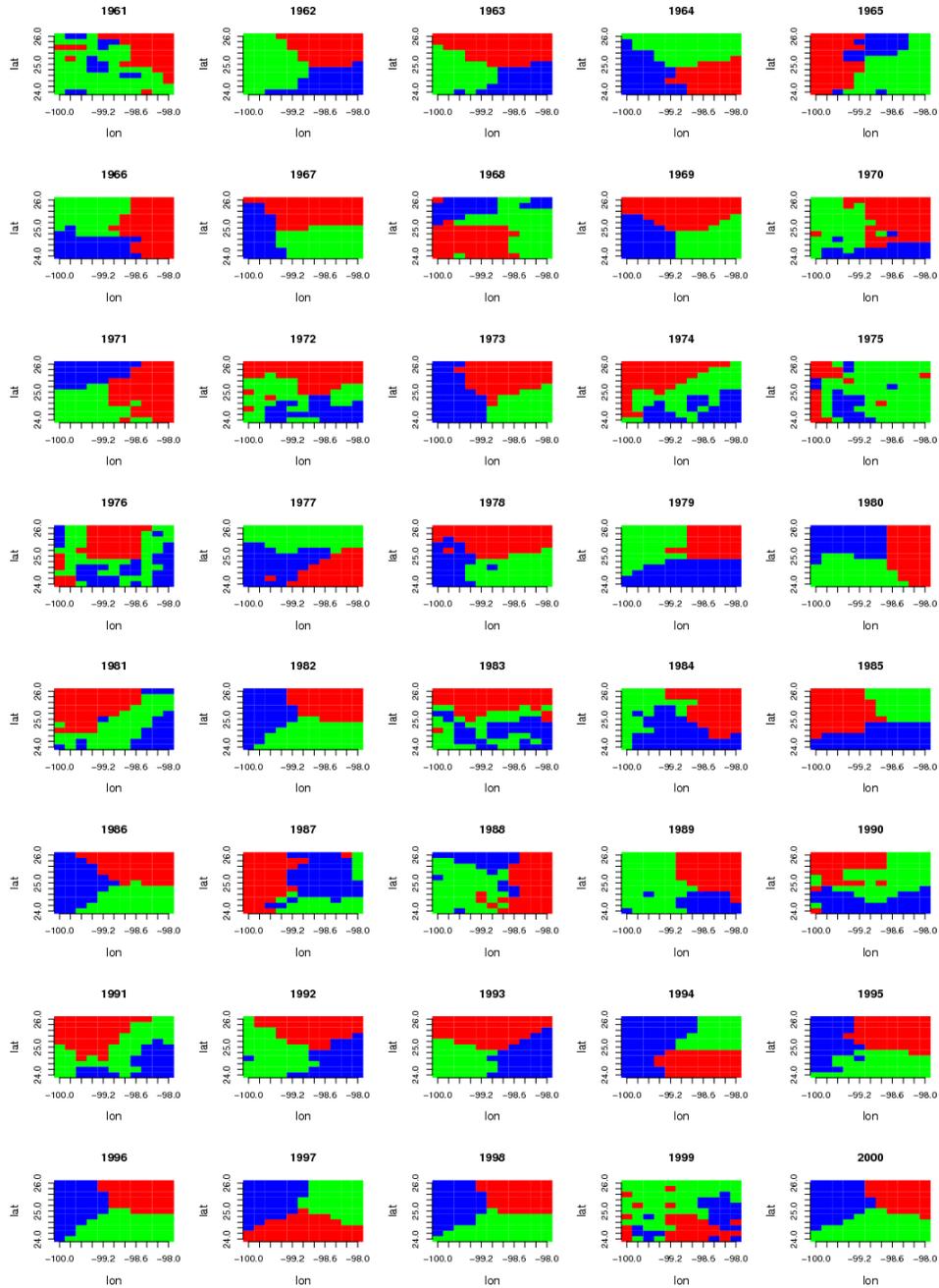
A.1.4 Distribución de clusters para la zona noroeste en octubre.



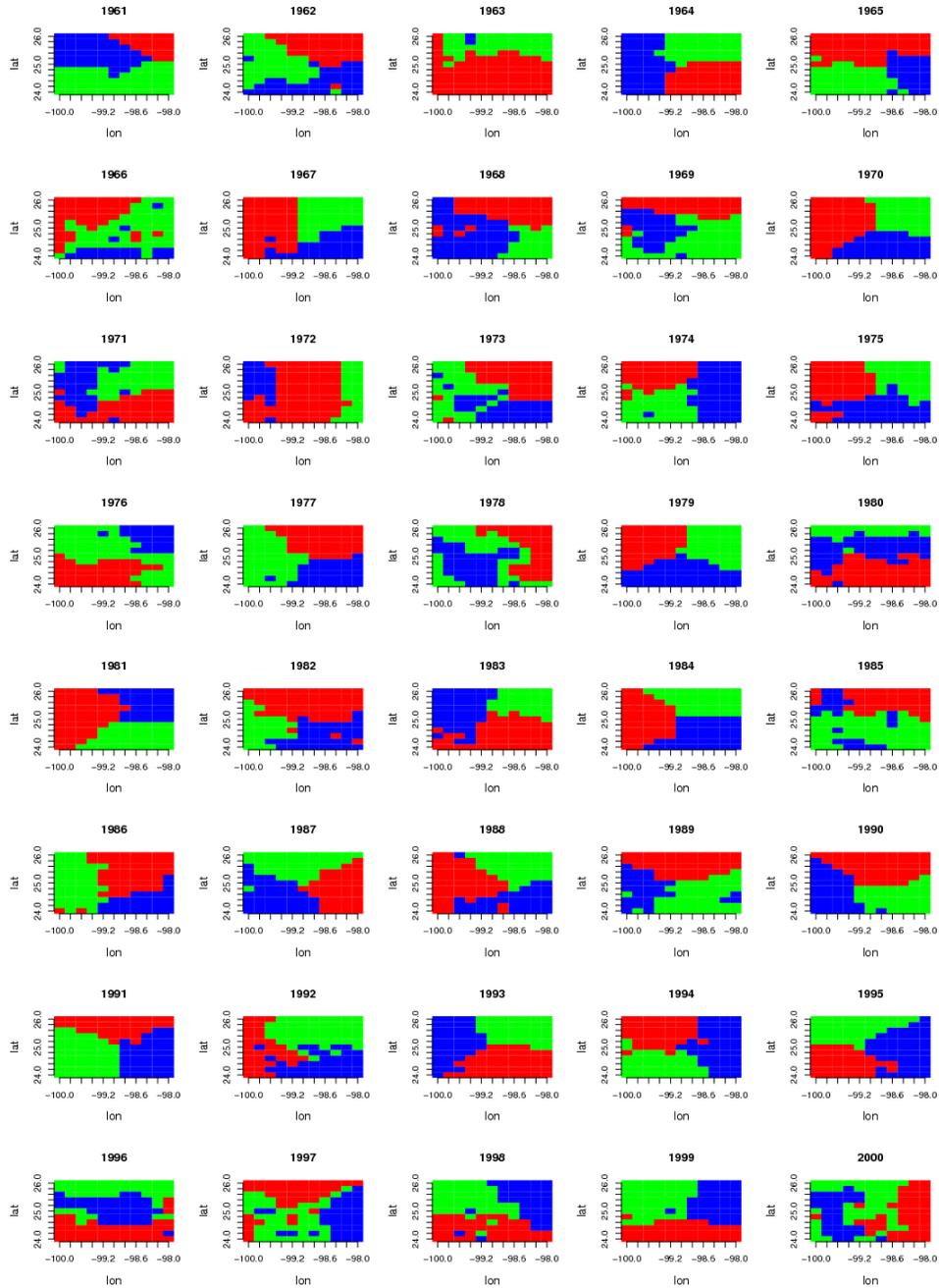
A.2.1 Distribución de clusters para la zona noreste en enero.



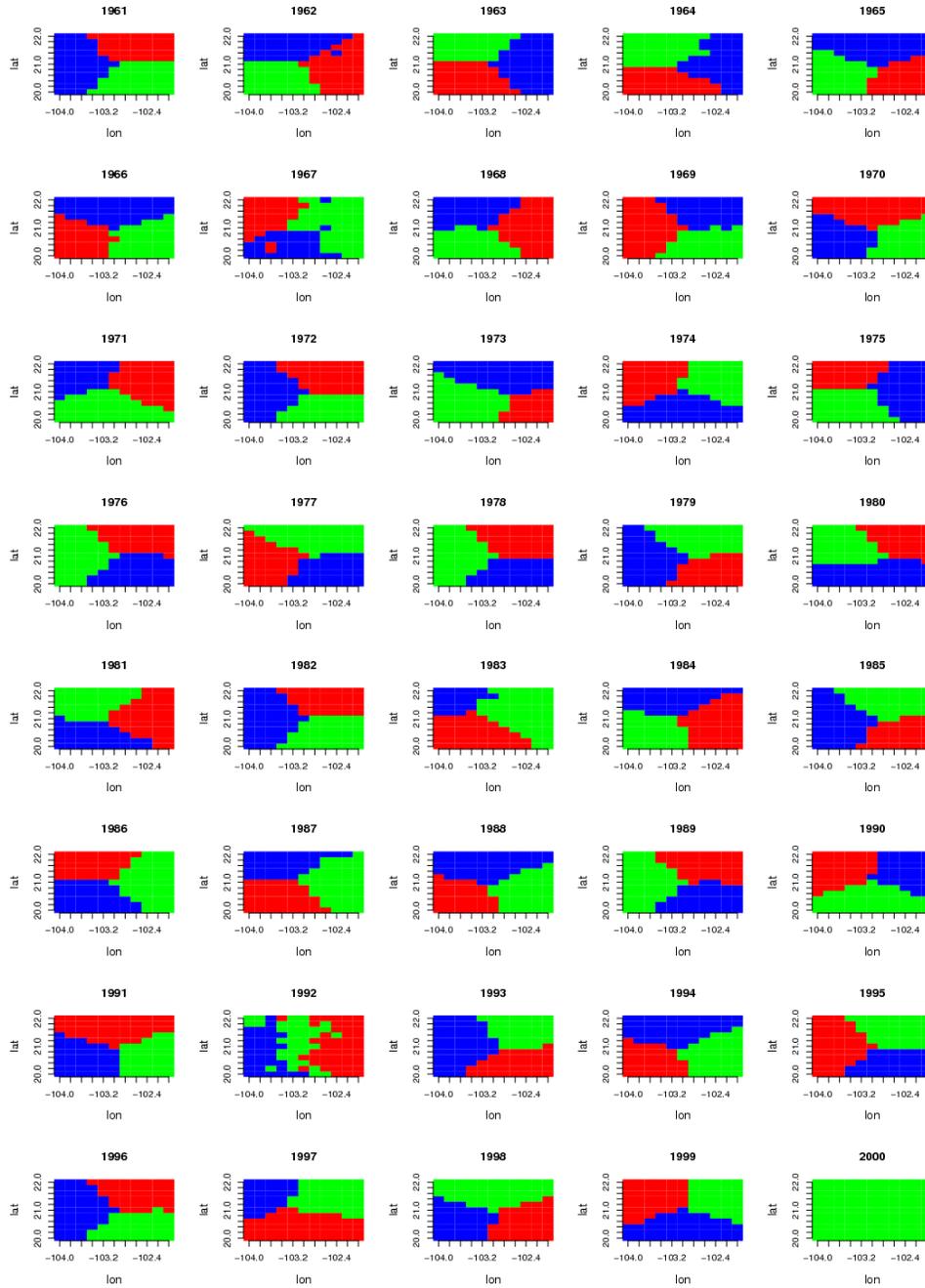
A.2.2 Distribución de clusters para la zona noreste en abril.



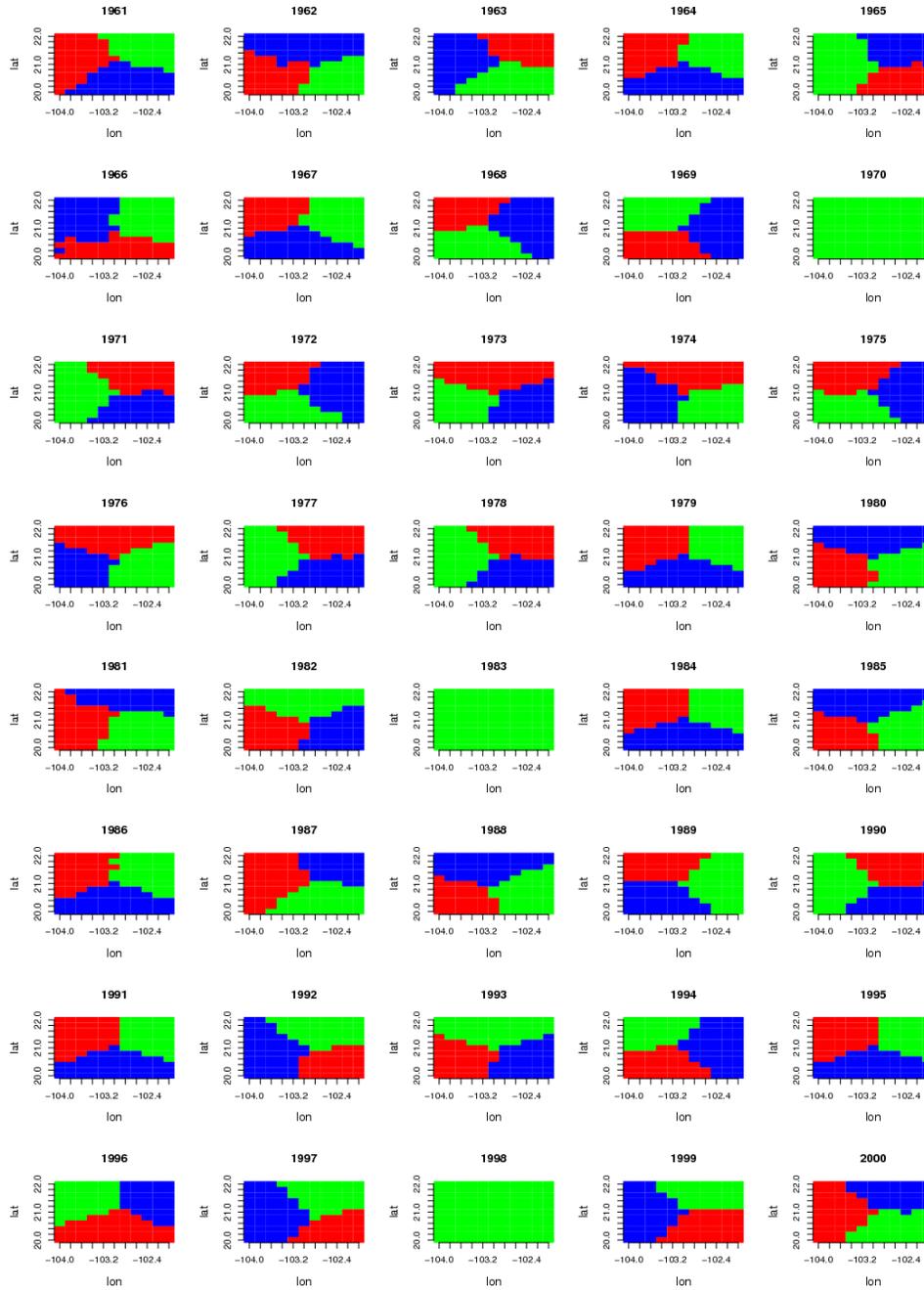
A.2.3 Distribución de clusters para la zona noreste en julio.



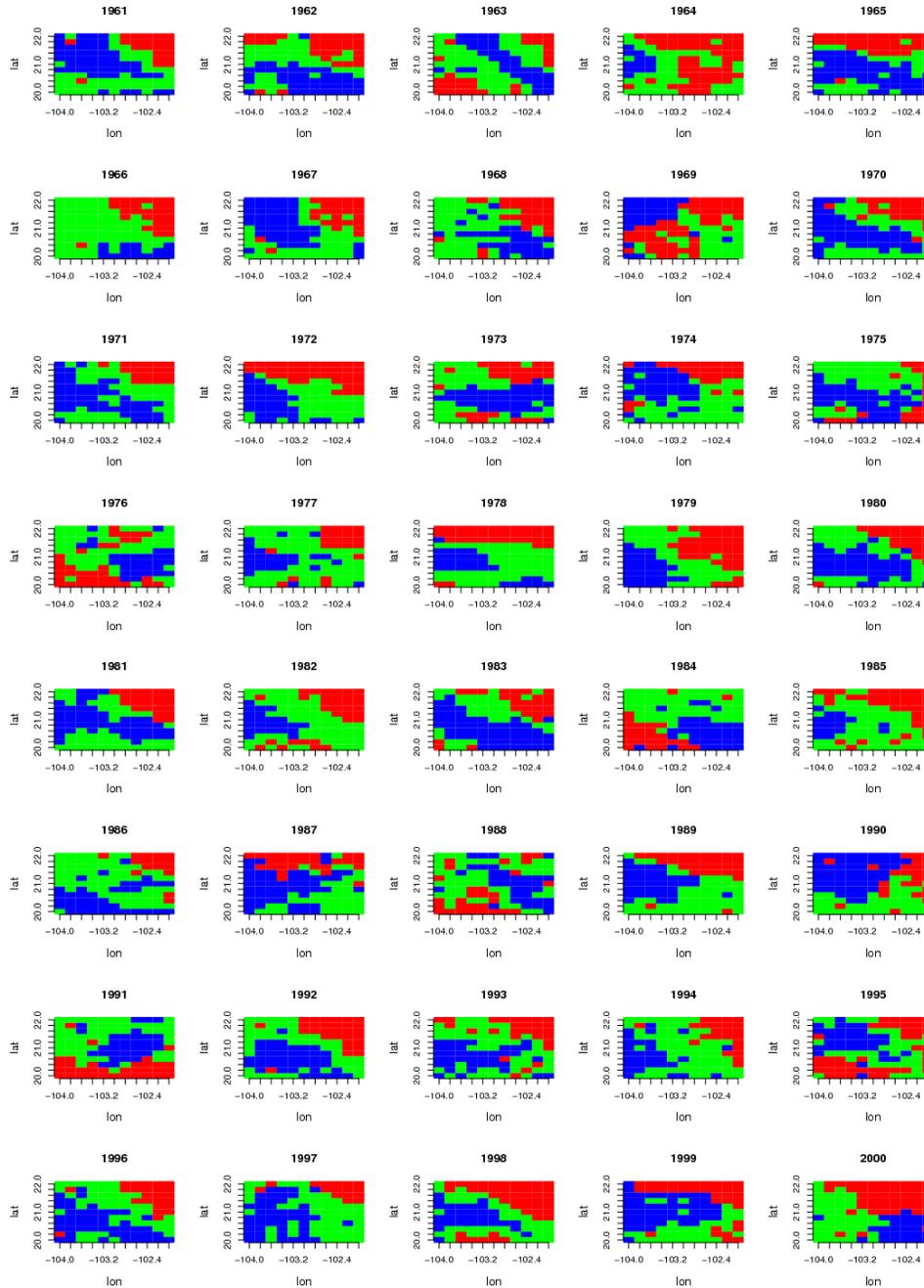
A.2.4 Distribución de clusters para la zona noreste en octubre.



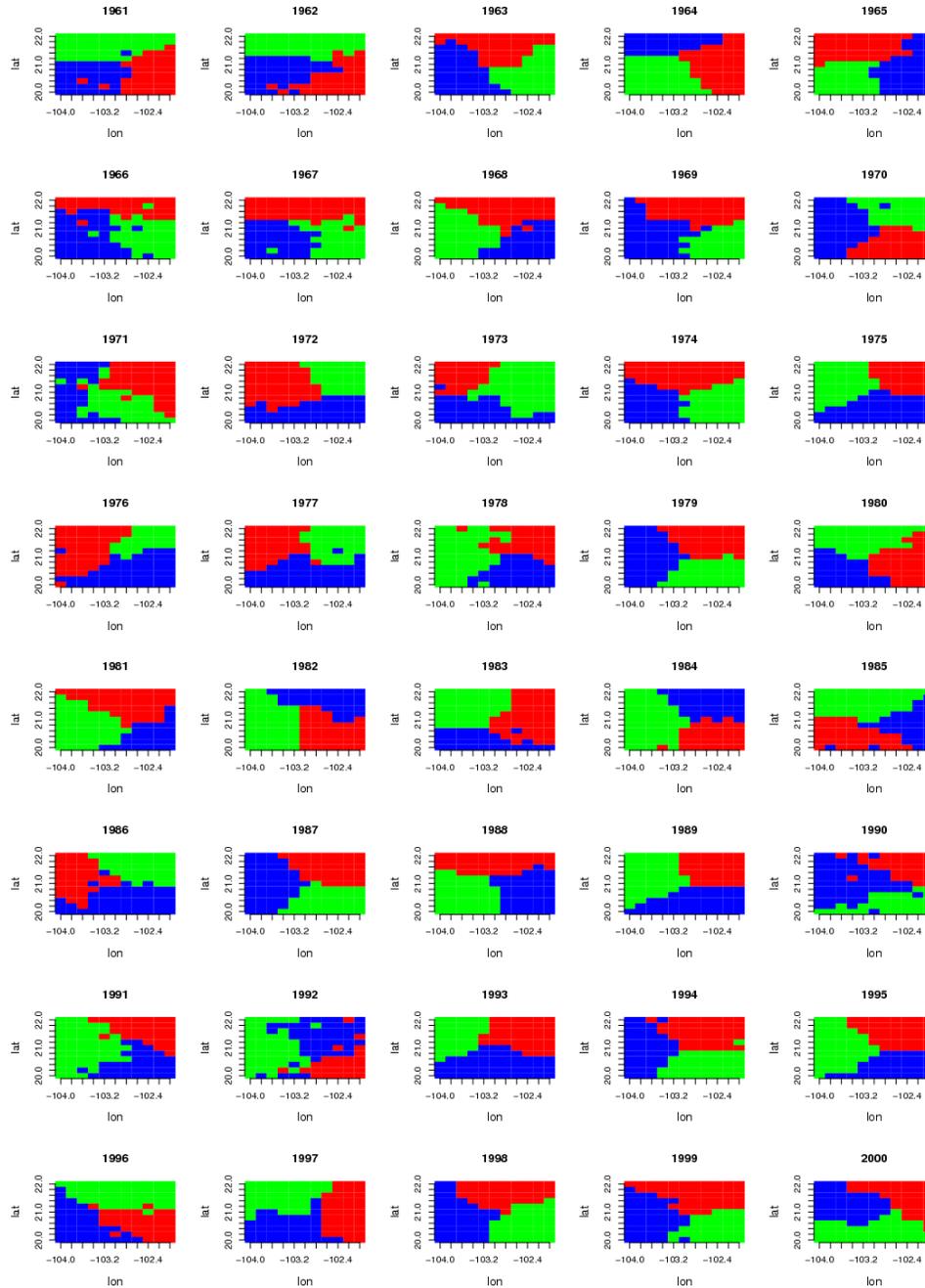
A.3.1 Distribución de clusters para la zona occidente en enero.



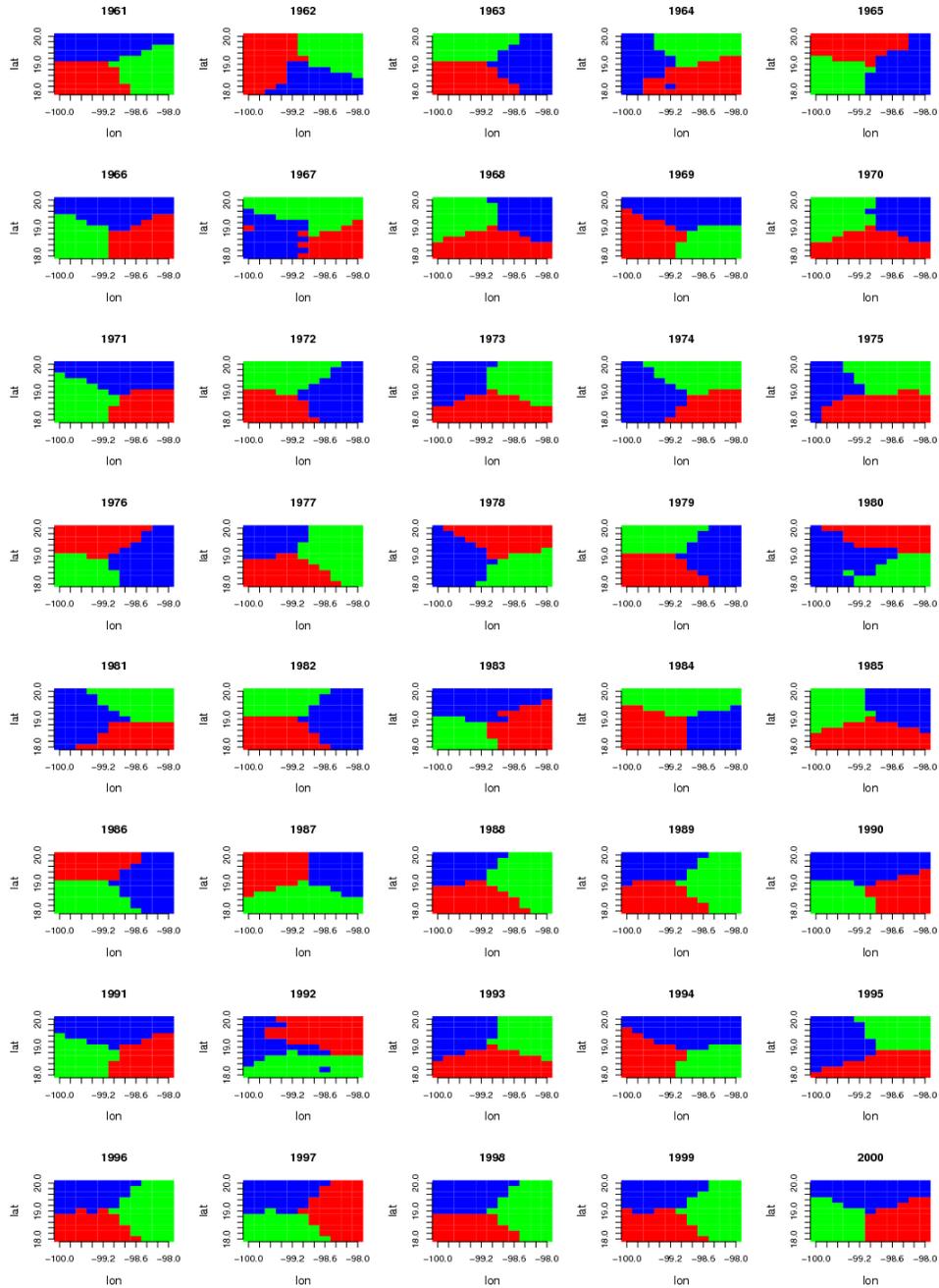
A.3.2 Distribución de clusters para la zona occidente en abril.



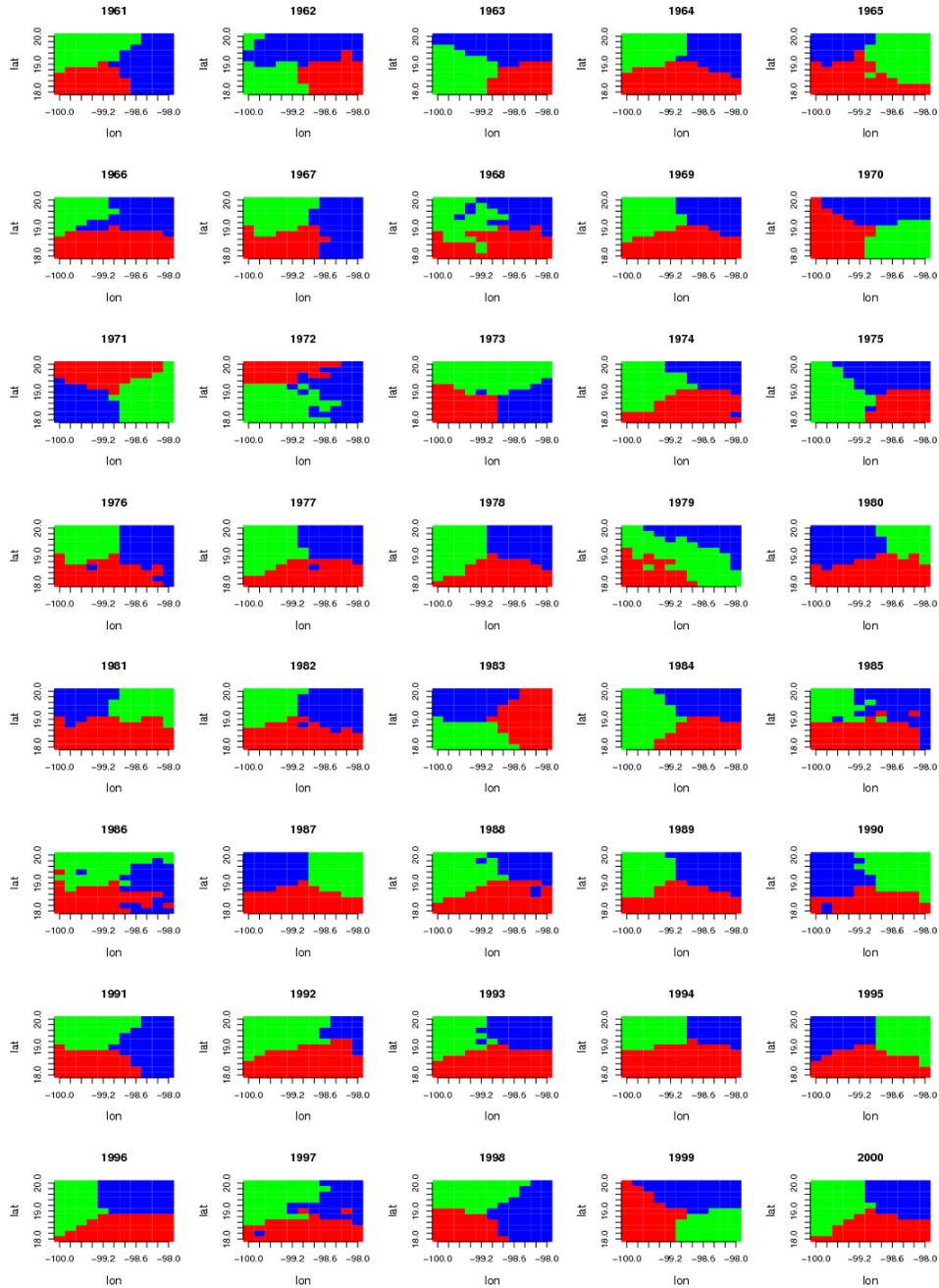
A.3.3 Distribución de clusters para la zona occidente en julio.



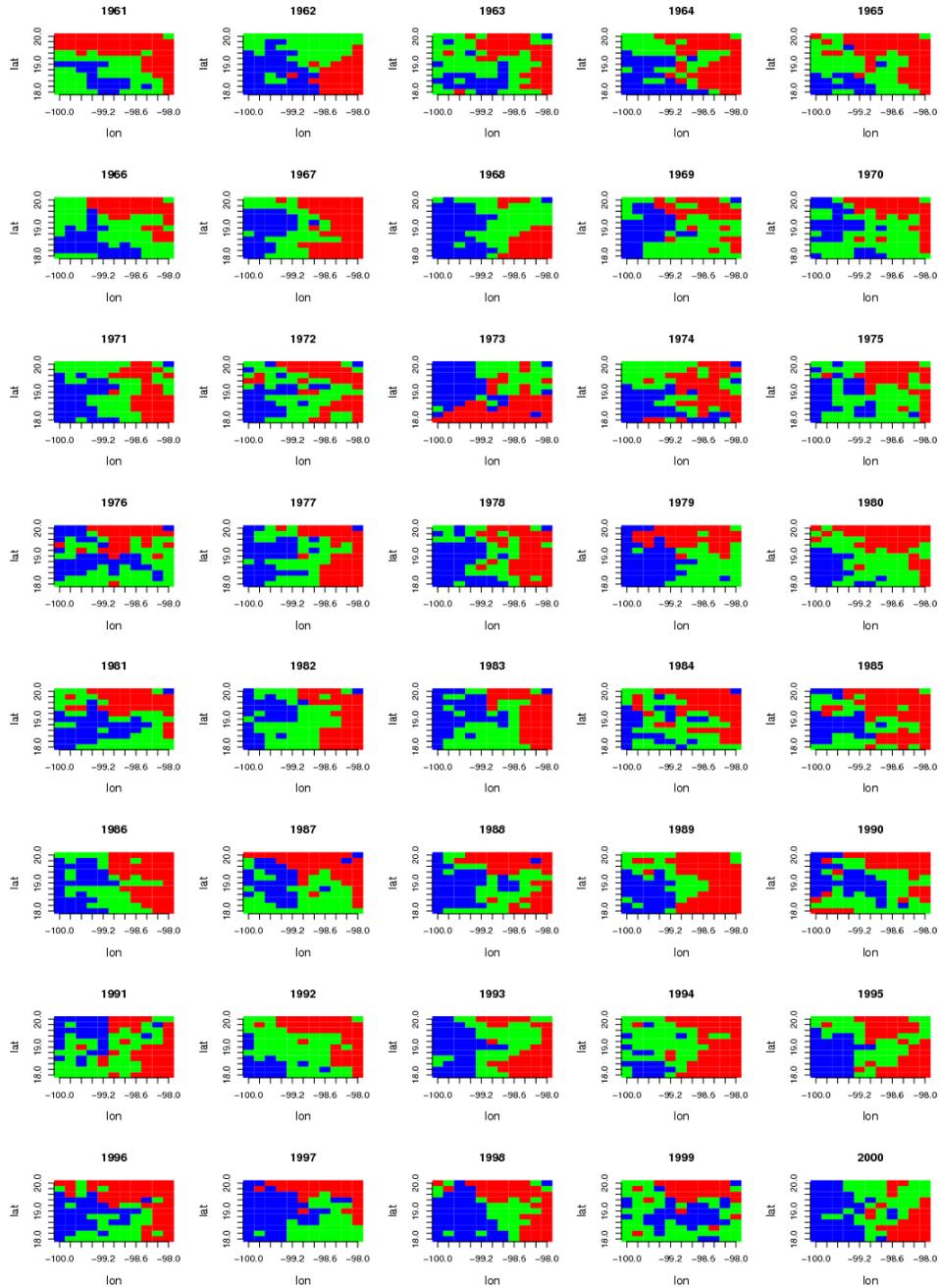
A.3.4 Distribución de clusters para la zona occidente en octubre.



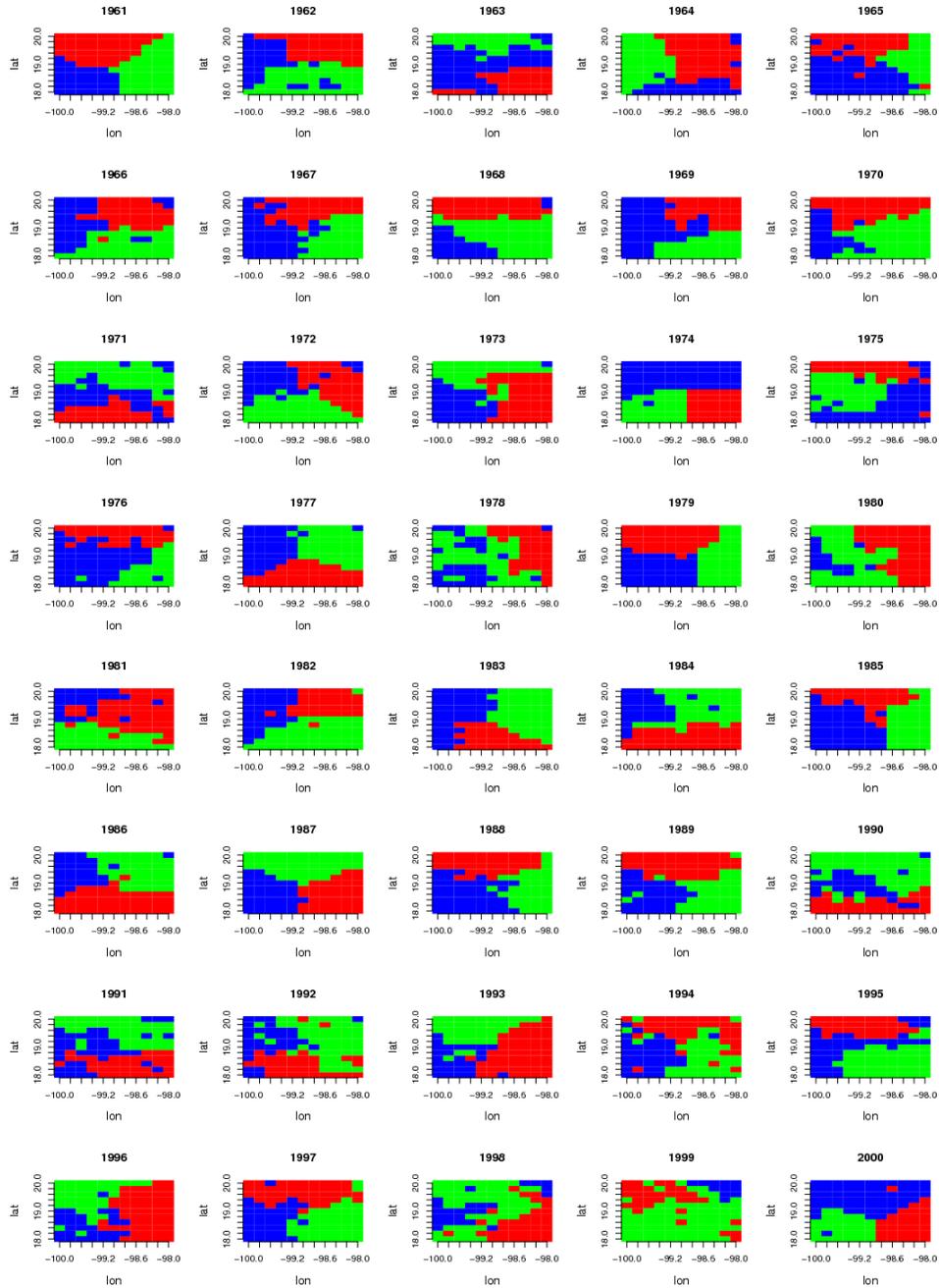
A.4.1 Distribución de clusters para la zona centro en enero.



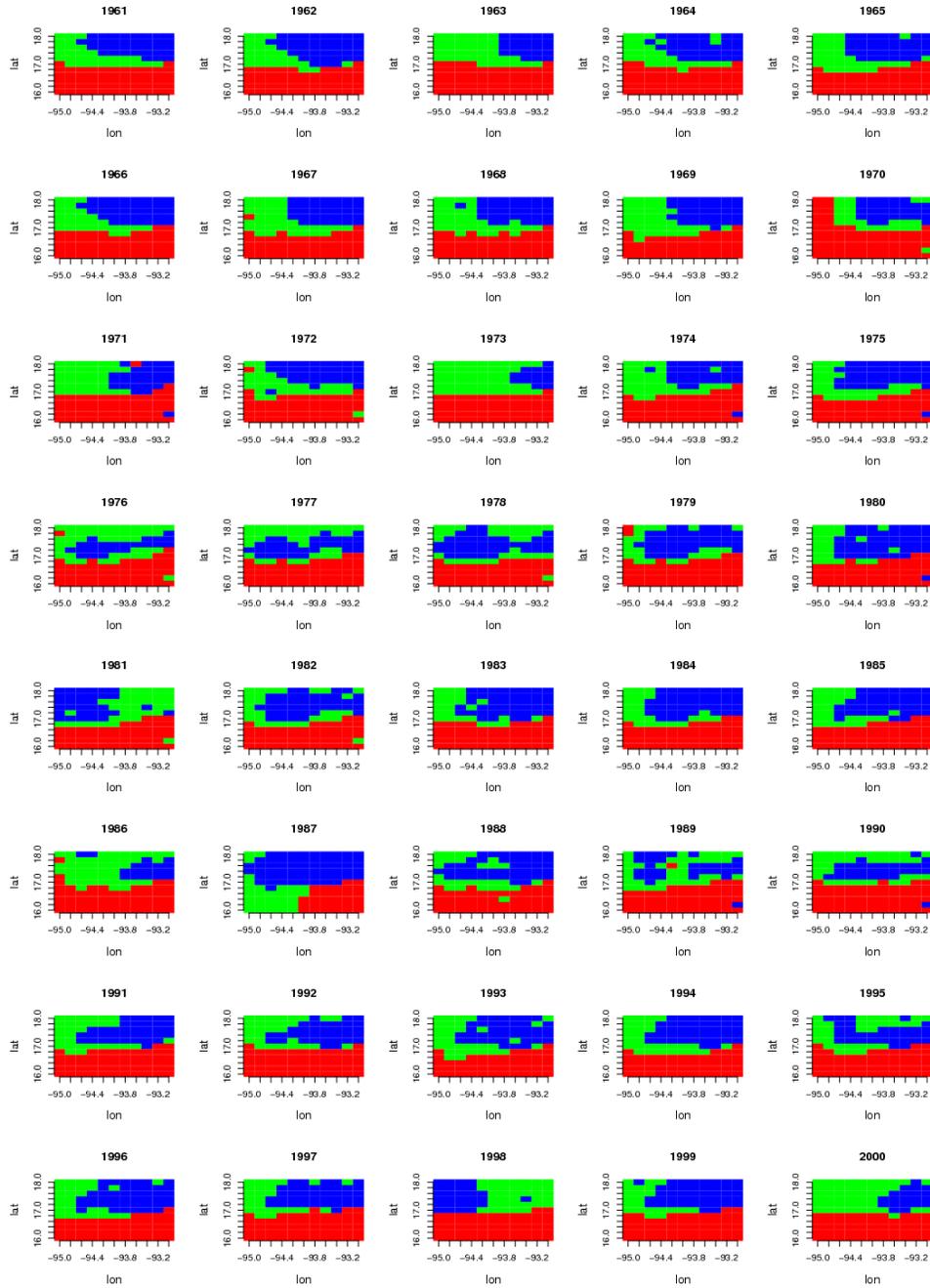
A.4.2 Distribución de clusters para la zona centro en abril.



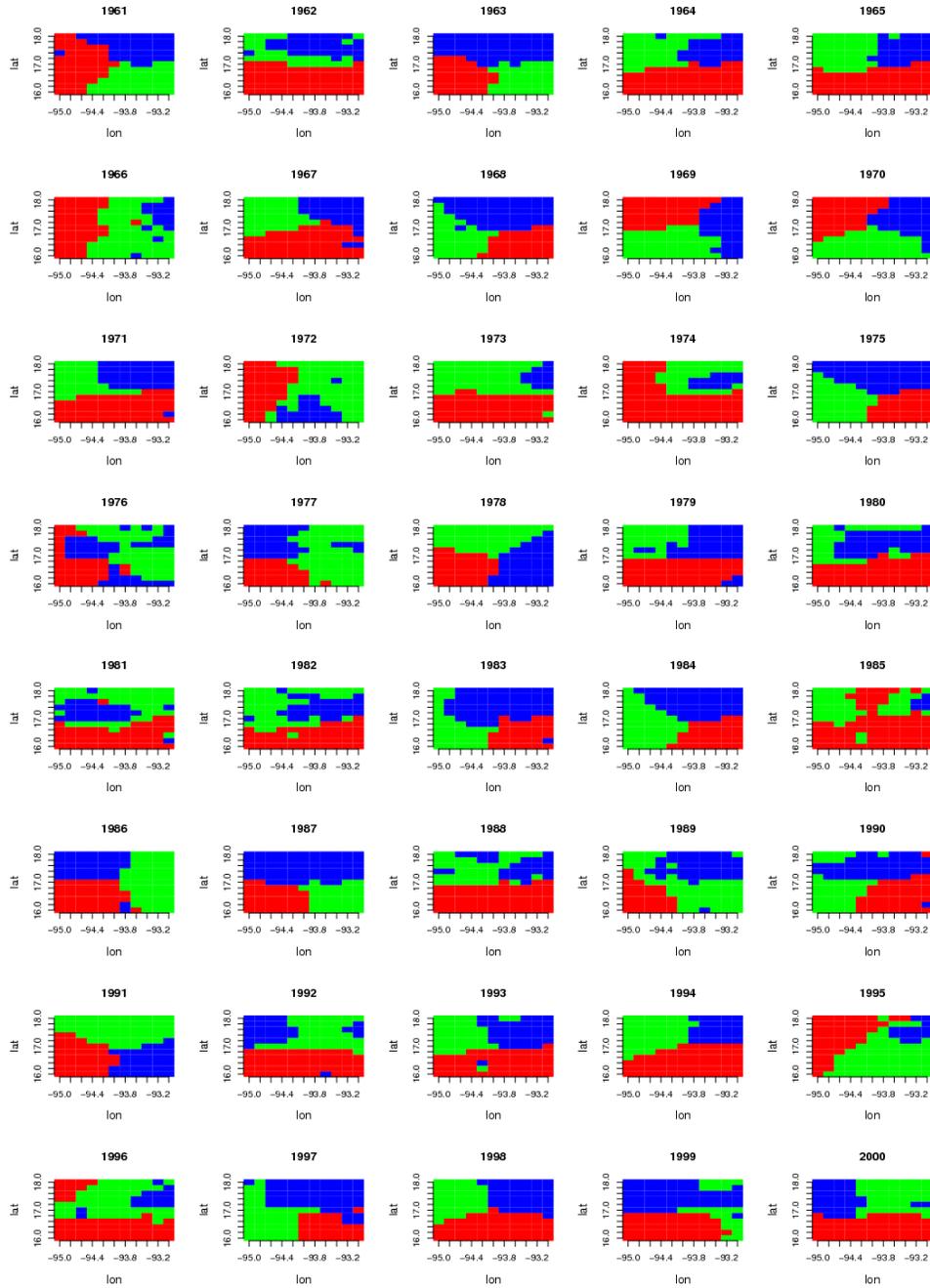
A.4.3 Distribución de clusters para la zona centro en julio.



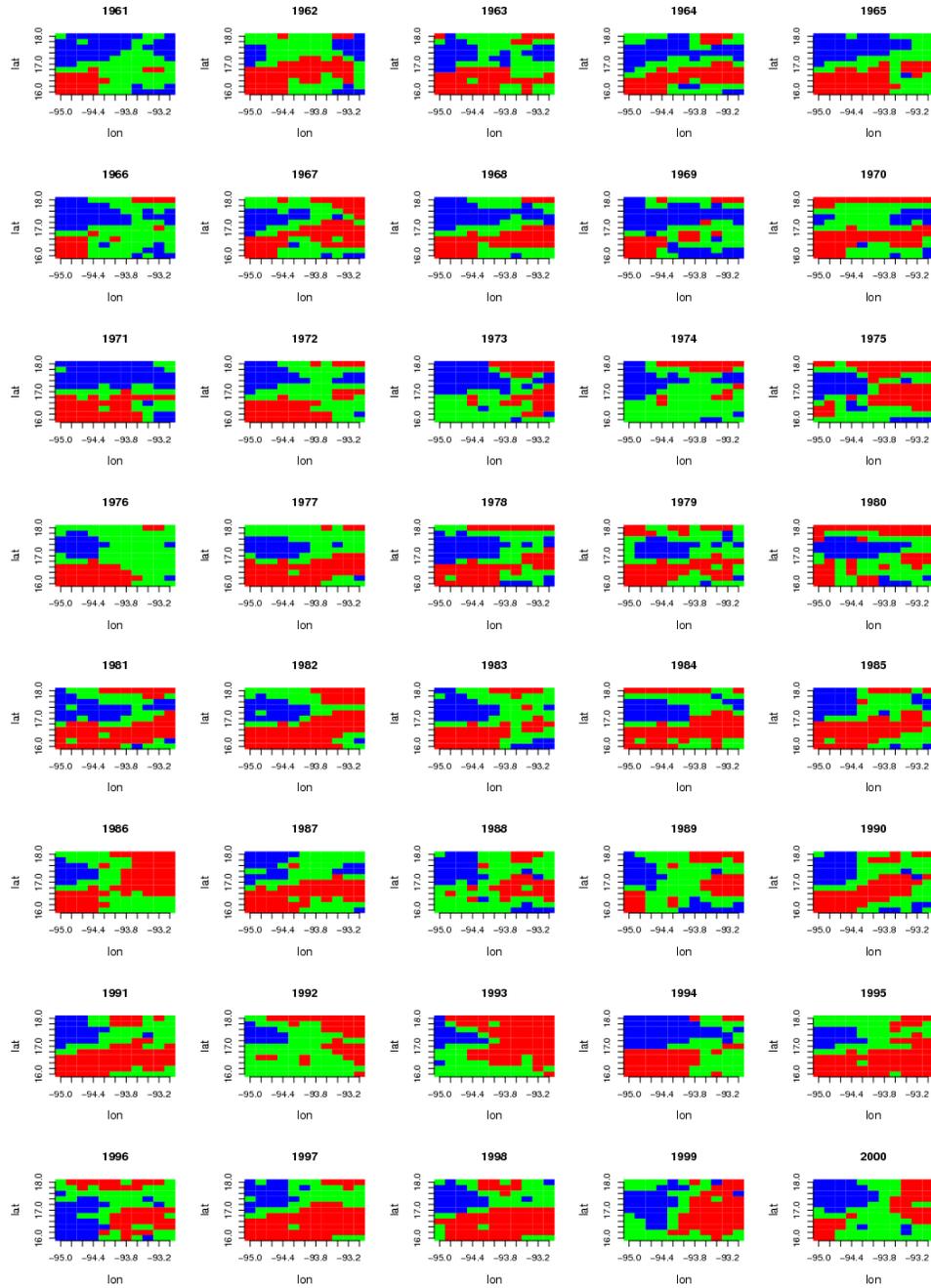
A.4.4 Distribución de clusters para la zona centro en octubre.



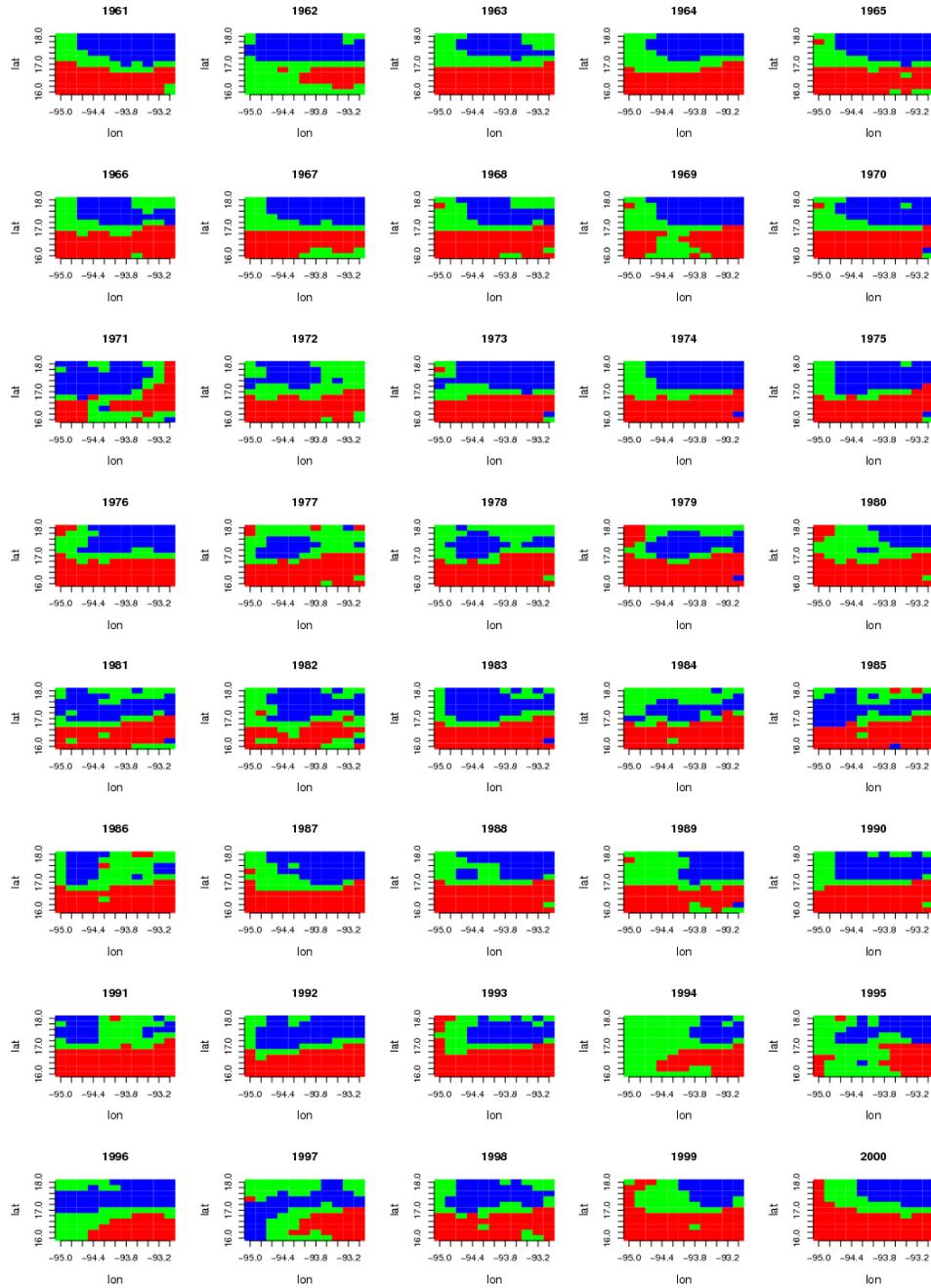
A.5.1 Distribución de clusters para la zona sur en enero.



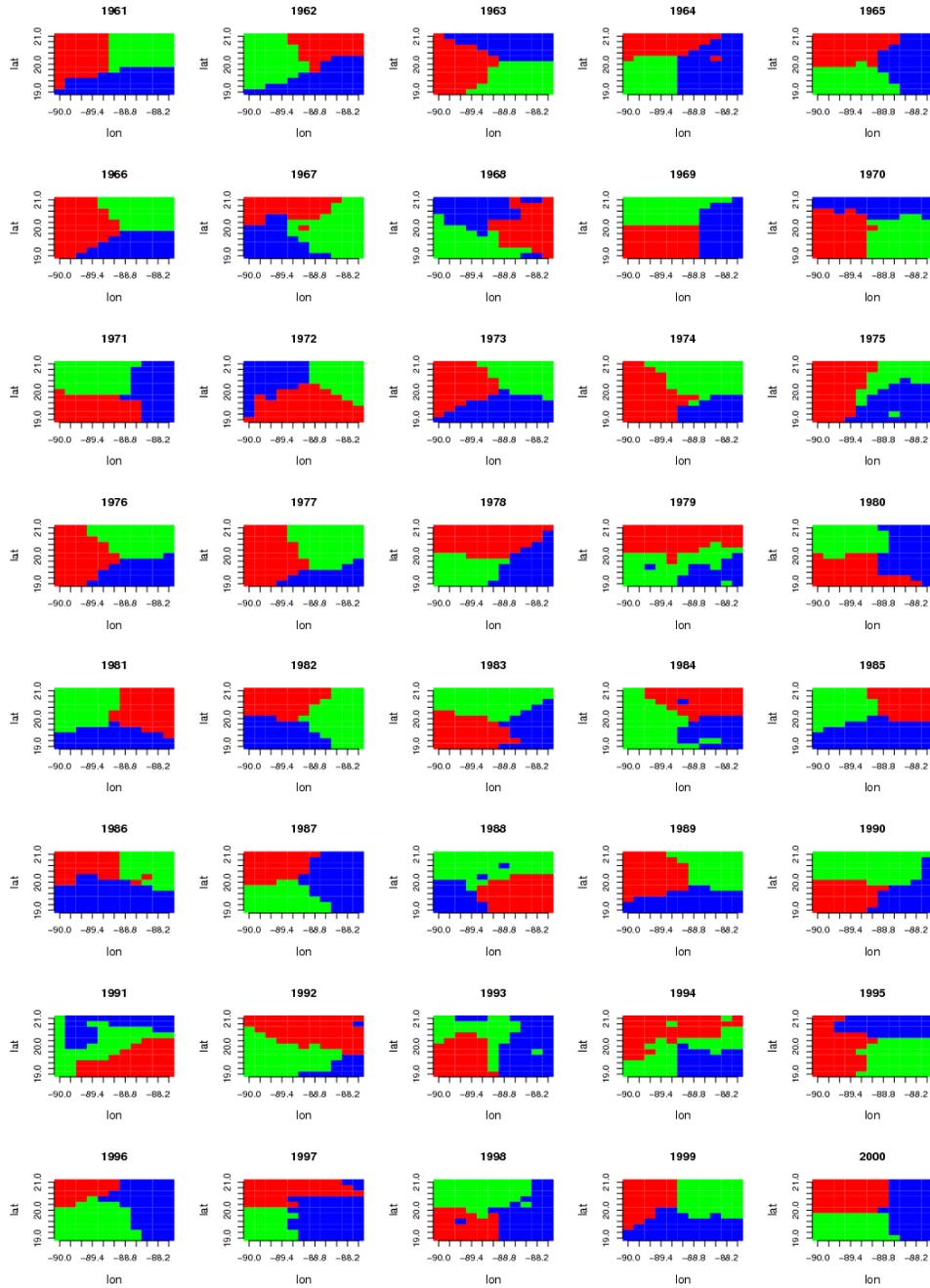
A.5.2 Distribución de clusters para la zona sur en abril.



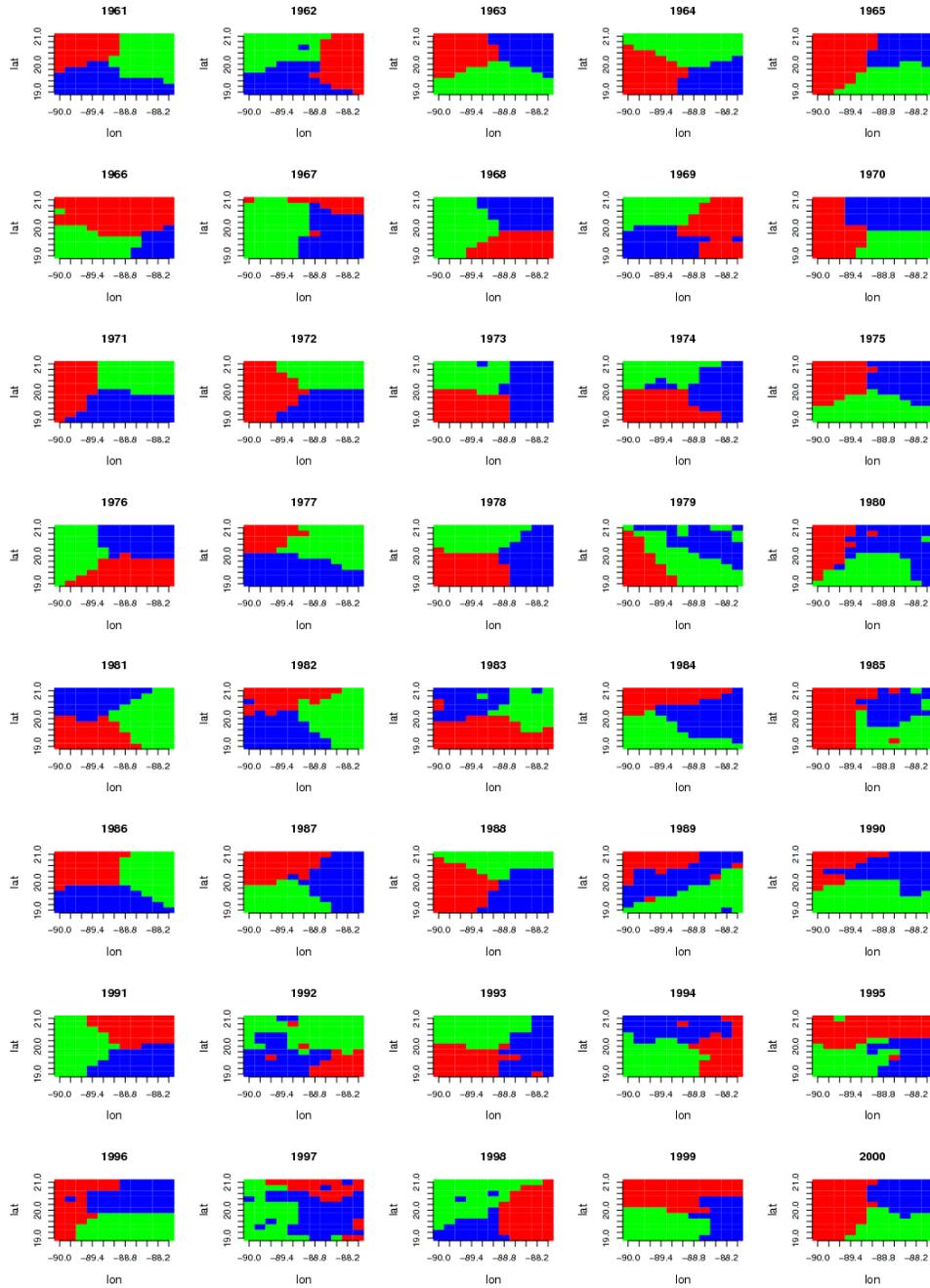
A.5.3 Distribución de clusters para la zona sur en julio.



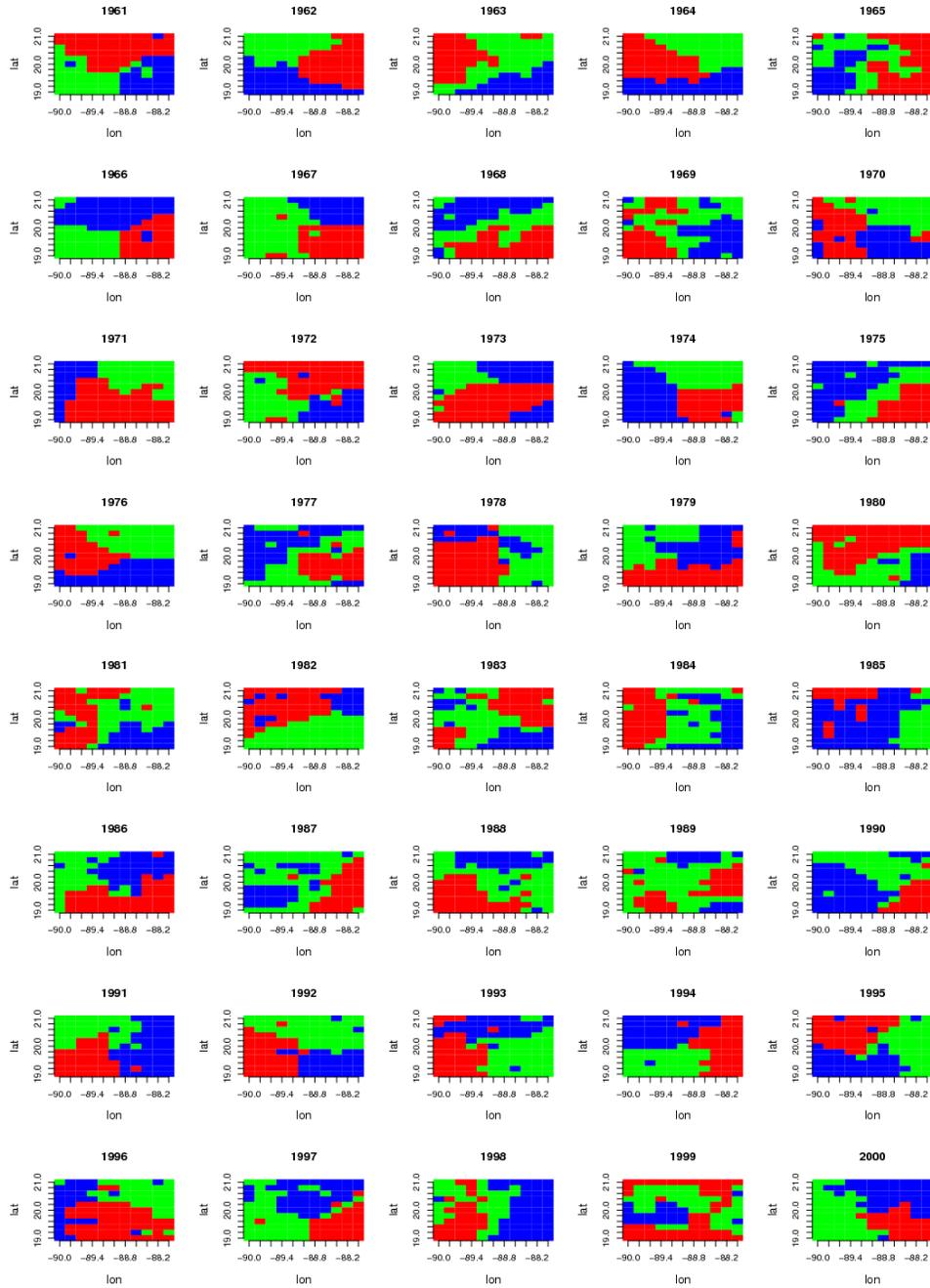
A.5.4 Distribución de clusters para la zona sur en octubre.



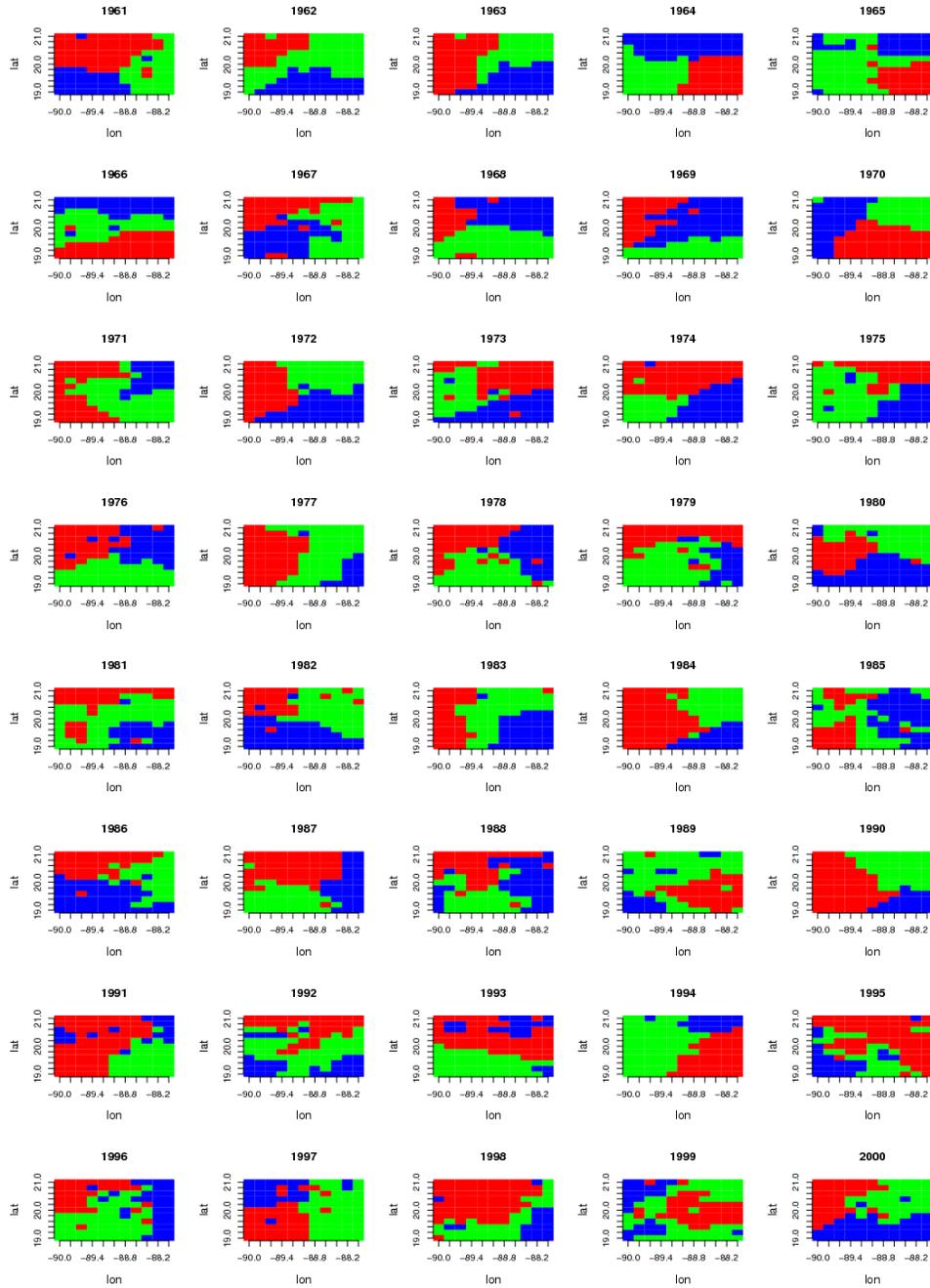
A.6.1 Distribución de clusters para la zona sureste en enero.



A.6.2 Distribución de clusters para la zona sureste en abril.



A.6.3 Distribución de clusters para la zona sureste en julio.



A.6.4 Distribución de clusters para la zona sureste en octubre.

4 MÓDULO DE TENDENCIAS DE VALORES EXTREMOS ASOCIADOS A HURACANES Y EL NIÑO

4.1 Parte I. Vientos Máximos de Ciclones Tropicales del Atlántico (VM-CT): Una Revaluación de Análisis de Valores y su Escala A Largo Plazo Oscilaciones & Tendencias para el Caribe y Golfo de México.

4.1.1 Resumen

Un método de reconstrucción histórica es aplicado para la definición probabilista de velocidad de viento máximo debido a ciclones tropicales (CT) en el Caribe y Golfo de México (CGM). Usando un modelo fluido dinámico actualizado, la historia de los ciclones tropicales es primero reconstruida por lugares distribuidos sobre la región CGM desde la información de trayectorias e intensidades. Luego, un tratamiento probabilista permite una estimación de la velocidad de viento máximo asociado con diferentes periodos de retorno, usando distribuciones de probabilidad. Resultados previos de este modelo de reconstrucción histórica son similares a los obtenidos de métodos más elaborados en las áreas costeras de México y E.U. Sin embargo, estos vientos reconstruidos muestran velocidades más altas para áreas propensas a CT. La modelación ha sido triplemente exitosa usada como parte de un gran esquema de computación para mejorar las predicciones del viento en las costas de México. Estimaciones resultantes de velocidades de viento máximo de CT para diferentes probabilidades de excedencia, y el análisis de sus tendencias a largo plazo como las oscilaciones multidecenales sobre el CGM son presentadas.

4.1.2 Introducción

Fuertes vientos asociados con ciclones tropicales son la causa de daños considerables a la vida y propiedad de áreas costeras de CGM. Para reducir este daño sin incurrir en costos excesivos, diseñadores de edificios y otras estructuras, y además los analistas de seguros usan métodos probabilísticos para los cuales la información de las velocidades máximas del viento ciclónico es una necesidad. Un número de estudios han sido realizados con este fin. Sin embargo, los estudios hechos en CGM no cubren toda el área de interés. Por todas estas razones un proyecto de investigación fue iniciado en el IMTA para proporcionar la información necesaria para la evaluación del análisis de riesgo para la velocidad del viento de CT en el área de CGM. Se presentan en este artículo, los antecedentes, las bases y la actualización del procedimiento de modelado histórico, sus resultados y sus implicaciones de largo plazo.

4.1.3 Antecedentes

En 1971, Russell obtuvo la velocidad del viento máximo para el Puerto de Aransas, Texas a través de simulación probabilística [1]. Este método además ha sido recientemente aplicado en otras partes de E.U., Australia y Asia [2-5]. Este método de simulación

requiere un conocimiento de distribución de probabilidad de las variables las cuales caracterizan el fenómeno y necesita consecuentemente una base de datos muy completa. Esta puede ser encontrada en estudios tales como los hechos por Ho et al (1975)[6].

En 1981, 1990, y 2006 el Instituto de Investigaciones Eléctricas, IIE) en Cuernavaca, México inició dos programas de investigación para proveer información para el diseño de líneas de transmisión eléctrica y torres, estructuras generales, respectivamente, contra los efectos de CT y otros vientos. Tres estudios fueron hechos de la información disponible de velocidades de viento extremo en México [7-9], los cuales resultaron en mapas de isotacas para diferentes periodos de retorno. El último mapa obtenido para 50 años de periodo de retorno mostrado en la **Figura 4.1**.

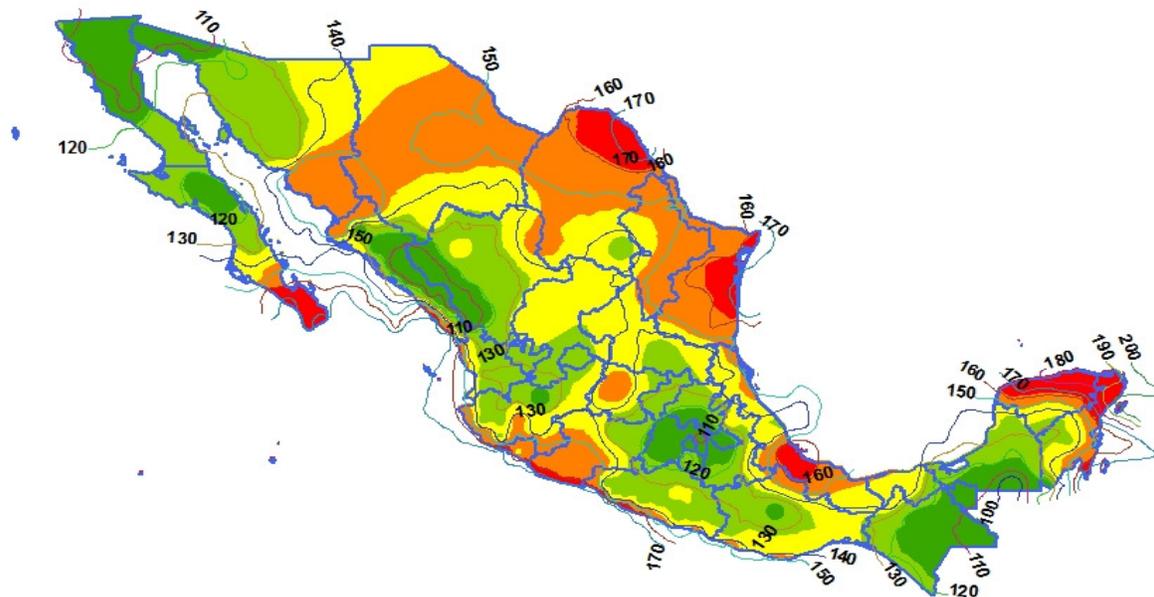


Figura 4.1 Ráfagas de velocidad de Viento [km/hr] para un period de retorno de 50 años actualizado en 2006, cortesía de IIE.

Estos estudios desarrollados fueron basados en un método de reconstrucción histórica propuesto por Sánchez-Sesma en 1985, para estimar la velocidades de viento máximo de CT. Los resultados de este método fueron publicados por Sánchez -Sesma et al. 1988 [11], (de ahora SS-88), a lo largo de la costa de Estados Unidos, dando resultados similares a esos obtenidos en 2 esfuerzos de investigaciones previas, que emplearon simulación probabilística de campos de viento de CT. En lo que concierne al trabajo de Batts et al (1980) [2], el promedio de desviación para los 100 (2000) años de periodo de retorno es de 0.2% (1.8%), el promedio de las diferencias absolutas es de 7.1% (8.3%). En el caso de resultados obtenidos por Georgiou et al 1983[3], los valores son -3.2%(-2.6%), 7.5%(7.9%) respectivamente. Sin embargo, el máximo desacuerdo (con diferencias absolutas cerca del 30%) aparecieron en lugares donde la actividad de CT ha sido más grande durante las últimas décadas como Miami, y Nueva Orleans. Podría ser

notado que en los puntos de máximo desacuerdo, el método de reconstrucción histórica provee los valores más conservadores.

Tomando en cuenta todos estos factores, un proyecto de investigación para evaluar los valores, tendencias y oscilaciones del riesgo asociado con las velocidades de viento de CT sobre el área de CGM basado en reconstrucción histórica de campos de viento de CT, como el propuesto por SS-88, es descrito en este reporte. También se proporciona una perspectiva multidecadal de la actividad de CT, sus vientos máximos, y sus implicaciones climáticas y meteorológicas.

4.1.4 Datos y métodos

Una descripción de los datos, aspectos de la dinámica de los fluidos, modelos estadísticos y los procesos de calibración son presentados a continuación:

Trayectorias Históricas e intensidades

El Centro Nacional de Huracanes de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NHC/NOAA) por sus siglas en inglés, desde los años ochenta ha mantenido un archivo sobre los CT del Atlántico Norte. Este archivo, que es llamado HURDAT (Base de Datos de Huracanes), contiene datos, trayectorias, velocidades de viento, y valores de presión central (si están disponibles) para todos los CTs que han ocurrido desde 1851 [12].

Un aspecto importante para ser tomado en cuenta son las recomendaciones de la documentación de la base de datos original [12] y la documentación del reanálisis [13,14] de que algunos CT no se encontraron antes del siglo XIX. En particular, Landsea et al. (2004) [14] estimó una tendencia de 0–6 CTs “No Contados” por año entre 1851 y 1885 y 0–4 cuatro por año entre 1886 y 1910. Como Landsea, 2006 [15] ha precisado: Estos CTs “No Contados” toman en cuenta crudamente el tamaño típico de CT, la densidad de trayectorias de barcos sobre la base del Atlántico, y la cantidad de población en la línea costera, pues mientras uno retrocede más en el tiempo, los números de barcos y rutas de navegación decrecen y menos gente vive en las regiones costeras tropicales y subtropicales.

Aunque, son innegables todos estos factores que afectan la base de datos HURDAT, que hace que algunos de los CT muy probablemente no fueran contados conforme se retrocede en el tiempo examinado, HURDAT proporciona información valiosa de los principales eventos que afectaron las mayores y más viejas áreas pobladas en el Caribe durante la última centuria y media. En este trabajo vamos a evaluar tendencias de largo plazo y oscilaciones, y el análisis comparativo de VM en el área de CGM que sólo podrían estimarse a través de HURDAT.

Modelo Fluido Dinámico

El modelo fluido dinámico el cual ha sido desarrollado en base a estudios previos [16-19], puede ser descrito como sigue.

Usando el balance radial de presión and fuerza centrífuga,

$$\frac{V_g^2}{r} + \left(f - \frac{V_t \cdot \text{sen } \beta}{r}\right) V_g - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

una expresión para el viento gradiente es obtenida,

$$\quad (2)$$

donde:

$$k = f - \frac{V_t \cdot \text{sen } \beta}{r} \quad (3)$$

$$V_c^2 = \rho^{-1} (P_n - P_0) r_n \exp(-r_n^{-D}) \quad (4)$$

Donde, V_g es el viento gradiente, V_c es el viento ciclostrófico, V_t es la velocidad de traslación del sistema ciclónico, P es la presión atmosférica, r_n es el radio normalizado r/R_{max} , β es una medida de ángulo, desde el centro del huracán en giro anticiclónico, de el sitio de interés con respecto al del movimiento del huracán. En el punto de viento máximo, es,

$$\beta = \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

El radio en el cual la velocidad máxima del viento ocurre en el exponente D, están dados por las relaciones siguientes las cuales son obtenidas de el trabajo de Vickery y Twisdale, 1995a [20], y Vickery et al, 2000a [21].

$$R_{max} = \exp(2.636 - 0.00005086 \cdot (dP)^2 + 0.0394899 \cdot L) \quad (6)$$

$$D = 1.38 + 0.00184 \cdot dP - 0.00309 \cdot R_{max} \quad (7)$$

Donde R_{max} es expresado in kilómetros, D es adimensional, dP es la diferencia de presión en milibares, y L es la latitud geográfica.

El radio del viento gradiente fuera de la capa superficial a la velocidad del viento en superficie esta dado por la siguiente relación [17]

$$H = \frac{V_s}{V_g} = 0.64 + \exp\left(-r_n - \frac{0.56}{r_n}\right) \quad (8)$$

Modelos probabilísticos

Una probabilidad de distribución fue considerada por el presente estudio [22, 23], el tipo I de valores extremos, o Gumbel.

$$P(V > \hat{V}) = \exp \left[- \exp \left(\frac{V - \mu_I}{\sigma_I} \right) \right] \quad (9)$$

Donde P representa la probabilidad que la velocidad del viento máximo \hat{V} , es menor que el valor calculado V. Para el propósito de análisis estadístico estas distribuciones de probabilidad son reducidas a expresiones lineales mediante convenientes transformaciones. La técnica de mínimos cuadrados es usada para ajustar una línea recta representada por y(x) para los datos disponibles. Los valores de los parámetros son encontrados por el mejor ajuste. Un coeficiente de correlación es además determinado para estimar la calidad de la línea recta ajustada.

Procedimiento de reconstrucción histórica

Dos pasos principales están implicados en el cálculo: 1) Del registro de historias de ciclones tropicales sobre el mar, una evaluación de la velocidad viento máximo en superficie es hecha en los puntos costeros de interés. 2) La distribución de probabilidad es ajustada de acuerdo a la información evaluada.

Información de más de 85 años es deseable, ya que existe un significativo contenido de energía asociado con tales periodos ha sido observados en el espectro de viento ciclónico en estudios previos [24, 25]. Desde luego, la disponibilidad de más información resultaría en una mejor modelación estadística.

Primero la posición, la velocidad de traslación e intensidad para cada hora de existencia de cada ciclón tropical son calculados con HURDAT, la base de datos registrada. Para la interpolación se usan funciones Spline. Con la velocidad máxima se estima el incremento de presión, con el incremento de presión y la latitud se estiman el radio de viento máximo, y el exponente D. Con estos parámetros se calcula el viento ciclostrofico y el viento gradiente. El viento en superficie es estimado con la relación H.

El viento máximo en superficie obtenido corresponde a 10m de altura sobre el mar con un tiempo de promediación de 60 segundos. La dirección del viento en superficie es calculado de la ecuación (6). Para evaluar su equivalente sobre terreno tipo 2, y para un tiempo de promediación de una hora un factor de multiplicación de 0.675 es usado. Este factor ha sido deducido de el trabajo de Simiu y Scanlan, 1986 [22] y Davenport, 1978 [26]. Con todo este procedimiento, los valores máximos anuales del viento ciclónico en superficie para diferentes direcciones pueden ser obtenidos y almacenados.

Calibración

El modelo fluido dinámico simple propuesto no necesita reproducir con precisión, en un punto específico de la costa, los vientos debidos a cada uno de los huracanes que han afectado. Sin embargo, después del modelaje estadístico, los resultados del modelo simple en predicciones de valores y tendencias, son razonablemente buenos en general. Estos resultados por lo tanto deben de ser similares a aquellos obtenidos de otros métodos alternativos más complejos.

Las predicciones de viento ciclónico finales serán hechas basadas en la reconstrucción modelada y además en la información costera la cual ya fue influenciada por la topografía y la interfaz tierra – mar. Además, los datos de CT medidos sobre el mar han sido usados para reforzar tendencias y valores, y a través de su interpolación proveer datos de huracanes para áreas por las cuales no existen mediciones disponibles.

Otro tipo de fuentes de información son las estaciones de primera clase de las costas, las cuales son mantenidas por el servicio meteorológico nacional en la región CGM. No solo las velocidades de viento máximo registrado son necesitadas sino también su dirección, tiempo de ocurrencia, condiciones del terreno circundante (rugosidad), y características de sistemas de medida y localización sobre el nivel medio del suelo. Estas variables son necesitadas para un proceso de homogenización y comparación con los vientos reconstruidos.

Descomposición de señales de CT

La señal de CT, puede ser descompuesta en una tendencia no lineal debida al calentamiento global (GW, por sus siglas en inglés) y a las oscilaciones multidecadales (MO, por sus siglas en inglés) asumiendo los siguientes modelos:

$$TC = TC_{GW} + TC_{MO} + e(t), \quad (10)$$

donde,

$$TC_{GW} = \sum_{j=1}^{N_P} [a_j \cdot t^{j-1}] \quad , \quad TC_{MO} = \sum_{j=1}^{N_F} \left[b_j \cdot \text{sen} \left(j \frac{2\pi t}{P} \right) + c_j \cdot \cos \left(j \frac{2\pi t}{P} \right) \right],$$

y donde: TC_{GW} es la componente no-lineal debida a el calentamiento global, TC_{OM} es la serie de Fourier (SF) componente debida a oscilaciones de clima de baja frecuencia a , b , and c , son constantes, t es el tiempo, P es la SF del periodo básico, N_F , y N_P , representa los números de términos polinomial and SF, respectivamente, j es un sub índice. Asumiendo N_F , y N_P , después un proceso de regresión multi-lineal que minimice los errores cuadráticos $e(t)$, los coeficientes a , b y c , y el periodo P , puede ser conjuntamente evaluado.

4.1.5 Resultados y discusión

Reconstrucción Histórica de Velocidades del Viento de CT

Basado en el archivo de CT de trayectorias e intensidades, y usando funciones Spline para la posición, velocidad de traslación e intensidad para cada hora de existencia de cada ciclón que fue calculado. Después con esta información el campo de viento correspondiente es evaluado, y la velocidad y dirección en sitios de interés debe ser archivada para su posterior modelaje probabilista.

Las velocidades máximas del viento debidas a CT sobre el Atlántico Noroeste han sido reconstruidas en más de 3600 sitios del CGM. A través de la aplicación de VELCICT, un algoritmo escrito en FORTRAN, las velocidades anuales máximas omni-direccionales del viento fueron calculadas como primer paso.

Para cada historia reconstruida y calibrada de velocidades del viento de CT sobre los sitios de interés en la región CGM, una probabilidad de distribución extrema ha sido estimada, por un proceso automático con el error RMS mínimo. Con estas de distribuciones de probabilidad de valores extremos, se estimaron los máximos asociados a diferentes riesgos de probabilidad de excedencia.

Calibración

Para calibrar estos resultados empleamos el VM de TC simulados a lo largo de la costa de E.U [2, 5]. Los 48 sitios costeros analizados están separados por 50 millas náuticas a lo largo de la costa del Atlántico, y son mostrados desde el señalamiento de 150 a 2400 millas náuticas en la **Figura 4.2**.



Figura 4.2 Localización de sitios costeros en millas nauticas [6].

Para los mismos sitios costeros localizados en cada una de las distancias 150, 200, 250, etc., hasta 2400 millas náuticas, las velocidades del viento fueron históricamente reconstruidas con el modelo actualizado de huracán descrito previamente y además con la actualización correspondiente del algoritmo VELCICT.

La calibración fue basada en la velocidad de viento máximo de CTs sobre estos sitios costeros para 50, 100, 200 años de periodo de retorno. La distribución de probabilidad ajustada de valores extremos tipo I, o Gumbel fueron aplicados a ambos para ambos tanto al viento simulado como el reconstruido de CT en E.U. y México. Los resultados de esta calibración son desplegados en la **Figura 4.3**.

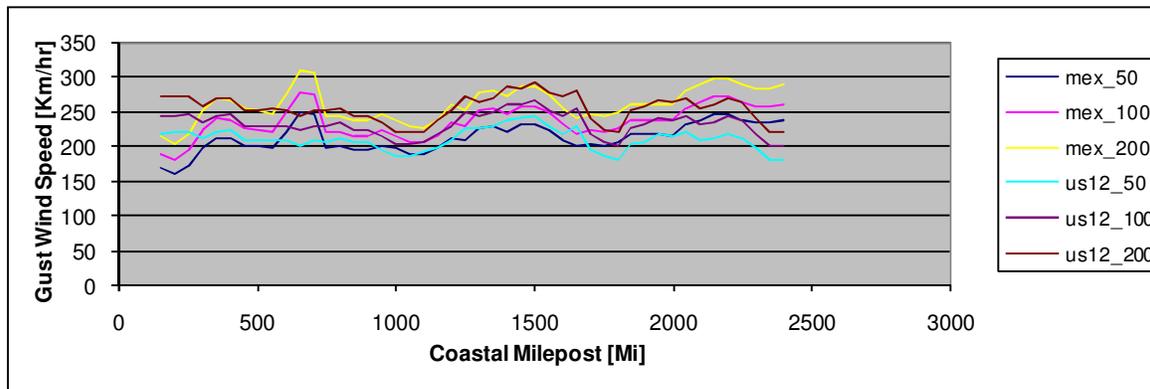


Figura 4.3 Comparación de VM-CT para la costa del Atlántico obtenido de lo simulado y reconstruido, después de la calibración, velocidades del viento, por US [2, 5] y estudios mexicanos, respectivamente.

La proporción de los valores de los VM de CT (VM-CT) obtenido de los CTs simulados y reconstruidos a lo largo de la costa Atlántica, que es mostrada en la **Figura 4.4**.

Debería ser notado que el VM-CT estimado en este estudio, para señalamientos de 650 y 700 nm, son más grandes que los estudios desarrollados en E.U. Las velocidades estimadas en este estudio son 24, 18 y 5% más grandes que las estimadas en E.U por Batts et al (1980), Vickery y Twisdale (1995) y Vickery et al (2000b), respectivamente [2,4,5].

El resultado de la calibración de VM-CT en los mapas de velocidad de viento para la región CGM correspondiente a 200 años de periodo de retorno, es presentado en la **Figura 4.5**. Sus valores son promedios horarios a 10m sobre un terreno con una rugosidad tipo 2 (campo abierto).La distribución de probabilidad tipo I y un periodo de muestreo de 3 años fueron aplicados, resultando coeficientes de correlación más grandes de 0.98 en la mayoría de los casos.

Diferencias y tendencias para diferentes periodos han sido también analizadas. La **Figura 4.6** despliega la relación entre velocidades máximas basadas en periodos diferentes. La **Figura 4.6** muestra corredores de aumento (disminución) en el sur (norte) de la región CGM para CT MWS en los últimos 50 años (periodo reciente), con respecto a los últimos 150 años.

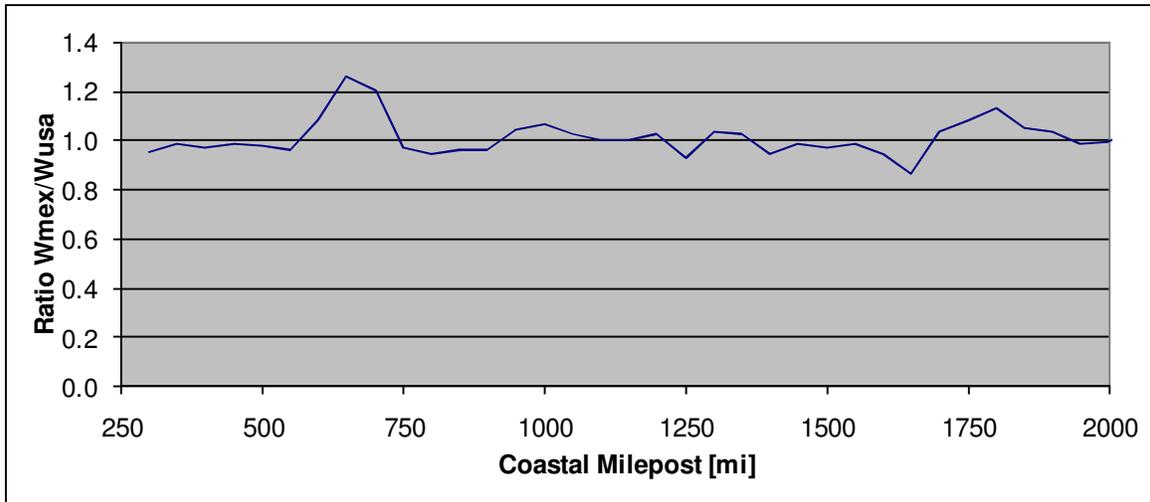


Figura 4.4 Razón promedio de los valores reconstruidos y simulados de VM-CT en estudios previos para las costas del Atlántico de México y E.U. [2, 5], mostrados en la **Figura 4.3**.

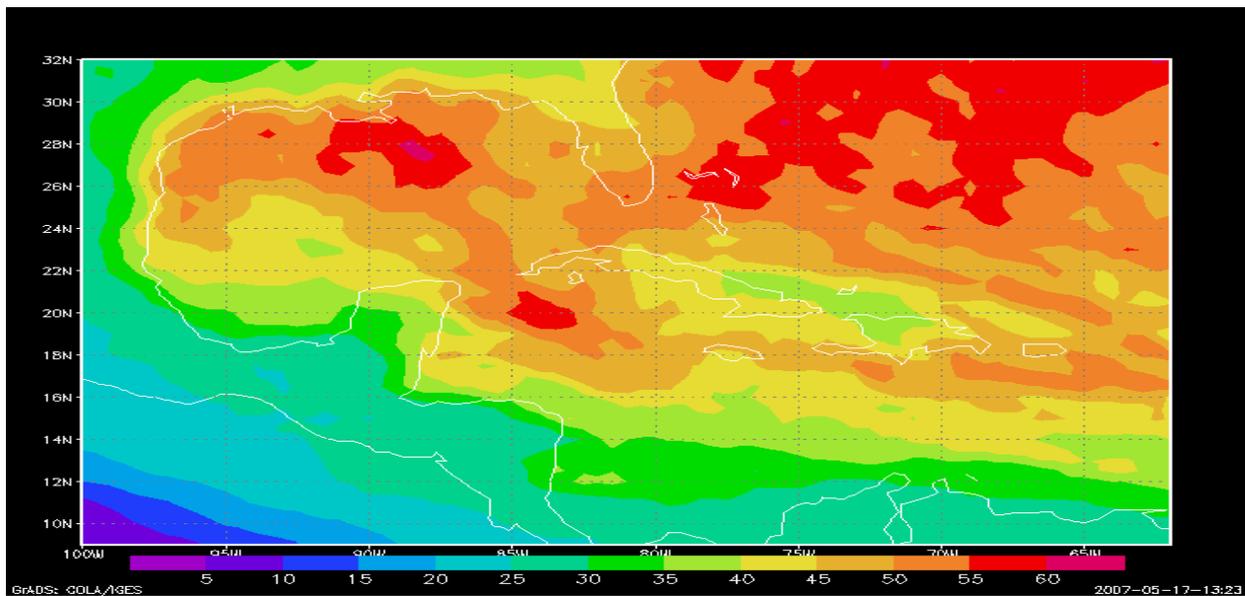


Figura 4.5 Velocidades de viento máximo de CTs estimadas para un periodo de retorno de 200 años [m/s] en la región CGM. Los valores están promediados de forma horaria sobre un terreno con una rugosidad tipo 2.

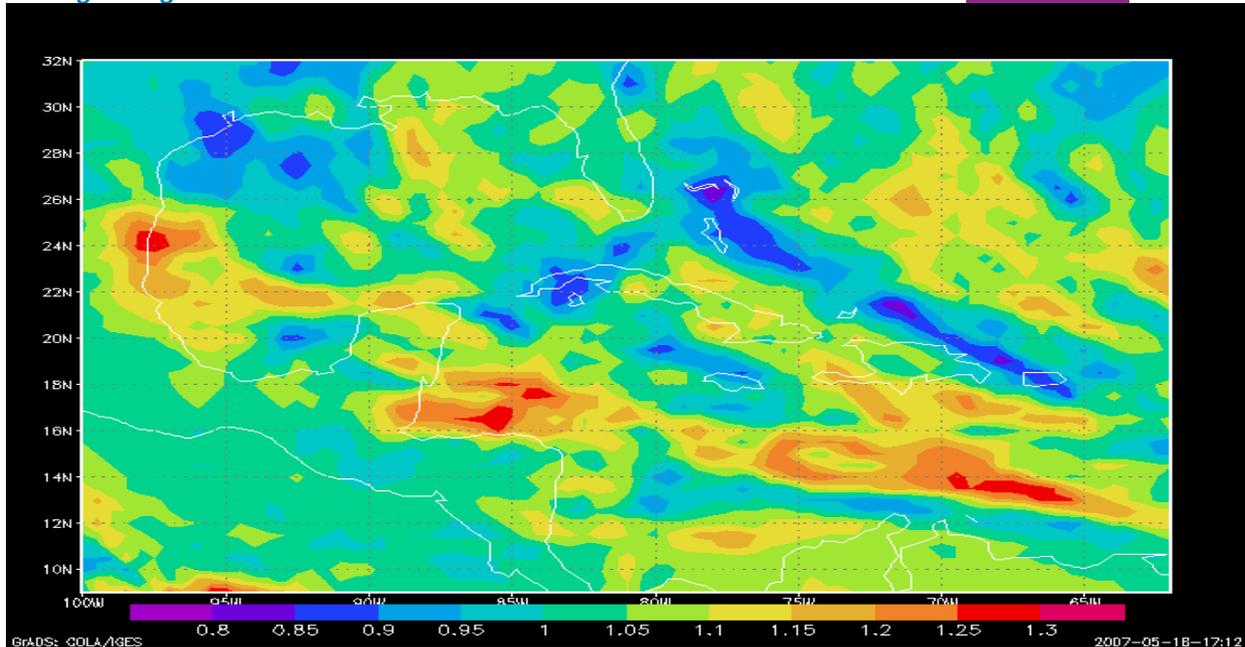


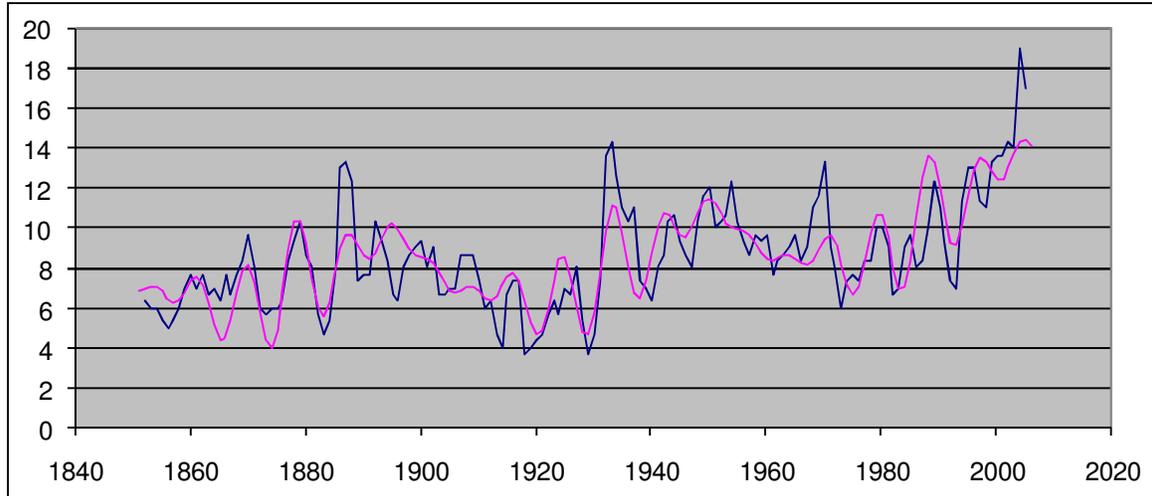
Figura 4.6 Comparación de vientos extremos evaluados con diferentes periodos. Razón entre las VM de CT en la región CGM con 200 años de periodo de retorno, de vientos reconstruidos de los periodos (1950 – 2006) y (1851 – 2006).

Tomando en cuenta estas diferencias, un análisis especial complementario de las oscilaciones multidecadales del clima en la frecuencia de VM-CT sobre el área CGM es presentado.

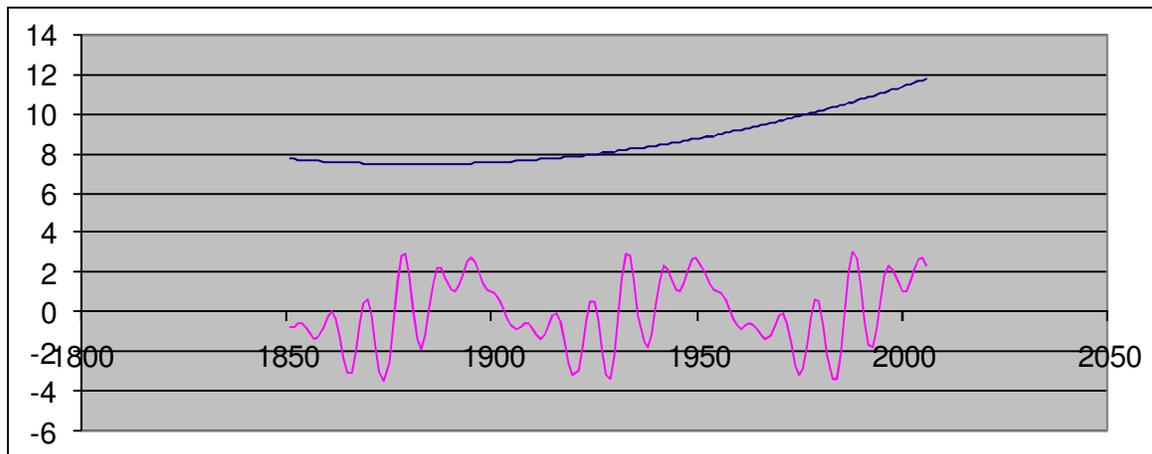
Oscilaciones Multidecadales de la Frecuencia de CT

Utilizando la base de datos de HURDAT, el expediente observado de CT, se evalúan la suma acumulada anual de las tormentas ciclónicas con nombre (CT) a partir de 1851 al presente, véase la **Figura 4.7a**. Para descomponer esta señal de CT en una tendencia y oscilaciones, la ecuación (10) es aplicada, seleccionando: $N_F = 7$ y $N_P = 3$. Estos números de componentes proporcionan por un lado suficientes componente para dar resultados para la valoración (cuadrática) no lineal más simple de las tendencias del calentamiento global (GW por sus siglas en inglés) y por el otro lado suficientes armónicas de la SF para caracterizar las fluctuaciones multidecadales (MO por sus siglas en inglés).

Con un proceso iterativo que varía de las SF su periodo básico entre 40 a 80 años, el error RMS mínimo fue encontrado para el periodo, $P = 54.5$ años. La función de ajuste la cual explica 63.3% de la varianza del registro suavizado HURDAT es desplegado en la **Figura 4.7a**. Las componentes de tendencia, o WG, y de las oscilaciones SF, o MO, son mostradas en la **Figura 4.7b**.



a)



b)

Figura 4.7 Modelación de Frecuencia de CT. a) HURDAT TC frecuencia anual (azul) con su modelo empírico con $N_s=7$ and $N_p=3$, (rosa, explica 63.3% de la varianza), b) HURDAT TC frecuencia anual componentes del modelo empírico: Componente Cuadrática F_{GW} (línea azul) y Series de Fourier $TCFreq_{MO}$ componente registrada of 54.5 yrs (rosa).

Las MOs detectadas de CTs presentan valores bajos (altos) durante los periodos 1863-1873, 1918-1928 y 1973-1983 (1895-1905, 1950-1960, y 1995-2005). Para explicar las diferencias de actividad ciclónica entre los dos últimos periodos, 1973-1983 y 1995-2005, hemos analizado aspectos energéticos y cinemáticos del entorno de la región CGM. El suministro de energía de los CTs está dado por el océano y medido simplemente por valores de la temperatura superficial del mar (SST). La Figura 8 despliega anomalías de SST más bajas y más altas para los periodos de baja y alta actividad, respectivamente. Los aspectos cinemáticos son importantes para la intensificación de CTs. Una de las variables más importantes es el cortante vertical del viento. Es una medida del gradiente vertical del viento que cuando incrementa no favorece condiciones favorables para el

desarrollo e intensificación de CT, y viceversa. La Figura 9 despliega las anomalías del cortante vertical del viento, mayores y menores para periodos de más alta y más baja actividad, respectivamente.

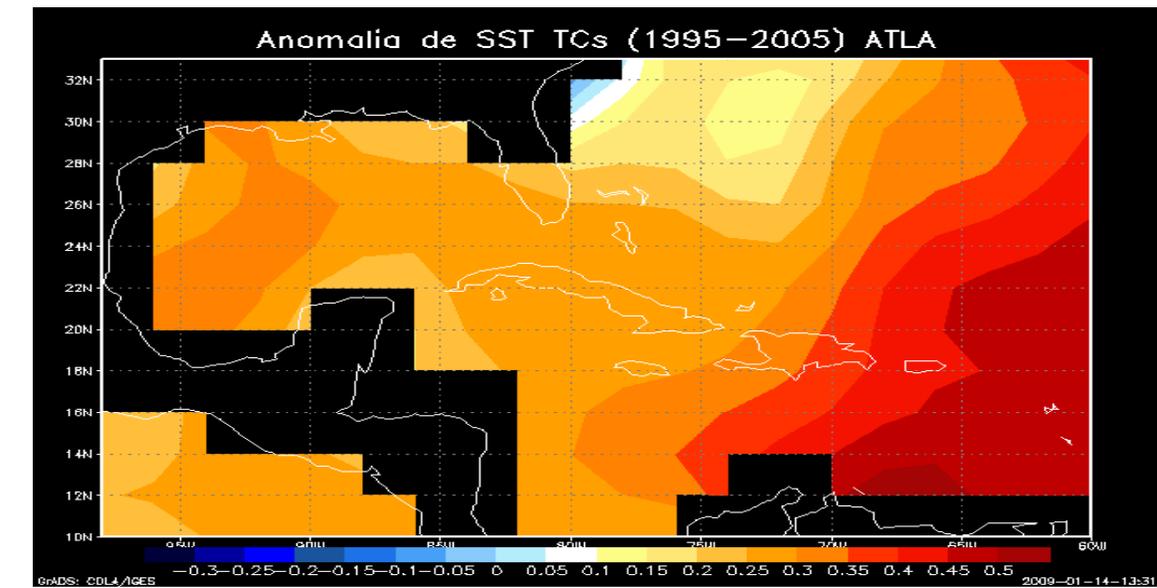
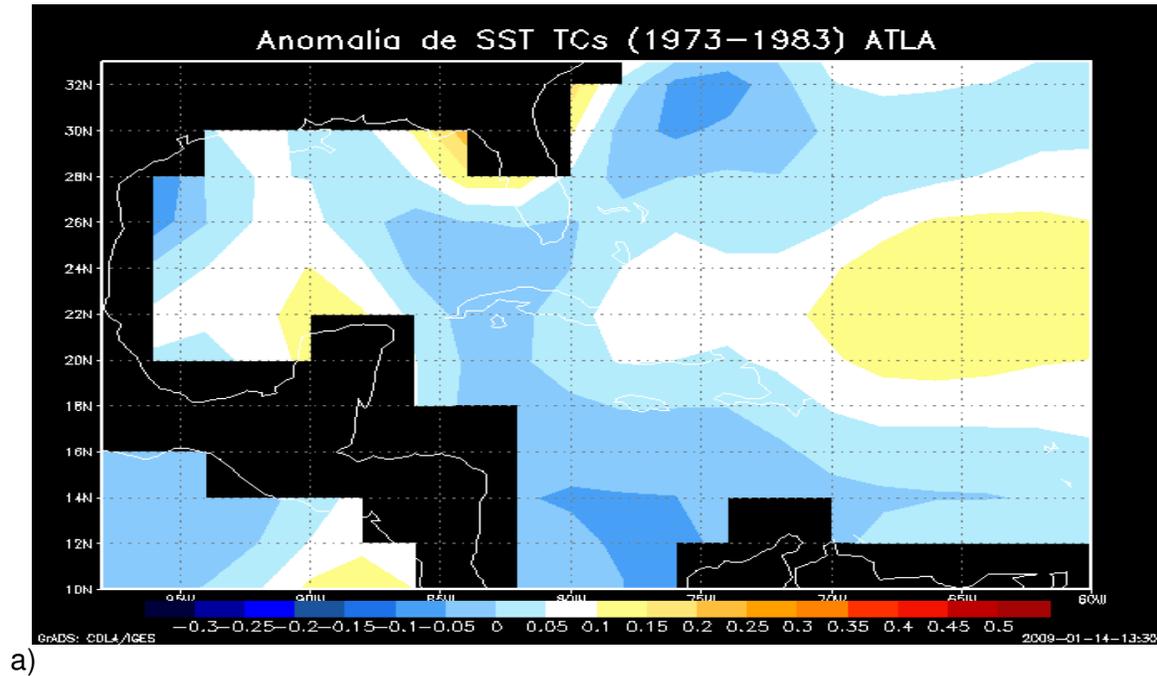
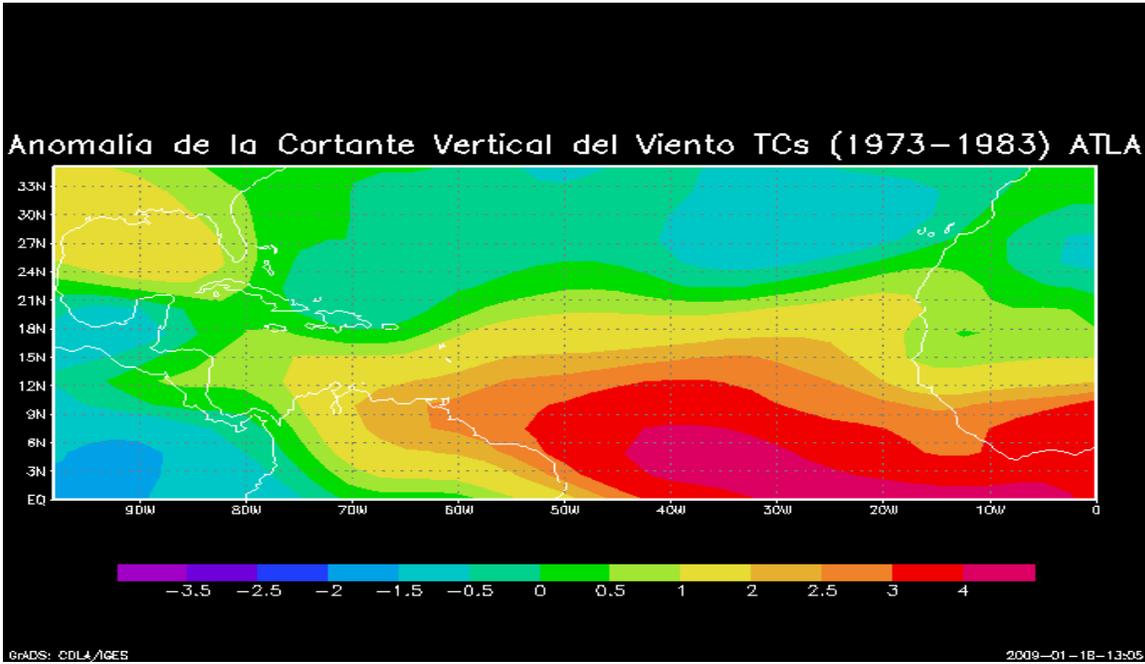
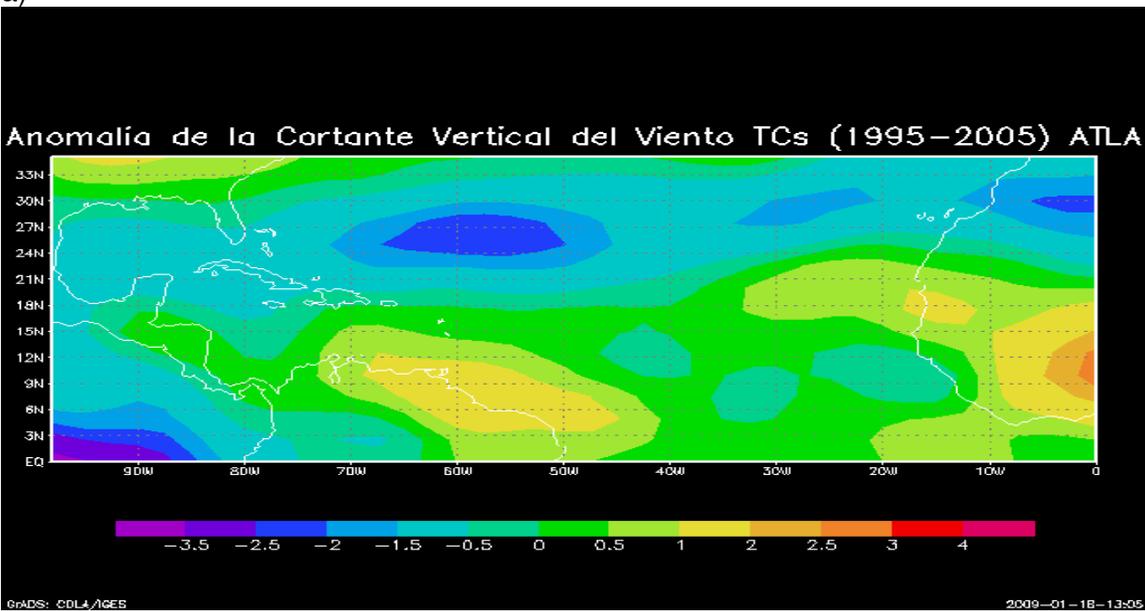


Figura 4.8 Anomalías de SST sobre la región CGM, a) periodo 1973-1983, b) periodo 1995-2005.



a)



b)

Figura 4.9 Anomalías de Cortante Vertical, a) para el periodo 1973-1983, b) periodo 1995-2005.

Para evaluar si las MO detectadas en la frecuencia de CTs modulan las VM de CT en la región del CGM se procedió a comparar los registros de VM reconstruidas para la región en estudio. La **Figura 4.10** muestra la correlación entre la componente de MO de la Frecuencia de CT, y las VM de CT reconstruidos en la región del CGM.

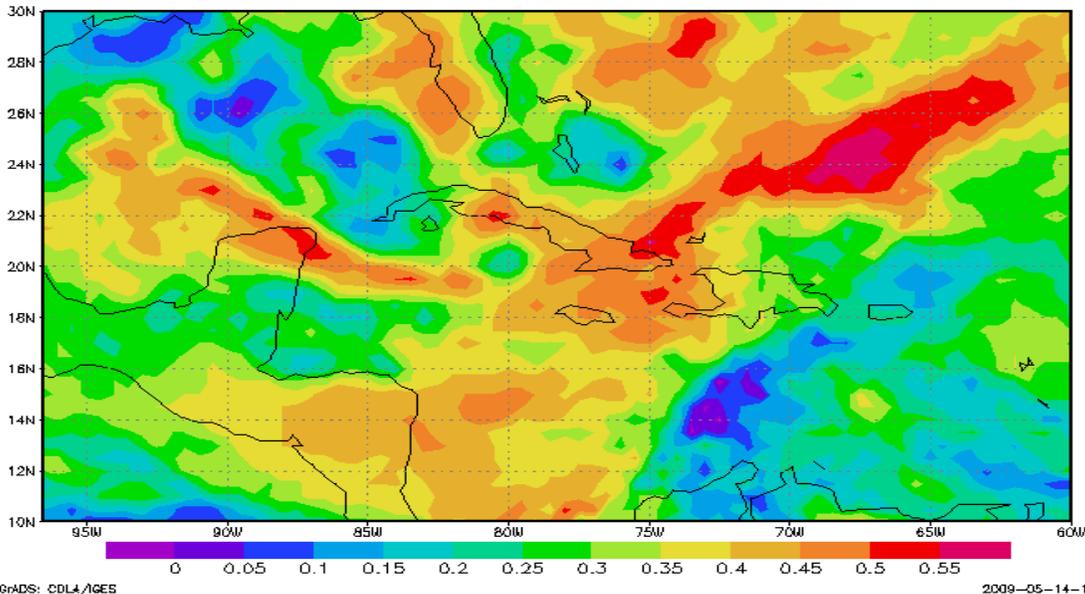


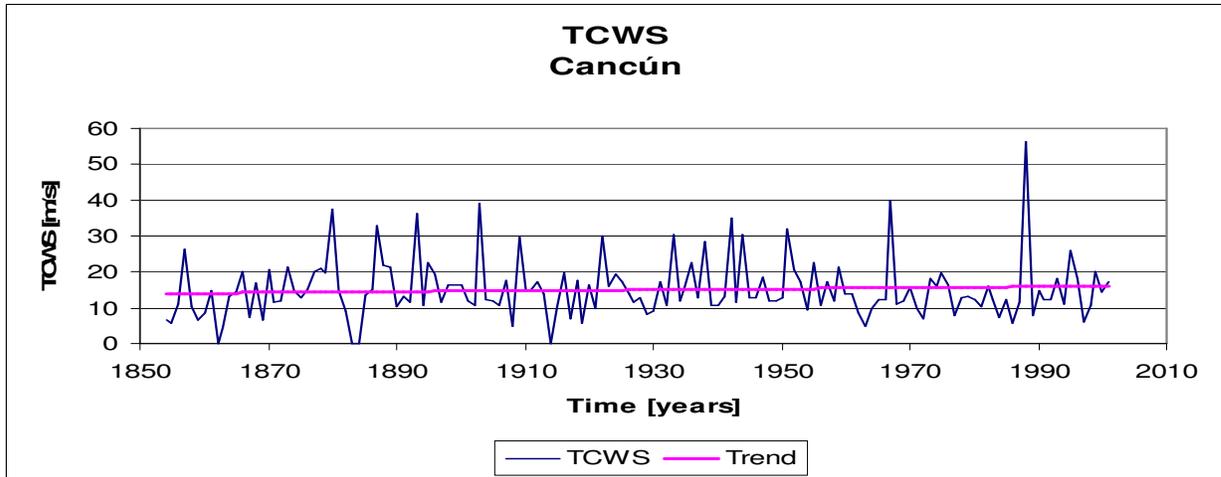
Figura 4.10 Correlación entre la reconstrucción suavizada (PM-7 años) VM-CT anual máximo y la componente de Series de Fourier $TCFreq_{MO}$ de periodo de 54.5 yrs.

La **Figura 4.11a** muestra el registro de VM de CT reconstruidos para el sitio ubicado cerca de Cancún Q.R. la tendencia lineal también aparece en la misma figura y es casi constante pues presenta un aumento muy pequeño en el tiempo. La **Figura 4.11b** muestra la comparación del registro suavizado (con promedio móvil de 7 años) y sin tendencia lineal de VM de CT.

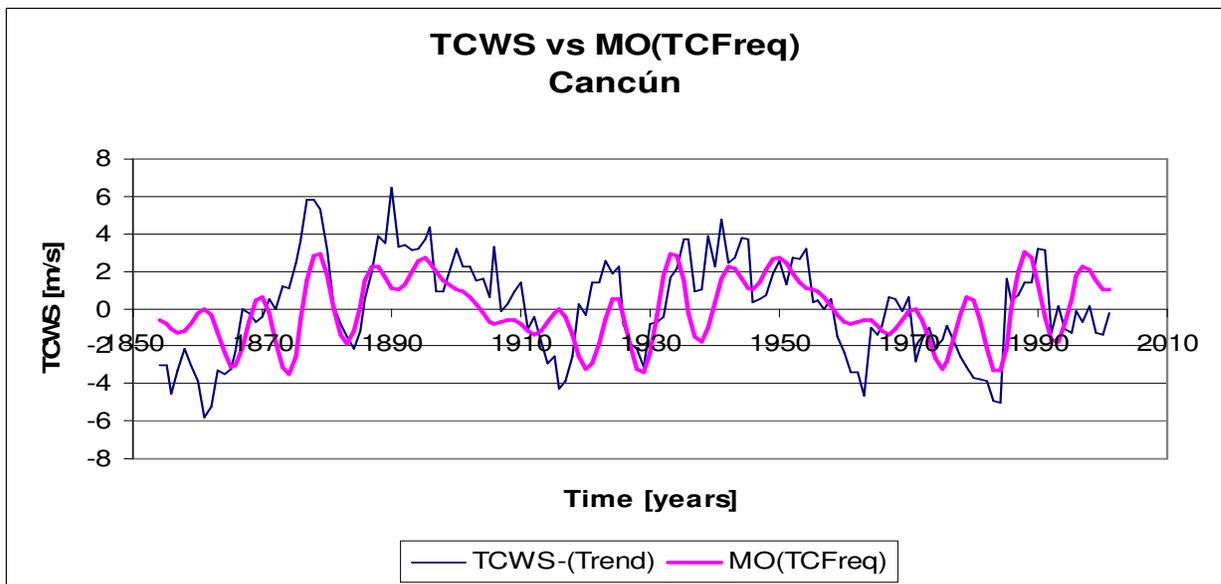
4.1.6 Conclusiones

La región CGM es frecuentemente afectada por CT. Como la información disponible de velocidades del viento ciclónico en la CGM es escasa e inexacta se justifica un modelo como el aquí propuesto que sea físicamente realista y suficientemente exacto y capaz de ser por si mismo como una herramienta de predicción, para aspectos meteorológicos y climatológicos.

Un modelo histórico del campo de viento de CT en áreas costeras basado en las medidas de ciclones tropicales sobre el mar ha sido aplicado. Este modelo además ha sido exitosamente aplicado para las costas mexicanas en conjunto con medidas sobre tierra incluyendo vientos ciclónicos y otros. El modelo discutido aquí tiene las ventajas básicas de simplicidad y economía.



a)



b)

Figura 4.11 Velocidades del viento de CT (VM-CT) tendencia y oscilación multidecadal (OM). a) VM-CT velocidades máximas del viento con su tendencia, b) regresión lineal y suavizada (MA-7yr) VM-CT anual máxima and Series de Fourier $TCFreq_{MO}$ componentes de registro 54.5 yrs la cual presenta una correlación de 0.53.

Formulaciones estadísticas y fluidodinámicas aproximadas son usados y aunque el modelo propuesto no es capaz de reproducir con alta precisión todas las características de un ciclón dado, los resultados del método han sido suficientemente precisos para apoyar un procedimiento más amplio para la predicción de vientos ciclónicos máximos con comparaciones, tendencias e interpolación de datos. Preliminarmente los resultados

muestran grandes áreas expuestas a fuertes vientos de CT tanto en México como en EUA.

Se necesita más investigación para extender los modelos existentes que incluirán factores tales como los perfiles de velocidad de viento, comportamiento en tierra, tornados, radio de vientos máximos, etc.

Respecto a la variabilidad climática, se puede decir que los resultados sugieren la existencia de oscilaciones multidecenales (OM) en la frecuencia de CT. Estas MO no solo se manifiestan en la frecuencia anual de eventos ciclónicos, sino además se manifiestan en las velocidades máximas de CTs en varias partes del área del CGM. Los resultados de este análisis sugieren que las MO en huracanes están ligadas con la intensidad de la cortante vertical, SST, y otras variables.

Las oscilaciones detectadas permiten explicar el aumento de actividad ocurrida en las últimas 3 décadas como debida no solo a la tendencia de largo plazo causada por el calentamiento global o GW, sino también a la variabilidad climática del Atlántico.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo de la NOAA por la base de datos HURDAT con la información registrada de las mejores trayectorias de CT. Este trabajo fue llevado a cabo con la ayuda del Instituto Inter Americano para la Investigación del Cambio Global (IAI) CRN-II-#2050, el cual es apoyado por la Fundación Nacional de Ciencia de E.U. (GEO- 0452325), con la ayuda del CONACYT y de la CONAGUA al proyecto S0013-2006-1-48492, y con el apoyo del INE al proyecto TH-0918.

4.1.7 Referencias

- [1] Russell, L.R. (1971). "Probability distributions for Hurricane effects", *J. Waterways, Harbors and Coastal Engng. Div., Proc. ASCE*, Vol. 97, No. WW1, 139-154.
- [2] Batts, M.E. Cordes, M.R., Russell, L.R., Shaver, J.R., and Simiu, E. (1980). "Hurricane wind speeds in the U.S.A", *NBS Building Science Series 124, Department of Commerce, National Bureau of Standards, Washington, D.C.*
- [3] Georgiou, P.N., Davenport, A.G. and Vickery, B.J. (1983). "Design wind speeds in regions dominated by tropical cyclones", *J. Wind Engng. and Ind. Aerodyn.*, Vol. 13, 139-152.
- [4] Vickery, P.J, and Twisdale, L.A. 1995b. Prediction of hurricane wind speeds in the risk in the United States. *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 121 (11), 1691-1699.
- [5] Vickery, P.J, Skerlj, P.F., Steckley, A.C., and Twisdale, L.A. 2000b. Simulation of hurricane risk in the U.S. using empirical track model. *J. Strct. Engrg.*, ASCE, 126 (10), 1222-1237.
- [6] Ho, F.P., Schwerdt, R.W. and Goodyear, H.V. (1975). "Some climatological characteristics of hurricane and tropical storms, Gulf and East Coasts of the United States", *NOAA Tech. Rep. NWS 15, Washington, D.C.*



Instituto Mexicano de
Tecnología del Agua

Tendencias climáticas de fenómenos
hidrometeorológicos extremos en México
durante los últimos 40 años



SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES

- [7] Sánchez-Sesma J., Aguirre, R.J. and Villegas, V.A. (1984). "Maximum wind speeds in México for structural design purposes", IV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Le'on, Guanajuato, Mexico, G110-G119. (in Spanish).
- [8] CFE (Comisión Federal de Electricidad), *Manual de Diseño de Obras Civiles*, 1993, Cap. C-1-4, Diseño por Viento.
- [9] CFE (Comisión Federal de Electricidad), *Manual de Diseño de Obras Civiles*, 2008,– Diseño por Viento, México.
- [10] Sánchez Sesma, J., 1985. "Vientos máximos debidos a ciclones tropicales", Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- [11] Sánchez-Sesma, J., et al , 1988. "Simple Modeling Procedure for Estimation of Cyclonic Wind Speeds". *Journal of Structural Engineering*, 144, 2, 353-370.
- [12] Jarvinen, B. R., C. J. Neumann, and M. A. S. Davis (1984), *A tropical cyclone data tape for the North Atlantic basin, 1886–1983*, NOAA Tech. Memo., NWS NHC 22, 21 pp. (Available at <http://www.nhc.noaa.gov/pdf/NWS-NHC-1988-22.pdf>)
- [13] Landsea, C. W., C. Anderson, N. Charles, G. Clark, J. Dunion, J. Fernandez-Partagas, P. Hungerford, C. Neumann, and M. Zimmer (2004), *The Atlantic hurricane database re-analysis project: Documentation for the 1851–1910 alterations and additions to the HURDAT database*, in *Hurricanes and Typhoons: Past, Present and Future*, edited by R.J. Murname and K.-B. Liu, pp. 177–221, Columbia Univ. Press, New York.
- [14] Landsea, C. W. , D. A. Glenn, W. Bredemeyer, M. Chenoweth, R. Ellis J. Gamache, L. Hufstetler, C. Mock, R. Perez, R. Prieto, J. Sanchez-Sesma, D. Thomas, and L. Woolcock, 2008: *A Reanalysis of the 1911-20 Atlantic Hurricane Database*. *Journal of Climate*, 21, p.2138-2168.
- [15] Landsea, C. W., 2006: *A Reanalysis of the 1911-20 Atlantic Hurricane Database*. *Nature*, 21, p.2138-2168.
- [16] Graham, G.E. and Nunn, D.E. (1959). *National Hurricane Research Project, Report No 33*, Weather Bureau, U.S. Dept. of Commerce, Washington, D.C.
- [17] Scholobemer, R.N. (1954). "Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Lake Okeechobee", Florida, U.S. Weather Bureau Hydrometeor. Rep. No. 31.
- [18] Springall, R.G. (1980). "Study and statistical analysis of waves produced by hurricanes in the Southeast Gulf of México", Instituto de Ingeniería, U.N.A.M, México City, Rep. No. 361. (in Spanish)
- [19] Holland, G. J., 1980: *An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes*. *Mon. Wea. Rev.*, 108, 1212–1218.
- [20] Vickery, P.J., and Twisdale, L.A. 1995a. *Wind-field and filling models for hurricane wind-speed predictions*. *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 121 (11), 1700-1709.
- [21] Vickery, P.J, Skerlj, P.F., Steckley, A.C., and Twisdale, L.A. 2000a. *Hurricane wind field model for use in hurricane simulations*. *J. Strct. Engrg.*, ASCE, 126 (10), 1203-1221.
- [22] Simiu, E. and Scanlan, R.H. (1986). *Wind effects on structures: An introduction to wind engineering*, 2nd ed., John Wiley and Sons, New York.
- [23] Yevjevich, V. (1972). "Probability and statistics in hydrology", *Water Resources Publ.*, Ft. Collins, Colo
- [24] Ishizaki, H. (1970). "Wind damage and wind load problems in Japan", *Proc. U.S.A.-Japan Res. Seminar: Wind Loads on Structures, Hawaii*, 1-12
- [25] Russell, L.R. and Schueller, G.I. (1974). "Probabilistic models for the Texas Gulf Coast Hurricane occurrences", *J. Petroleum Tech.*, 279-288.

[26] Davenport, A.G. (1978). "Wind structure and wind climate", *Proceedings, the International Research Seminar on Safety of Structures Under Dynamic Loading, Norwegian Institute of Technology, Thronheim, 209-256.*

4.2 Parte II. Tendencias del ENSO y de la precipitación pluvial en México: Un análisis de la influencia del ENSO a nivel nacional y de las tendencias estatales para verano e invierno.

4.2.1 Resumen

Se presenta un análisis del ENSO y de la precipitación pluvial en México. Primero se estiman las tendencias del ENSO utilizando información simulada y observada. Después, mediante el estudio de las anomalías de las temperaturas superficiales del mar en el Pacífico ecuatorial se estimó objetivamente la ocurrencia de los eventos ENSO. Posteriormente, se analizan las características de las lluvias promedio y extremas durante las diferentes fases del ENSO (Niño, Niña y Neutro) y también, se realiza el mismo análisis de promedios y extremos pero considerando fases más detalladas del ENSO (Niño severo, Niño, Neutro, Niña y Niña severa). En cuanto el análisis de tendencias se realiza un estudio a nivel estatal que considera lluvias de verano y de invierno. Por último se estima que las lluvias están en proceso de cambio de tendencia asociado al cambio de tendencia multidecenal del ENSO.

4.2.2 Introducción

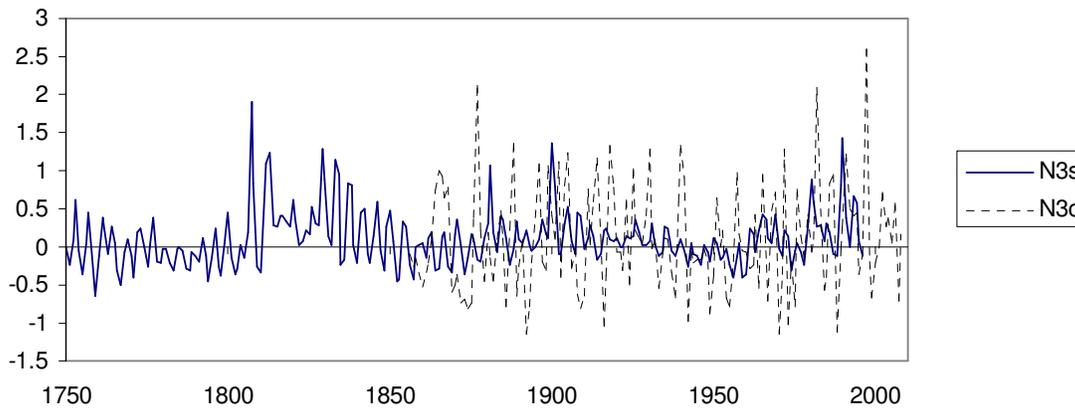
El ENSO es uno de los principales procesos climáticos causantes de la variabilidad climática interanual y de mayores escalas temporales. Por ello, el estudio de sus tendencias es fundamental para entender las tendencias del clima de México.

En este trabajo se pretende encontrar como se comporta la precipitación en México cuando se presenta el evento de El Niño. Mediante un análisis estadístico de la información se estiman las tendencias del fenómeno ENSO, posteriormente se presentan los ciclos anuales de lluvia asociados a las diferentes fases del ENSO y por último se presentan las tendencias para las lluvias de verano e invierno.

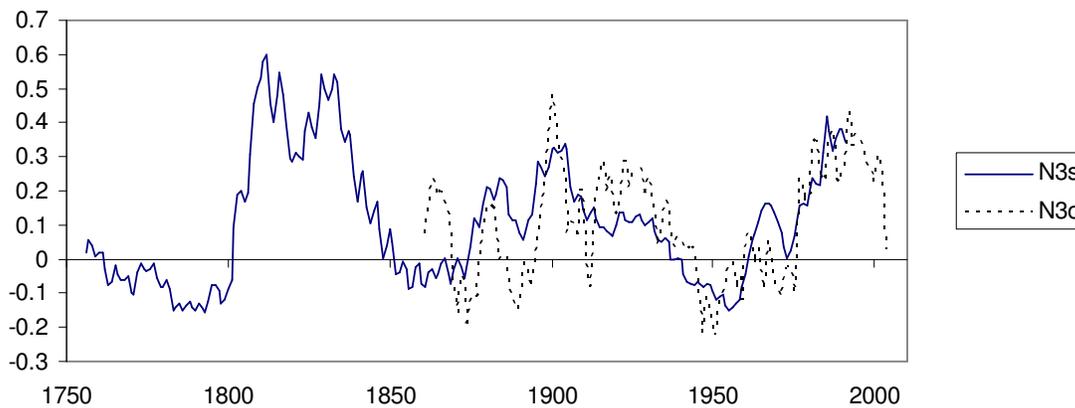
4.2.3 Tendencias del ENSO

Las medidas instrumentales del ENSO son atmosféricas (índice de oscilación austral *) y oceánicas (por ejemplo, la temperatura superficial del mar); y retroceden hasta mediados del siglo XIX. Sin embargo, existen algunas reconstrucciones de su variabilidad anteriores a los registros observacionales. Gracias al trabajo de Mann et al (2005), se cuenta con una simulación de la ocurrencia y variabilidad natural del ENSO durante los últimos 1000 años. En ese trabajo se consideró como forzantes climáticos a la actividad del sol y de los volcanes que ha sido reconstruida por diferentes autores. El modelo utilizado fue el conocido modelo ceano-atmósfera de área restringida desarrollado por Zebiak y Cane (1987), y que se le conoce como el modelo ZC.

El análisis de la información del índice N3 del ENSO, en sus valores simulados por el modelo ZC para los últimos 250 años y observados para los últimos 150 años, nos permite detectar y evaluar oscilaciones y tendencias de largo plazo. En la **Figura 4.12** muestra las oscilaciones interanuales y multidecenales del ENSO. Es notable una oscilación de aproximadamente 80 años que ha persistido durante los últimos 250 años.



a)



b)

Figura 4.12 Señal de $N3$ en $^{\circ}\text{C}$. (a) Información simulada ($N3s$), por M05, para los últimos 250 años e información observada ($N3o$) para los últimos 150 años, obtenida de los archivos del IRI, (b) la misma información que en a) pero suavizada con un promedio móvil de 21 años.

Los resultados muestran que algunos cambios detectados en el comportamiento del ENSO en los últimos 50 años, durante los cuales ha dominado la fase calurosa (El Niño), han sido únicos desde 1850 como se observa en la **Figura 4.12**. Los mismos resultados muestran un cambio de tendencias del ENSO que parece se inició en los últimos años del

siglo XX que implican un dominio de la fase fría del ENSO (La Niña) por las próximas décadas.

A continuación se analiza las tendencias de precipitación pluvial para todos los estados de la república Mexicana.

4.2.4 Tendencias de la precipitación estatal

Se calcularon las tendencias de precipitación pluvial estatal para los periodos 1960-2007. Se estimaron las tendencias lineales para la información acumulada anual, de verano (mayo-octubre) e invierno (noviembre-abril). Los valores de las tendencias en mm/año se dan en la **Tabla 4.1** y las gráficas correspondientes se hayan en los anexos I y II.

Para los acumulados anuales las tendencias positivas mayores se presentan en los estados de Campeche, Puebla, Veracruz, Quintana Roo, Guanajuato, Coahuila, Nayarit, Morelos, Distrito Federal y Tlaxcala. En cuanto a las mayores tendencias negativas se presentan en los estados de Chiapas Oaxaca, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Yucatán, Durango, San Luis Potosí, Tabasco, Sinaloa y México.

Para los acumulados de verano las tendencias positivas mayores se dan en los estados de Puebla, Campeche, Veracruz, Guanajuato, Nayarit, Quintana Roo, Coahuila, Chiapas, Durango y Morelos. En cuanto a las mayores tendencias negativas estas se presentan en los estados de México, Sinaloa Yucatán, San Luis Potosí, Hidalgo, Guerrero, Jalisco, Michoacán y Tabasco.

Para los acumulados de invierno las tendencias positivas mayores se dan en los estados de Campeche, Quintana Roo, Veracruz, Colima, Tamaulipas, Coahuila y Tlaxcala, mientras que las tendencias negativas mayores se dan en los estados de Chiapas, Tabasco, Oaxaca, Sinaloa, San Luis Potosí y Durango.

4.2.5 Definición de eventos ENSO

Para la definición objetiva de la ocurrencia de eventos ENSO, se elaboró un programa en FORTRAN para calcular las anomalías de Temperatura de la Superficie del Mar, utilizando datos de la NOAA. Después de obtener las anomalías se les da un valor para categorizar el año, si la anomalía positiva o negativa rebasaba un umbral, denominándose automáticamente Niño o Niña, respectivamente. Los datos empleados de la temperatura superficial del mar, en la región del Pacífico Ecuatorial, fueron obtenidos de la página en Internet de la NOAA (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/sstoi.indices>).

ESTADOS	ANUAL.	VERANO.	INVIERNO.
AGUASCALIENTES	1.2822	1.8489	-0.6421
BAJA CALIFORNIA	-0.3475	-0.669	0.1477
BAJA CALIFORNIA SUR	0.8924	0.963	-0.0515
CAMPECHE	10.651	7.8743	3.1281
COAHUILA	3.439	2.9007	0.5604
COLIMA	0.3578	1.565	1.3217
CHIAPAS	-2.4454	2.352	-4.7527
CHIHUAHUA	0.3472	0.016	0.3441
DISTRITO FEDERAL	1.8455	1.4088	0.379
DURANGO	-3.4677	2.3311	-1.0698
GUANAJUATO	3.4464	3.7334	-0.3652
GUERRERO	-3.229	-2.5659	-0.6912
HIDALGO	-3.229	-2.5659	-0.6912
JALISCO	-3.344	-2.4759	-0.9693
MEXICO	-7.1315	-6.2366	-1.0013
MICHOACAN	-1.7764	-1.5477	-0.299
MORELOS	2.2319	2.2558	-0.0121
NAYARIT	2.886	3.5365	-0.6804
NUEVO LEON	0.3818	0.4609	-0.0665
OAXACA	-2.901	-0.9912	-1.9065
PUEBLA	10.341	9.9706	0.321
QUERETARO	-0.7997	-0.6324	-0.2363
QUINTANA ROO	4.7362	3.3994	1.7178
SAN LUIS POTOSI	-4.3392	-3.2305	-1.2264
SINALOA	-6.2665	-4.4679	-1.8515
SONORA	-0.639	-0.3279	-0.3046
TABASCO	-6.0522	-1.1841	-4.5201
TAMAULIPAS	0.6569	-0.4856	1.1675
TLAXCALA	1.7862	1.2563	0.4842
VERACRUZ	6.2822	4.8257	1.3986
YUCATAN	-3.4035	-3.2778	0.1636
ZACATECAS	-0.5715	0.1834	-0.8253

Tabla 4.1 Tendencias de precipitación pluvial a nivel estatal para los acumulados de lluvia anual, en verano e invierno. Los valores corresponden a mm/año

Estas anomalías se calcularon por periodos de trimestres desde 1950 al 2006. Los valores por arriba del umbral, $+5^{\circ}\text{C}$, se le asignó un valor de 1(uno), a los valores por debajo del umbral mínimo, -5°C , se les asignó un valor de -1 (menos uno) y a los valores entre $+5^{\circ}\text{C}$ y -5°C se les asignó un valor de 0 (cero); estos valores, $+1, -1$, y 0 se

utilizaron para identificar a los años con eventos El Niño, La Niña y neutros, respectivamente. Se obtuvo la siguiente grafica, **Figura 4.13**.

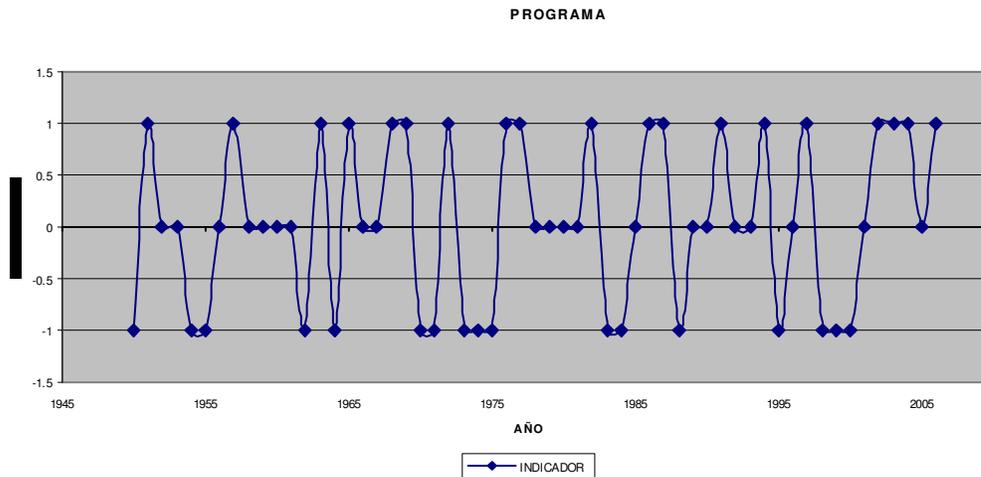


Figura 4.13 Indicadores de evento El Niño (1), La Niña (-1) y Neutro (0), para el periodo 1950-2006.

Se contabilizaron en ese periodo 19 eventos El Niño, 17 eventos La Niña y 21 eventos Neutros.

Para validar los resultados obtenidos de la ocurrencia de ENSO, estos se compararon con los datos publicados por la Agencia de Meteorología de Japón (AMJ) y la National Oceanic Administration Atmosphere (NOAA, **Figura 4.14**).

4.2.6 Análisis de la precipitación en México asociada al ENSO

Se realizó un comparativo de la precipitación en México, con los años en los cuales se detectaron eventos El Niño, La Niña o Neutros. Los datos de precipitación para México del periodo 1950-2006 fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Se realizaron promedios mensuales de los años con eventos El Niño, La Niña o Neutros obteniéndose los siguientes resultados:

En la grafica de promedios (**Figura 4.15**), se encuentra que, en eventos El Niño, el mes de marzo, tiene el valor promedio más bajo mientras que el mes de julio presenta el valor más elevado. Es de notarse que en la estación de primavera llueve más en promedio durante eventos El Niño, que con eventos La Niña, o Neutros, incluso arriba de la climatología. Durante inviernos, con eventos El Niño, la precipitación en nuestro territorio se intensifica mientras que, en veranos con eventos El Niño, la precipitación disminuye (Magaña, *et. al.* 2001)

INDICADORES

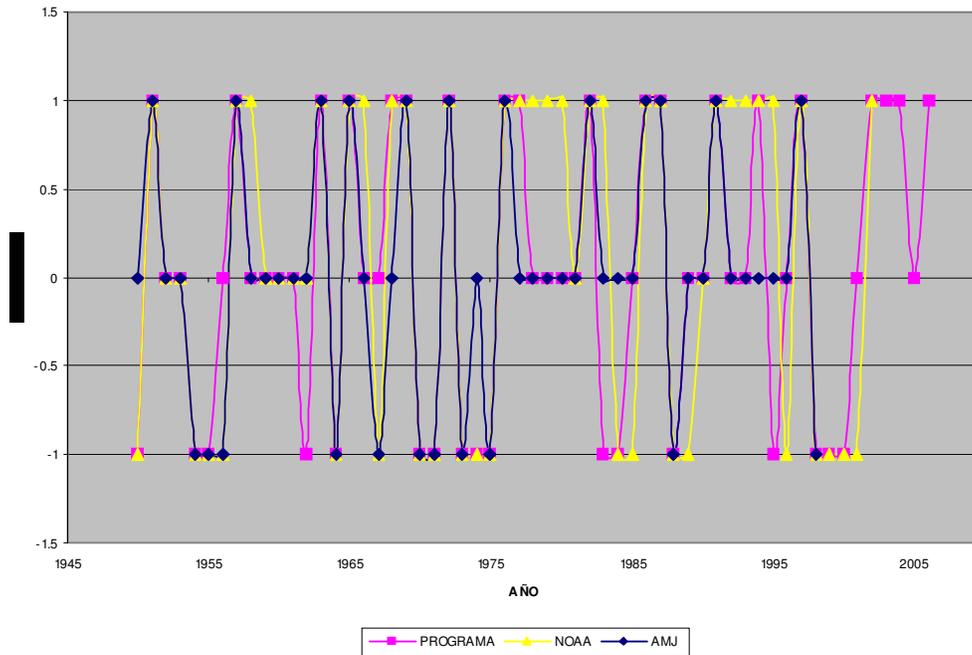


Figura 4.14 Comparación de indicadores de años con eventos El Niño (+1), La Niña (-1) y Neutro (0), de la: AMJ, PROGRAMA y NOAA.

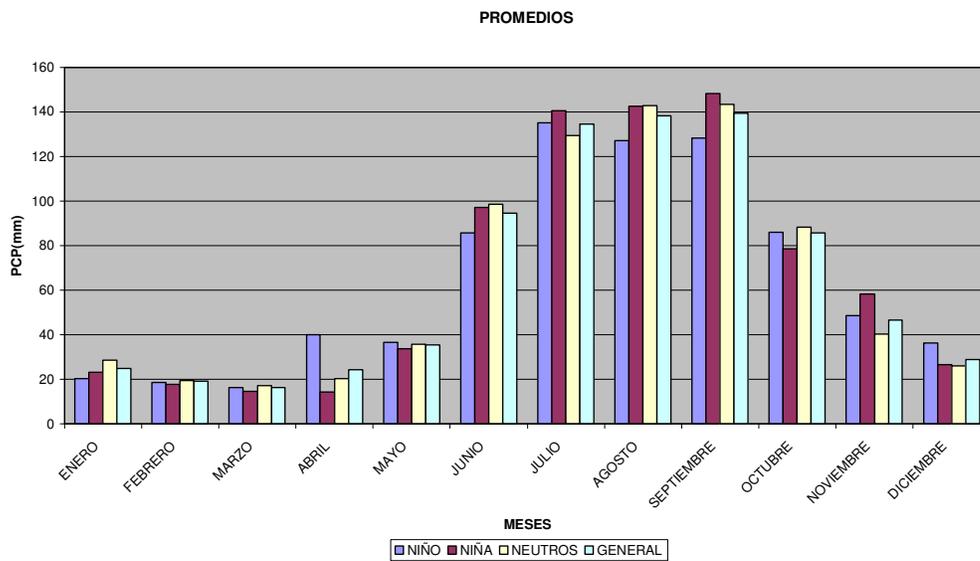


Figura 4.15 Promedio de precipitación con en años con eventos El Niño, La Niña, neutros, y general, por meses, para el periodo de 1950-2006.

En el primer trimestre del año, (EFM), la precipitación promedio en eventos El Niño se mantuvo por debajo de los 20 mm., llegando hasta un mínimo de 16.16 mm en el mes de marzo, y siendo este el mes con menor precipitación en el promedio general. Para el segundo trimestre, (AMJ), la precipitación en abril se dispara hasta los 39.9 mm pero luego en el mes de mayo sufre un decremento de 4 mm en promedio con respecto a abril, hasta los 36.4 mm para recuperarse en el mes de junio con valor por arriba de 80 mm, cabe mencionar que en la mayor parte de México la estación de verano es la más lluviosa. El mes de junio es el comienzo la temporada de precipitación y se marca con ese gran incremento mencionado anteriormente, por arriba de los 80 mm. Para el tercer trimestre que representa el más lluvioso, para México, el periodo de la canícula no se encuentra muy marcado, en eventos El Niño. El mes de julio se presenta como el de mayor precipitación, con 135.08 mm, no solo en el periodo del tercer trimestre, si no, también en el del promedio general para eventos El Niño. Como se mencionó anteriormente, la canícula se muestra un poco “débil” en el promedio de precipitación de años con eventos El Niño. Comienza con el incremento fuerte en julio (135.08 mm) para decaer en agosto cerca de 10 mm con respecto a julio e incrementarse levemente en el mes de septiembre solo 2 mm aproximadamente con respecto a agosto. Para el último trimestre (OND) la declinación de la precipitación se muestra de una manera similar a la climatología sin grandes alteraciones en los patrones de precipitación y una tendencia a la disminución hacia el mes de diciembre.

Con respecto a eventos La Niña, se puede mencionar que existe una ligera tendencia a precipitar mas en veranos con años La Niña que en años con eventos El Niño o neutros. El primer trimestre, enero, febrero y marzo, (EFM), la precipitación se comporta con una disminución, de 23.06 mm en enero hasta 14.53 mm en marzo, representando el trimestre con menor precipitación en promedio de años con evento La Niña. Para el segundo trimestre, se tiene que en promedio que los meses de abril en los años con eventos La Niña la precipitación disminuye 10 mm aproximadamente con respecto al promedio general y hace de este mes el de menor precipitación. Para el mes de junio se ve marcado de nuevo el incremento de la precipitación y dando inicio a el periodo normal de lluvias para México. En el tercer trimestre (JAS), la precipitación tiende a aumentar considerablemente en periodos con años La Niña el mes de septiembre es marcado como el mes más lluvioso con un promedio de 148.12 mm. Además los índices de precipitación en este trimestre tienden a aumentar continuamente hasta alcanzar el máximo en septiembre y no se distingue el periodo de la canícula. También en este trimestre se puede apreciar que los valores en años La Niña son ligeramente arriba del promedio general. Para el cuarto trimestre existe una disminución con respecto al promedio general de casi 10 mm, y en el mes de noviembre se revierte y se tiene un incremento de 11.6 mm con respecto al promedio general.

Para los años neutros o normales, la precipitación en el primer trimestre (EFM) tiende a ser mayor que en los años con eventos La Niña o El Niño comportándose ligeramente por arriba del promedio general. El mes de enero en años neutros se convierte en el mes con mayor precipitación del trimestre. Para el segundo trimestre (AMJ) se muestra que para el inicio de la temporada de lluvias (mes de junio) la precipitación es ligeramente mayor que en años con eventos La Niña o El Niño. Para el tercer trimestre (JAS) ya en el periodo de

verano de años neutros la precipitación tiende a aumentar como en todos los casos pero con la variante de que es superior en los meses de agosto y septiembre y ligeramente inferior en el mes de julio. Es importante destacar que no se muestra un desarrollo de la canícula en este periodo de años neutros. Para el último trimestre la precipitación en años neutros presenta un leve aumento en el mes de octubre con respecto al promedio general y eventos La Niña y El Niño, pero para los meses de octubre y noviembre se muestra en disminución en comparación con dichos eventos.

Para la grafica de mínimos, en los mismos casos (El Niño, La Niña y neutro), (**Figura 4.16**), se encontró que para los meses de enero y febrero los mínimos mas elevados se presentan en años con eventos El Niño mientras que para el caso del mes de marzo se presenta para años con evento La Niña. Para el mes de abril el mínimo mayo se vuelve a presentar en años con evento El Niño, pero para el mes de mayo el mínimo es similar para años con evento El Niño y años normales o neutros. Para el mes de junio y julio los años con eventos La Niña muestran un ligero incremento en sus mínimos comparado con los otros casos, siendo para el mes de agosto una disminución en el mínimo y teniendo los años neutros con el valor mínimo de precipitación más elevado. Para el mes de septiembre se presenta valor de precipitación mínimo más elevado con 121.40 mm, y este se presenta justo en años con eventos La Niña. Para octubre los años con eventos La Niña tienden a tener el mínimo más elevado que los otros casos y para los meses de noviembre y diciembre, los años normales y con eventos El Niño, alcanzan el mínimo más alto, respectivamente.

En los valores mínimos se muestra que en los meses de julio, agosto, septiembre la canícula se muestra muy marcada en años con eventos El Niño o La Niña, mientras que para años neutros ocurre un ligero aumento de la precipitación en el mes de agosto.

Respecto a la **Figura 4.17**, donde se grafican los valores máximos de precipitación presentados en cada mes para los años con eventos El Niño, La Niña y neutros o normales, se observa que en el mes de enero los máximos más fuertes se presentan en condiciones de años normales, mientras que para febrero y marzo estos valores se presentan en años con eventos La Niña. Para los meses de abril, mayo y junio (AMJ), los valores máximos vuelven a ser para años normales, y ya para el tercer trimestre (JAS) los valores máximos se presentan en años con eventos La Niña, y en octubre para años normales. Para el mes de noviembre es el único mes en el cual los años con evento El Niño tiene el mayor valor de máximos, para terminar con diciembre ligeramente arriba los años con evento La Niña con respecto a los años con eventos El Niño.

El periodo de canícula, se observa con mayor fuerza en los rangos máximos cuando se presentan años con evento La Niña, o años normales, con valores picos por arriba de los 200 mm (**Figura 4.18**).

MÍNIMOS

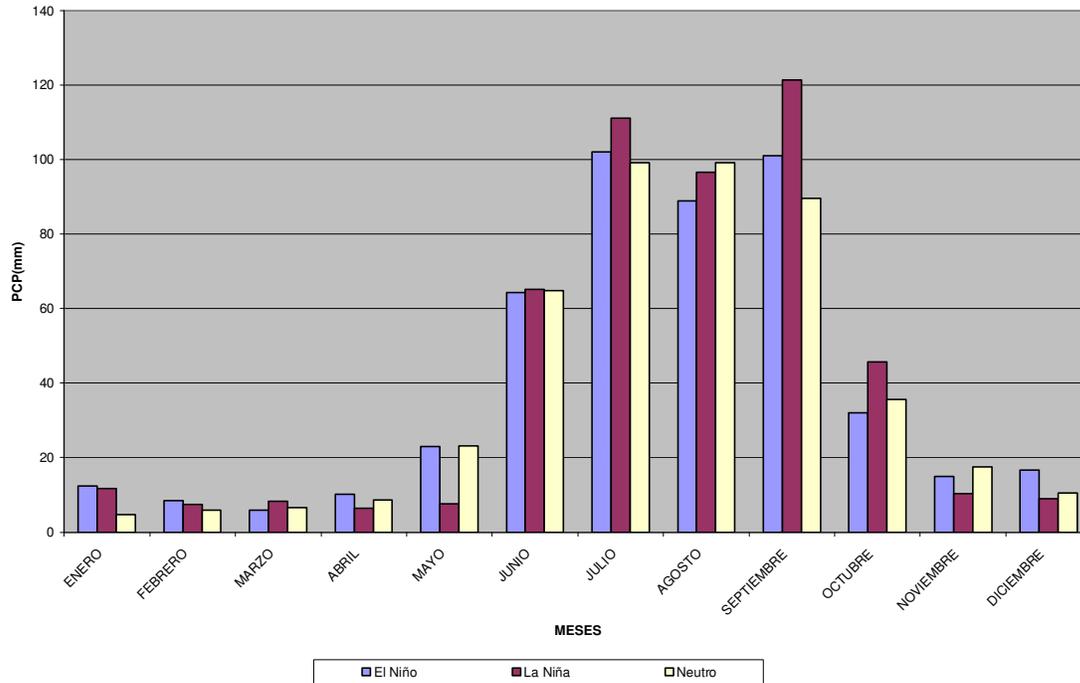


Figura 4.16 Grafica de mínimos de precipitación para años con evento El Niño, La Niña y neutros, por mes. Periodo 1950-2006.

MÁXIMOS

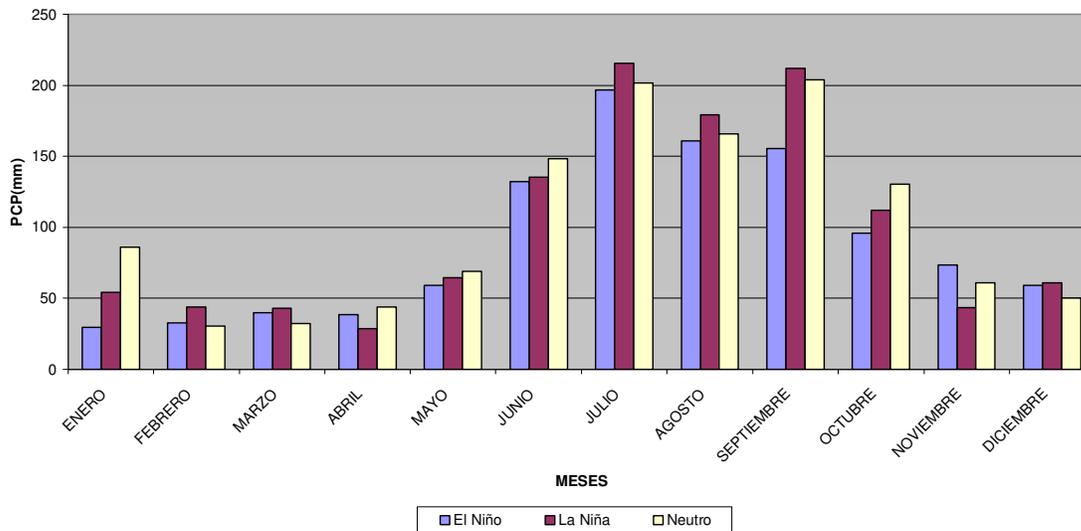


Figura 4.17 Grafica de máximos de precipitación para años con eventos El Niño, La Niña y Neutros, por mes. Periodo 1950-2006.

MINIMOS y MAXIMOS

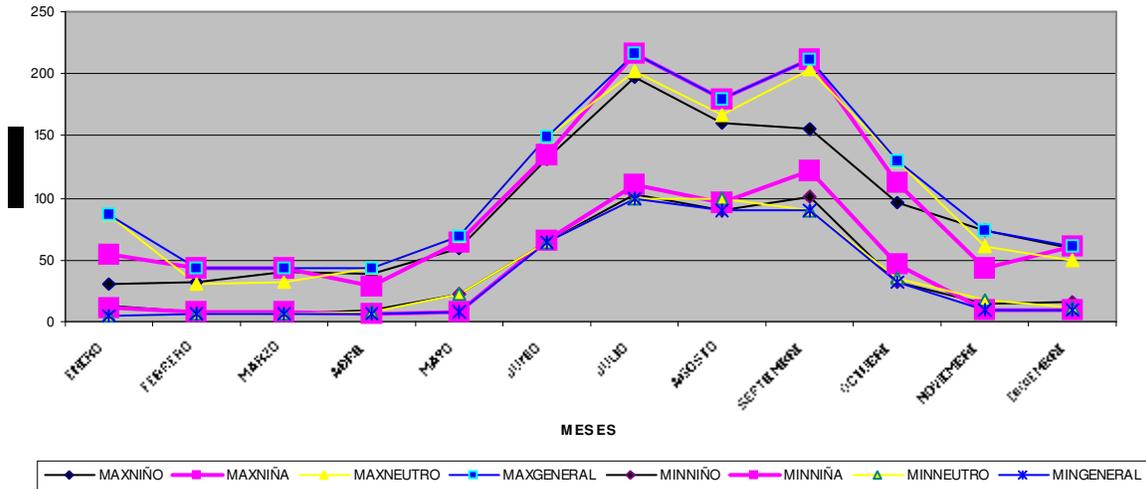


Figura 4.18 Grafica de mínimos y máximos de precipitación para años con eventos El Niño, La Niña y Neutros, por mes. Periodo 1950-2006.

Los mínimos y máximos representados conjuntamente en la **Figura 4.18**, nos muestran correspondencia de ambos valores en eventos La Niña con disminuciones en el mes de agosto tanto en los mínimos como en los máximos mostrándose la sequía intraestival en ese periodo. Para los eventos neutros este periodo de sequía intra estival se ve reflejado en los valores máximos y no en los mínimos para el mismo mes de agosto. Para los eventos El Niño se refleja el periodo de sequía intra estival en los valores mínimos y no en los máximos donde se tiene una correspondencia a disminuir desde el mes de agosto hasta octubre, por debajo del máximo general, máximo La Niña y el máximo neutro.

4.2.7 Análisis de la precipitación en México asociada al ENSO (5 fases)

Aunque ya se habían calculado los años con eventos El Niño y La Niña, se hizo un arreglo en el programa para que este considerara los eventos El Niño fuertes y también los eventos La Niña fuertes en el mismo periodo (1950-2006). Obteniéndose que de los 19 eventos El Niño marcados en la figura 1, 12 eventos El Niño se encontraban por arriba de 1° C de anomalía a estos datos por arriba de 1°C se les dio un indicador en el programa de (2) y para los eventos La Niña se les dio un indicador de (-2), para las anomalías negativas mayores de -1°C. obteniéndose para el evento La Niña, nueve eventos fuertes, **Figura 4.19**.

INDICADOR DE EVENTOS

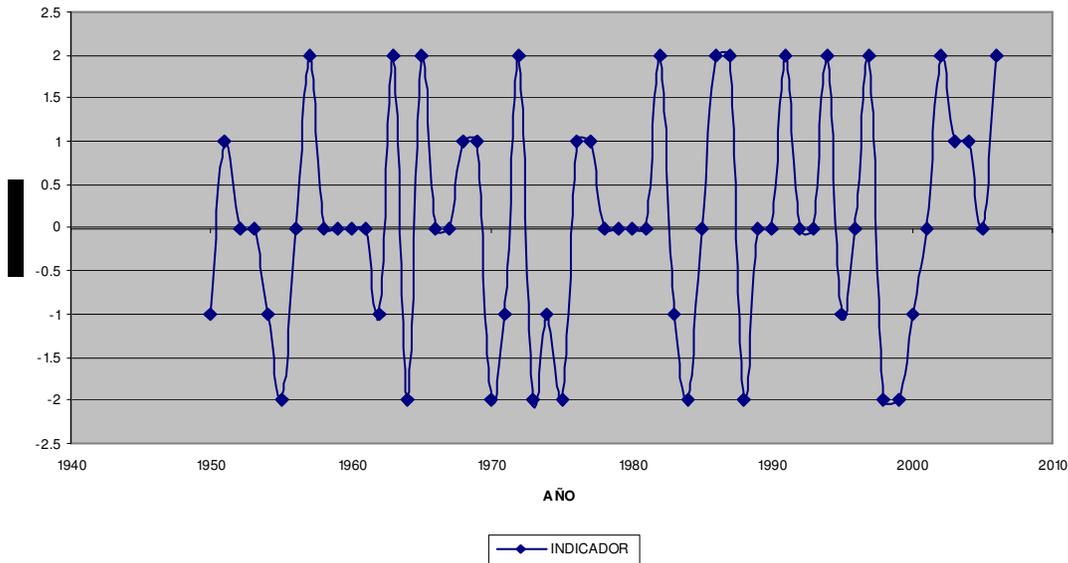


Figura 4.19 Indicador de eventos El Niño fuerte (2), El Niño (1), Neutro (0), La Niña (-1) y La Niña fuerte (-2).

Estas graficas obtenidas se realizaron con el programa en FORTRAN mencionado anteriormente. Este programa se modificó para obtener ahora los eventos de El Niño fuerte y La Niña fuerte, y así tener una clasificación de los 57 años (1950-2006), en que años tuvieron o fueron eventos con El Niño fuerte (12), El Niño(7), Neutro (21), La Niña (8), La Niña fuerte (9) y General (57). Y obtener sus valores máximos y mínimos, y compararlos con el promedio general.

En la **Figura 4.20** se muestran los promedios mensuales en años asociados con los cinco tipos de eventos ENSO anteriormente mencionados. El trimestre mas lluvioso en el promedio general se presenta en temporada de verano (JAS), y el periodo de seca se presenta en el de febrero a abril, con precipitación por debajo de los 20mm. Se observó que para eventos El Niño en temporada de seca (FMA), la precipitación se mantuvo cercana a los 20 mm, pero para el trimestre más intenso de la temporada de lluvias (JAS), los años con eventos El Niño mostraron que empezaron con una precipitación relativamente alta (150mm aprox. En los meses de agosto), y de ahí muestran una tendencia a disminuir. Pero con años con eventos de El Niño fuertes, se muestra marcada la sequía intra-estival en ese periodo (JAS). Para meses con eventos La Niña, los meses mas secos son febrero, marzo y abril; de hecho todos los eventos analizados muestran que esos meses corresponden a la temporada mas escasa de precipitación en el país, con precipitación promedio por debajo de los 20mm. Es de llamar la atención que en años con eventos El Niño y El Niño fuertes, las precipitaciones son más fuertes en los meses de julio y para eventos La Niña y La niña fuertes, las precipitaciones se presentan en

mayor cantidad en los meses de septiembre. Existe un desfase de la precipitación cuando se presenta un evento El Niño la precipitación más fuerte de la temporada se presenta en los meses de julio, pero cuando se presenta un evento La Niña, la precipitación más fuerte se presenta hasta el mes de septiembre, existiendo así un corrimiento de esta cuando se presenta cada evento.

PROMEDIOS DE PRECIPITACION MENSUAL EN AÑOS CON EVENTOS EL NIÑO FUERTE, EL NIÑO, NEUTRO, LA NIÑA, LA NIÑA FUERTE Y GENERAL PERIODO (1950-2006)

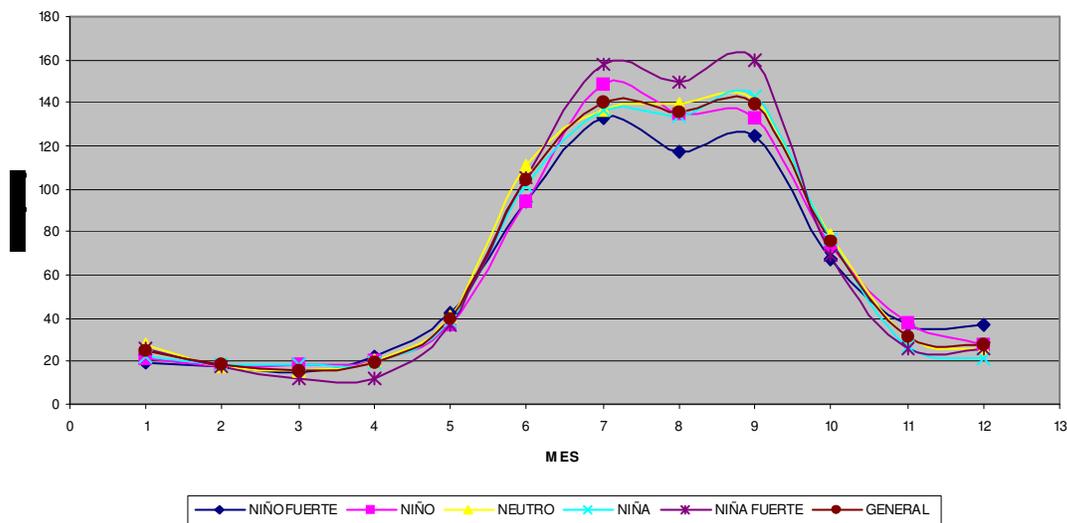


Figura 4.20 Promedios de precipitación mensual en años con eventos El Niño fuerte, El Niño, neutro, La Niña, La Niña fuerte y general. Periodo (1950-2006).

Para la **Figura 4.21** se presentan los valores mínimos y máximos considerando los eventos de El Niño fuerte y La Niña fuerte. En esta grafica se muestra que los valores en los que los eventos de La Niña fuerte se igualan a los valores máximos, así se puede deducir que los eventos de La Niña fuerte son los que traen la mayor cantidad de precipitación en los meses de julio y septiembre, para México. En los meses de marzo y abril la diferencia entre La Niña fuerte máxima y mínima es muy pequeña.

MINIMOS Y MAXIMOS

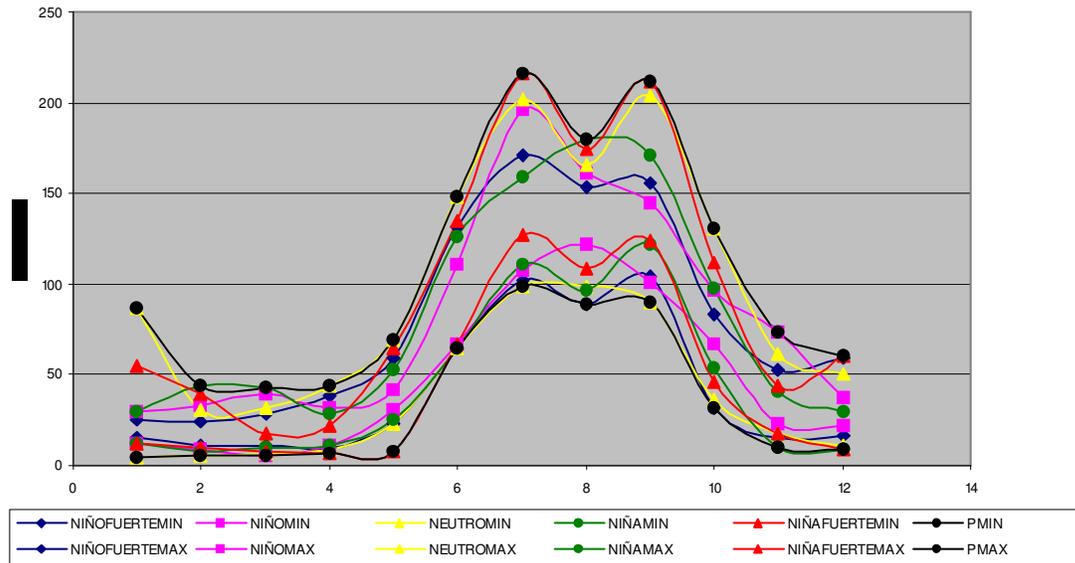


Figura 4.21 Mínimos y máximos con eventos de El Niño fuerte y La niña fuerte. Periodo 1950-2006.

Los máximos de los eventos El Niño fuerte, se mantienen por debajo de los puntos máximos generales y los mínimos de los eventos de El Niño fuerte se mantienen ligeramente por arriba de los puntos mínimos generales. El máximo cuando se presenta un Niño fuerte ocurre en el mes de julio, pero el valor mayor para el mínimo de un evento El Niño fuerte ocurre para septiembre. Para el valor mayor del máximo de un evento La Niña fuerte este ocurre en julio y el valor mayor del mínimo ocurre para el mismo mes.

4.2.8 Conclusiones

Se han evaluado las tendencias históricas del ENSO ocurridas en las décadas pasadas y se han estimado las tendencias futuras para las próximas décadas. Se estima que el ENSO ha pasado en los fines de 1990 de una tendencia hacia una fase cálida, hacia una tendencia hacia una fase fría.

La lluvia en la república mexicana es afectada por la variabilidad del ENSO. Sus efectos promedio y sus tendencias a valores extremos se han evaluado para diferentes fases del ENSO.

Respecto a la variabilidad climática, se puede decir que los resultados sugieren la existencia de oscilaciones multidecenales (OM) en el ENSO. Estas OM no solo se manifiestan en las tendencias de lluvia a nivel estatal, sino también, permiten explicar el aumento de actividad ocurrida en las últimas 3 décadas como debida no solo a la

tendencia de largo plazo causada por el calentamiento global o GW, sino también a la variabilidad climática del ENSO.

Agradecimientos

Este trabajo fue llevado a cabo con el apoyo del CONACYT y de la CONAGUA al proyecto S0013-2006-1-48492, y con la ayuda del Instituto México Estados Unidos de la Universidad de California.

4.2.9 Referencias

Allan, R.J. (2000), ENSO and climatic variability in the past 150 years. In *El Niño and the Southern Oscillation, Multiscale Variability and Global and Regional Impacts*, Diaz HF, Markgraf V (eds). Cambridge University Press: New York; 3-55.

Allan, R. J. and R. D. D'Arrigo. 1999. 'Persistent' ENSO sequences: how unusual was the 1990-1995 El Niño? *The Holocene* 9: 101-118. Allan, R.J., Nicholls, N., Jones, P.D. and Butterworth, I.J., 1991: A further extension of the Tahiti-Darwin SOI, early SOI results and Darwin pressure. *J. Climate* 4, 743-749.

Ammann, C. and P. Naveau, 2003: Statistical analysis of tropical explosive volcanism occurrences over the past 6 centuries. *Geophys. Res. Lett.*, 30(5), 1210, doi:10.1029/2002GL016388

Auad, G., (2003), Interdecadal dynamics of the North Pacific Ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, 33, 2483, doi:10.1175/1520-0485,033.

Carton, J., B. Giese (2007), SODA, a reanalysis of ocean climate. Submitted to *Journal of Geophys. Res.*

Cobb, K., C. Charles, H. Cheng, and R. Edwards (2003), El Niño/Southern Oscillation and tropical Pacific climate during the last millennium, *Nature*, 424, 271-276.

D'Arrigo, E. Cook, R. Wilson, R. Allan, and M. Mann (2005), On the variability of ENSO over the past six centuries. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (L03711).

Evans, M, A. Kaplan, and M. Cane (2002), Pacific sea surface field reconstruction from coral 18O data using reduced space objective analysis. *Paleoceanography*, 17,

García-Herrera, R. H.F. Diaz, R.R. Garcia, M.R. Prieto, D. Barriopedro, R. Moyano, and E. Hernández (2008), A chronology of El Niño events from primary documentary sources in Northern Peru. *J. Climate*, 21, 1949-1963.

Gergis, J.L. and A.M. Fowler (2005), Classification of the synchronous oceanic and atmospheric El Niño-Southern Oscillation (ENSO) events for paleoclimate reconstruction. *Intl. J. Climatol.*, 25, 1541-1565.

Gershunov, S. and T. Barnett (1998), Interdecadal modulation of ENSO Teleconnections, *Bull. Am. Met. Soc.*, 79,2715-2725.

Gilliland, R., 1981. Solar radius variations over the past 265 years. *Astrophys. Jour.* 258:1145-1155.

Keenlyside. N.S., M. Latif, J. Jungclaus, et al., 2008: Advancing decadal-scale climate prediction in the North Atlantic sector. *Nature*.

Können, G.P., Jones, P.D., Kaltofen, M.H. and Allan, R.J., 1998: Pre-1866 extensions of the Southern Oscillation Index using early Indonesian and Tahitian meteorological readings. *J. Climate* 11, 2325-2339.

Magaña, V., J.L. Perez, et al. (1999). Los impactos de El Niño en México. En Escobar, B. Elva, Bonilla Marcial, Badán Antonio, Caballero Margarita y Winckell Alain. "Los efectos de El Niño en México: 1997-1998".2001,. México, D.F. CONACYT y Secretaría de Gobernación. México, D.F. pp. 17-24.

Mann, M. E., R. S. Bradley, and M. K. Hughes (2000), Long-term variability in the ENSO and associated teleconnections. In ENSO: Multiscale Variability and Global and Regional Impacts, edited by H. F. Diaz and V. Markgraf, pp. 357-412, Cambridge Univ. Press, New York.

Ortlieb L. (2000), The documentary historical record of El Niño events in Peru: An update of the Quinn record. In Diaz, H. F. and V. Markgraf (eds.), El Niño and the Southern Oscillation. Multiscale Variability and Global and Regional Impacts. Cambridge University Press, Cambridge and New York, 207-295.

PFMC 2006, Research and Data Needs 2006-2008, Pacific Fishery Management Council, www.pfcouncil.org, December 2006, p45.

Quinn, W.H., and V.T. Neal, 1992: The historical record of El Niño events. In R.S. Bradley and P.D. Jones (eds.), Climate Since A.D. 1500. Routledge, London, 623-648.

Stahle, D., et al. (1998), Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 2137-2152.

Ropelewski, C.F. and Jones, P.D., 1987: An extension of the Tahiti-Darwin Southern Oscillation Index. *Monthly Weather Review* 115, 2161-2165.

Sánchez-Sesma, J., 2002. Extreme climatic and hydrologic events associated with El Niño Southern Oscillation: analysis (1500-1999) and forecast (2000-2050). The Extremes of the Extremes: Extraordinary Floods. Edited by Árni Snorasson, Helga P. Finnsdóttir & Marshall E. Moss. IAHS Publication no. 271 (published March 2002) in the IAHS Series of Proceedings and Reports. ISBN 1-901502-66-X; 394+ xiv pp

Sánchez-Sesma, J., 2008a, An Atlantic Tropical Cyclone Intensification Index for the last 2000 years: Assessment and verification of a ~510 yr climate oscillation based on proxy records. *Journal of Climate* (sent).

Sánchez-Sesma, J., 2008b, A ~79 year Oscillation of ENSO: An element for Multi-decadal Climate Forecast. (In preparation).

Sánchez-Sesma, J., 2008c, Atlantic Tropical Cyclone Frequency 2008-2010: An Experimental Forecast Based on Multi-decadal Analogues (to be sent).

R. Prieto, M. Montero, J. Sánchez-Sesma y W. Ojeda, 2007. Determinación de períodos de sequía y lluvia intensa (droughts and floods) en diferentes regiones de México ante escenarios de cambio climático, Proyecto TH-0762.3, Informe final, 2007.

Tourre, Y. M., and W. B. White (2006), Global climate signals and equatorial SST variability in the Indian, Pacific and Atlantic oceans during the 20th century. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L06716, doi:10.1029/2005GL025176.

White., W., J. Lean, D. Cayan and M. Dettinger (1997), Response of global upper ocean temperature to changing solar irradiance, *J. Geophys. Res.*, 102, 3255–3266

Wolter, K., and M. S. Timlin, 1998: Measuring the strength of ENSO events—how does 1997/98 rank? *Weather*, 53, 315-324.

Zhang, Y, J. Wallace, R. Battisti (1997), ENSO-like interdecadal variability: 1900:1903, *J. Climate*, 10, 1004-1020.

WEBLIOGRAFIA.

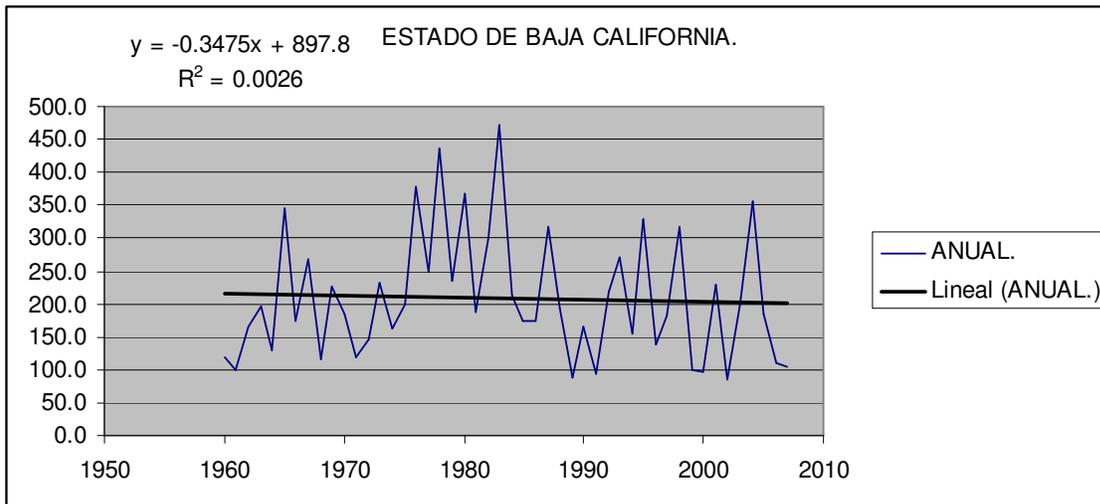
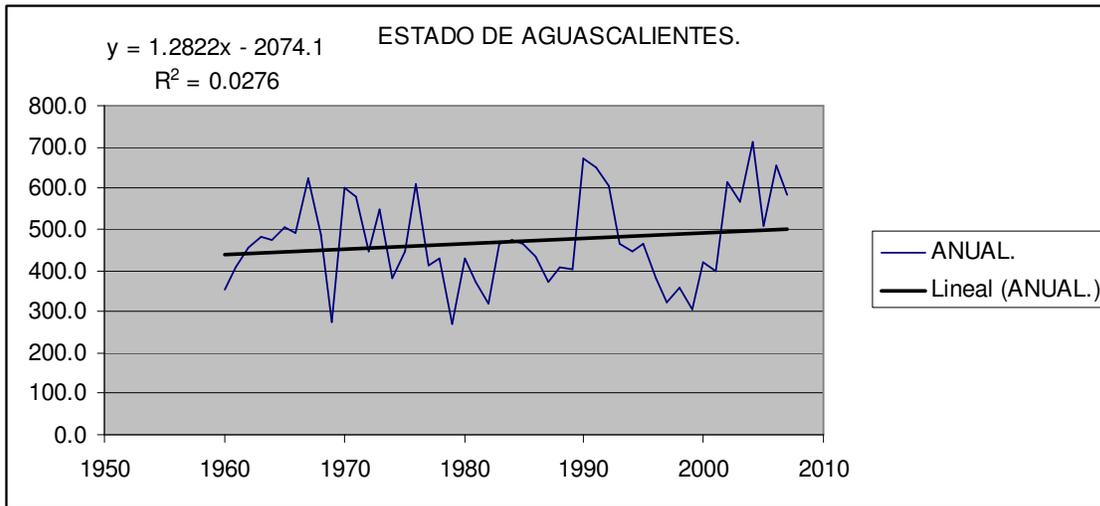
<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/sstoi.indices>

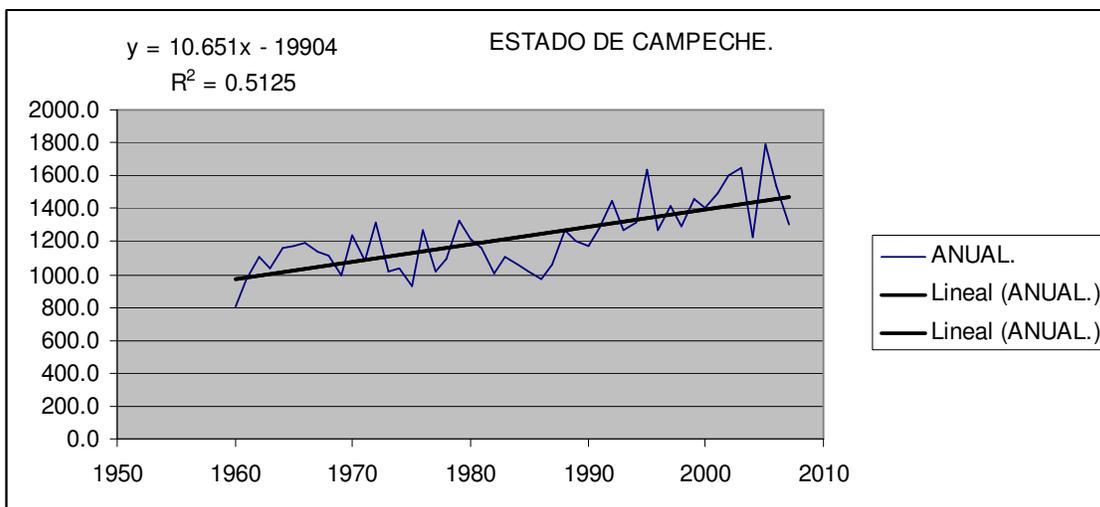
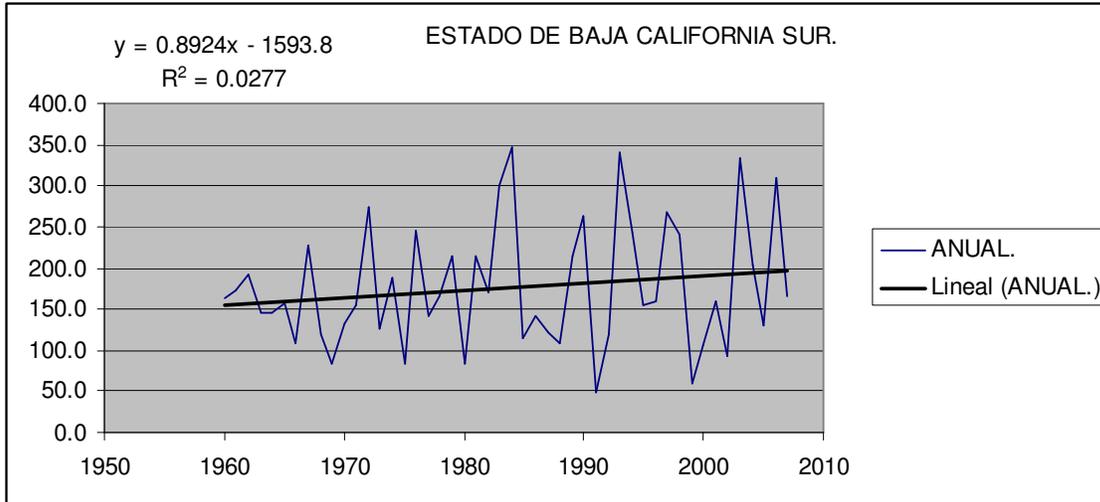
http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml

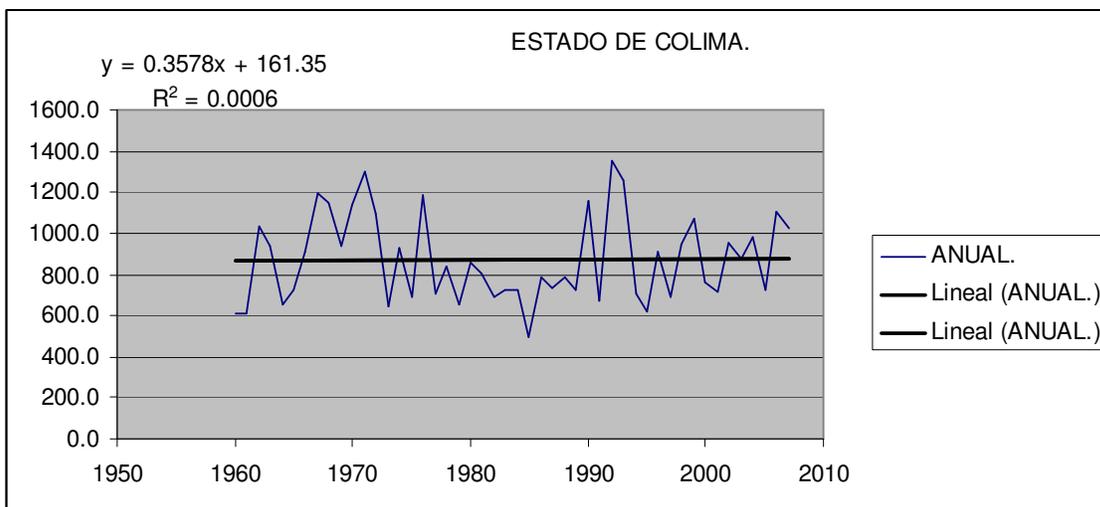
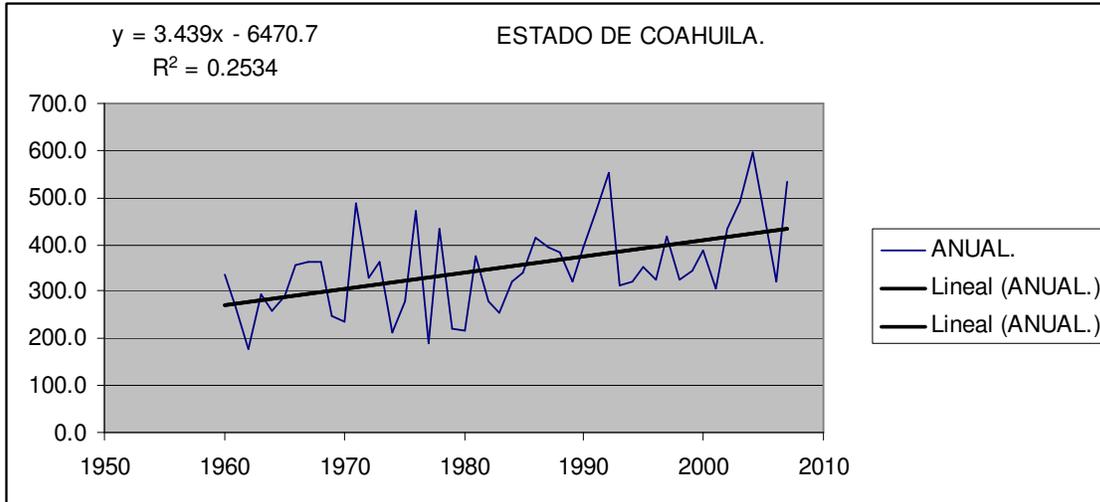
<http://www.cambioglobal.org/enso/informes/anho1/eeuu/componentes.htm>

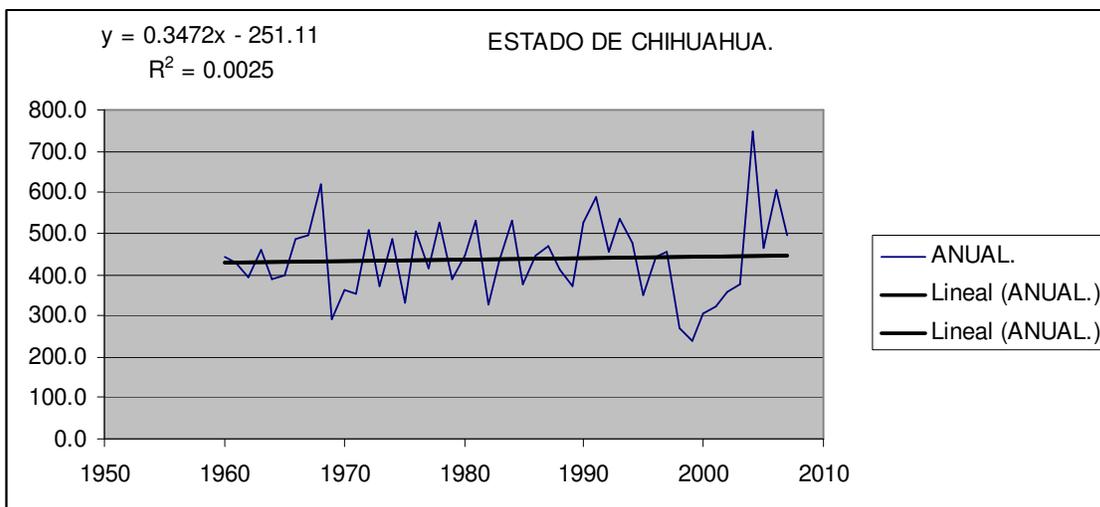
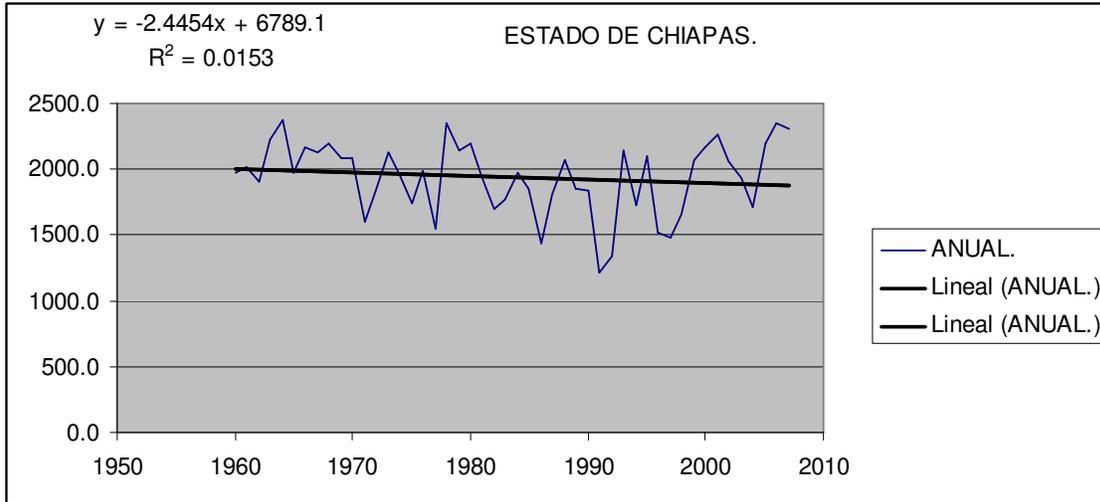
4.2.10 Anexos

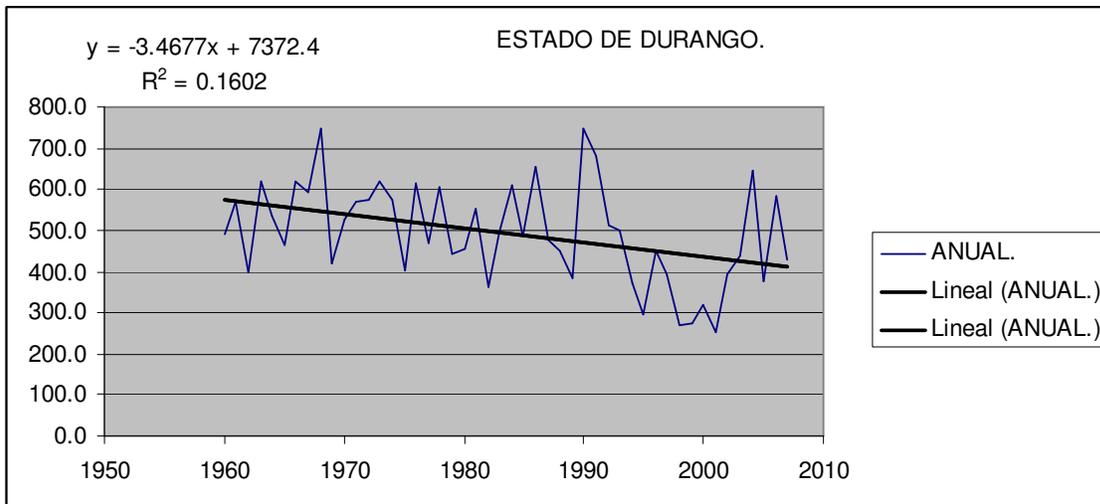
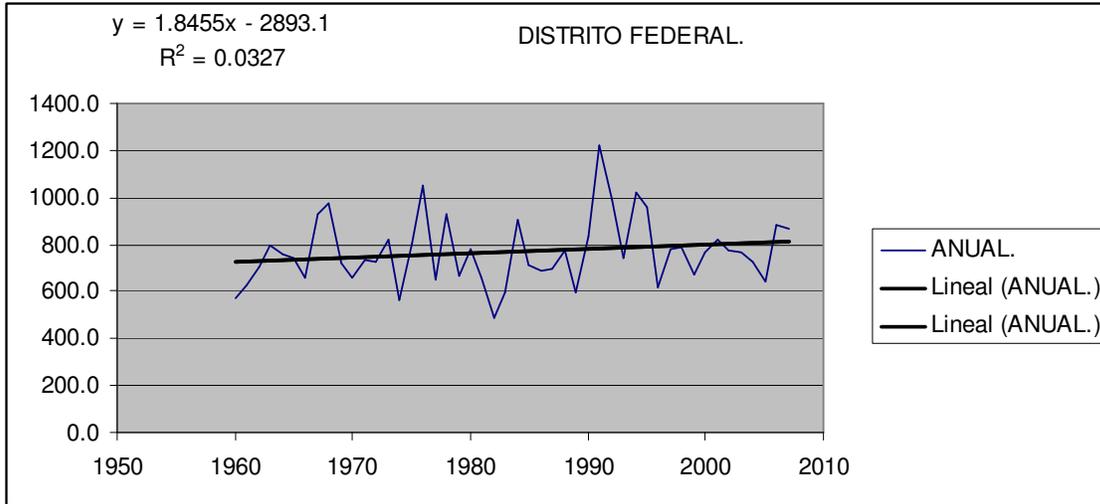
Anexo A: Tendencias de lluvia acumulada anual.

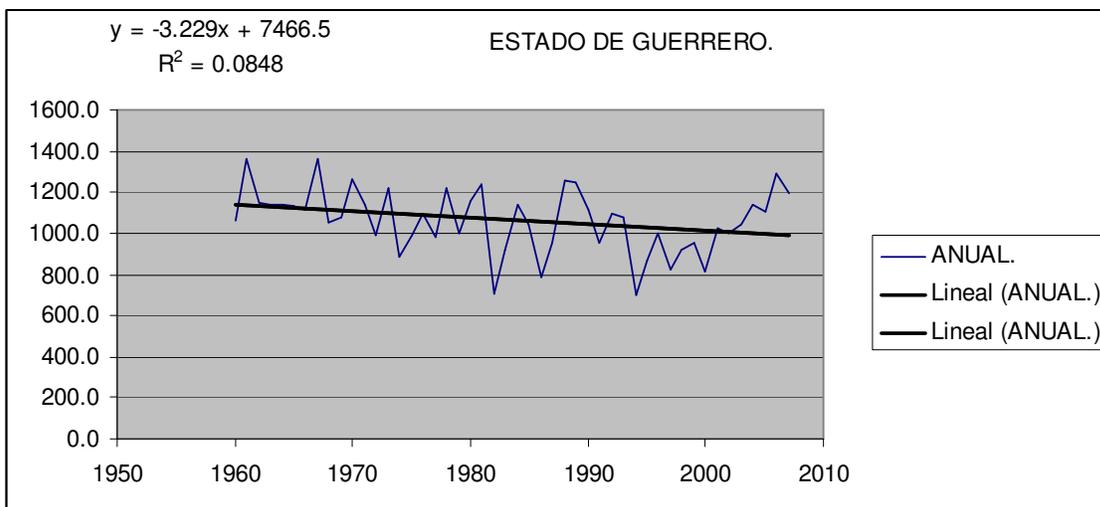
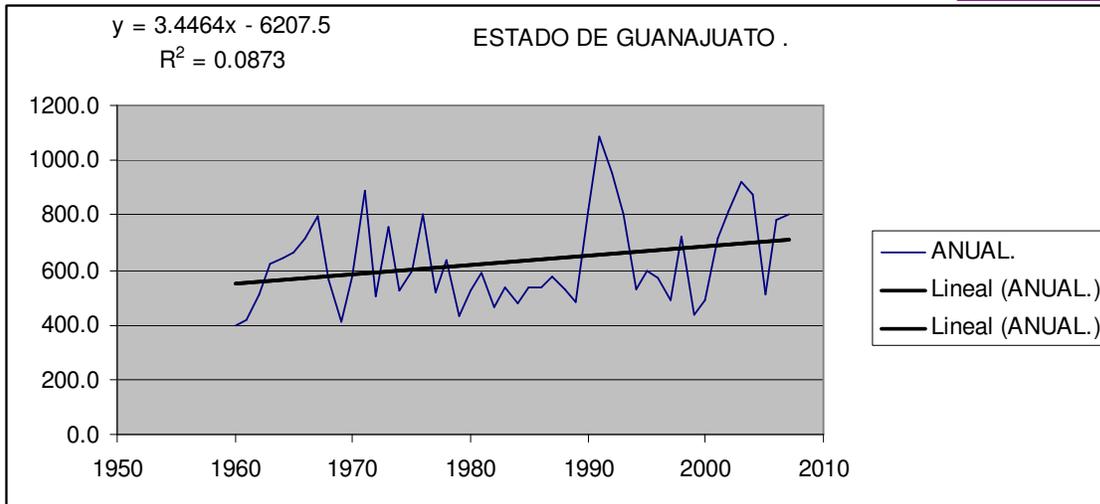


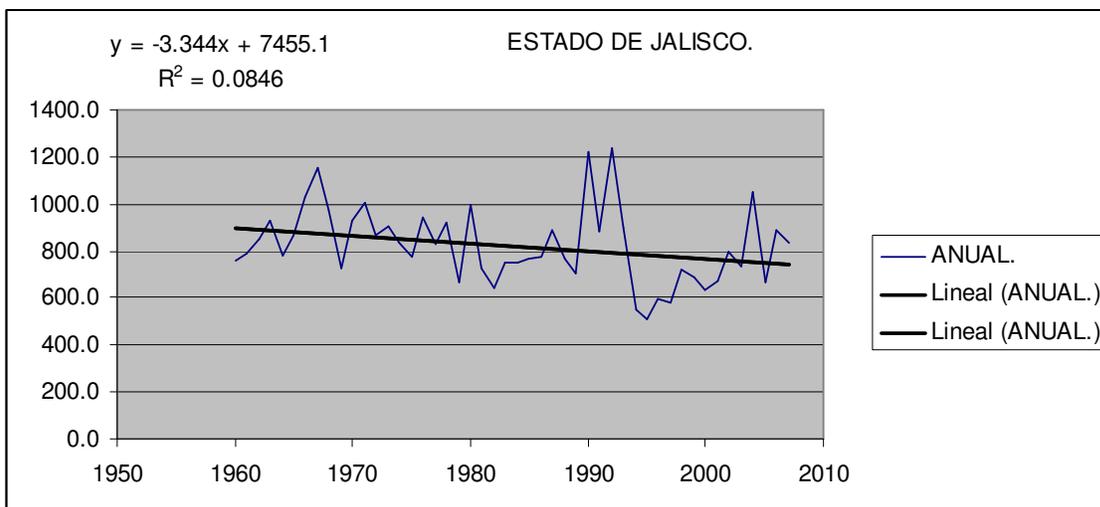
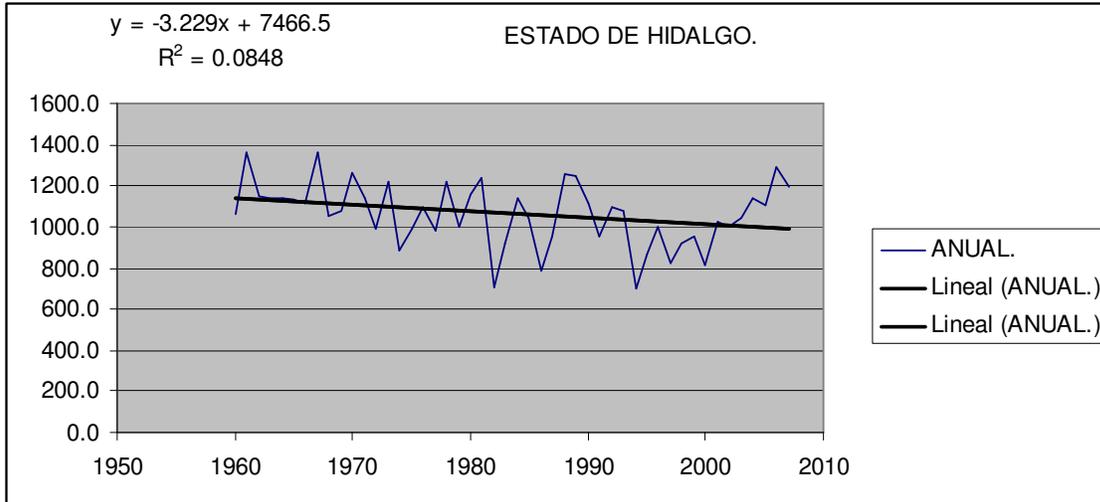


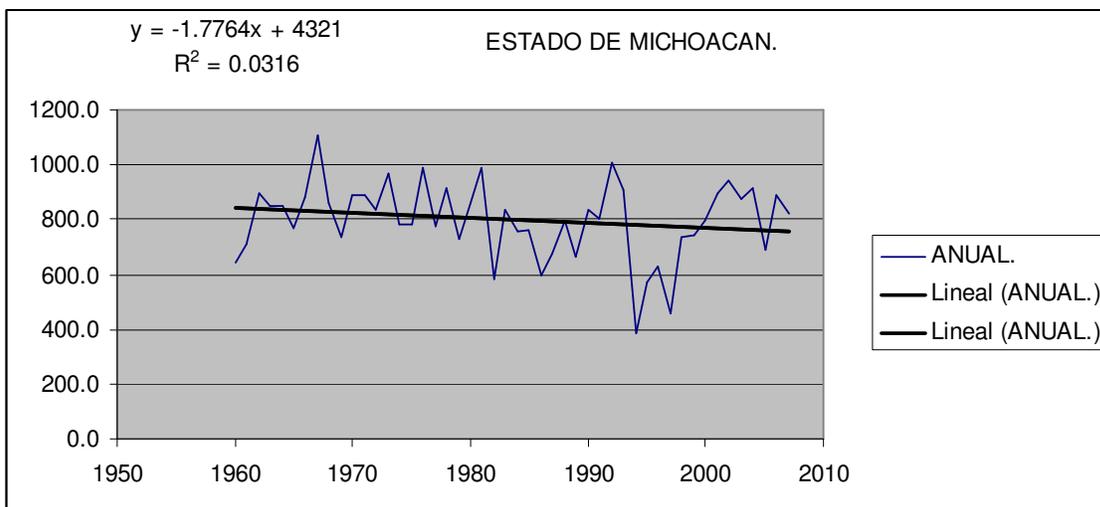
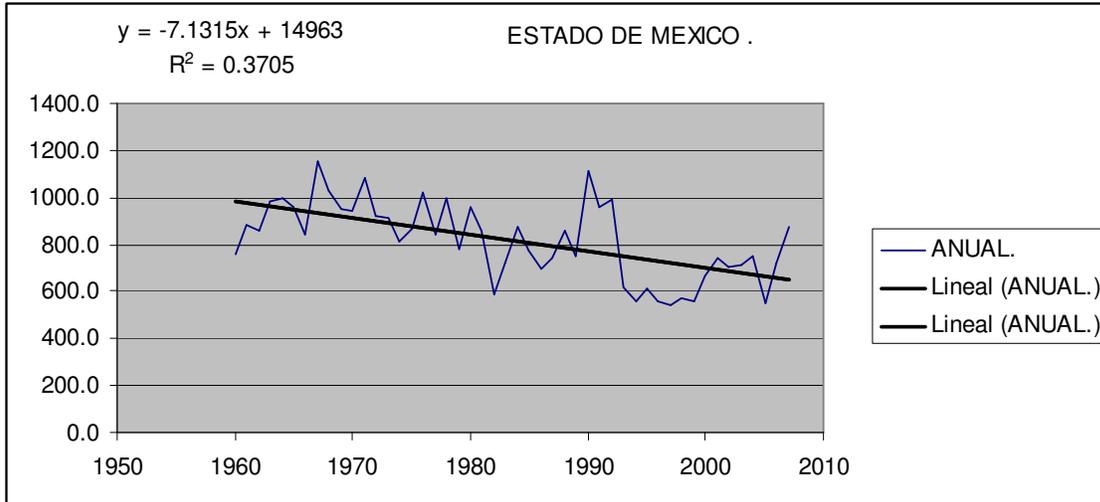


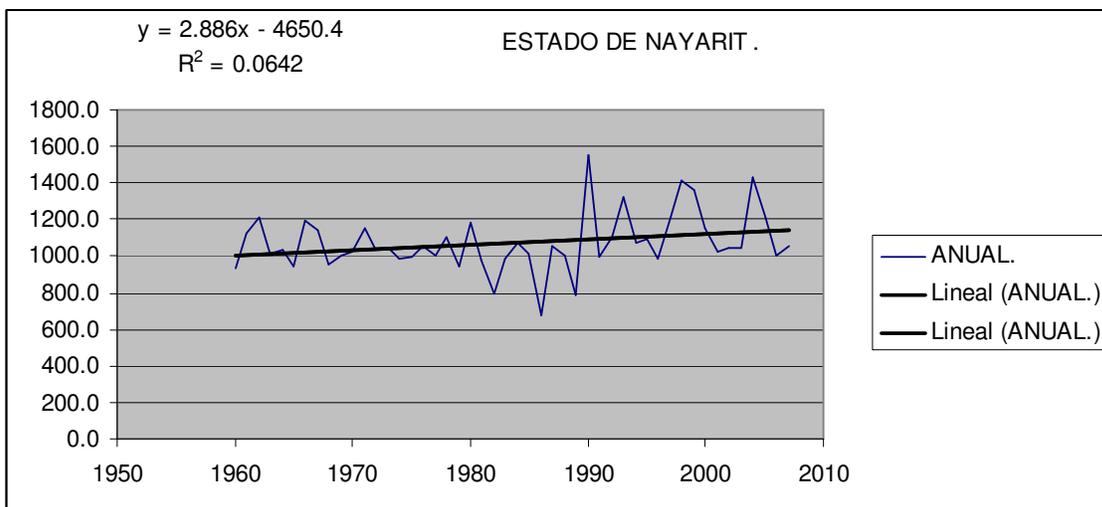
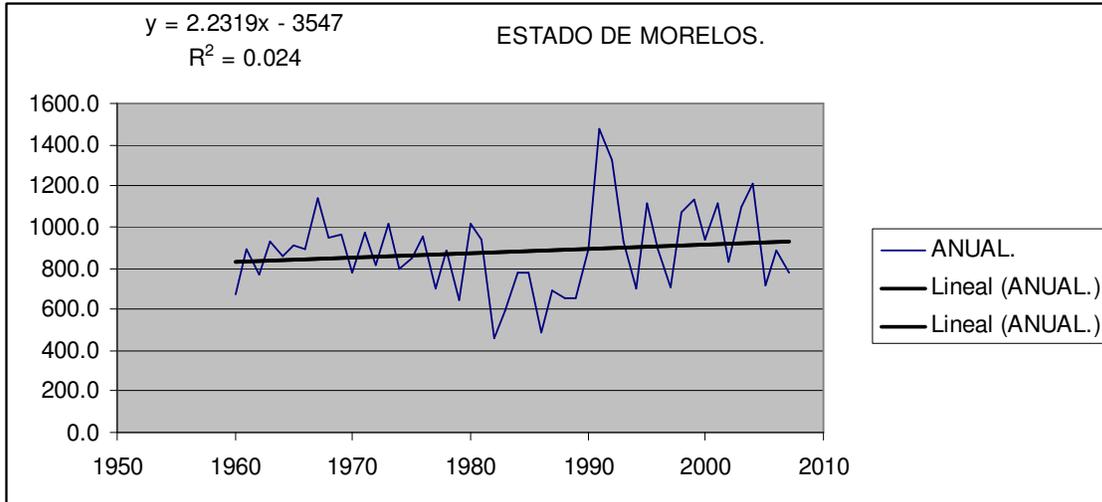


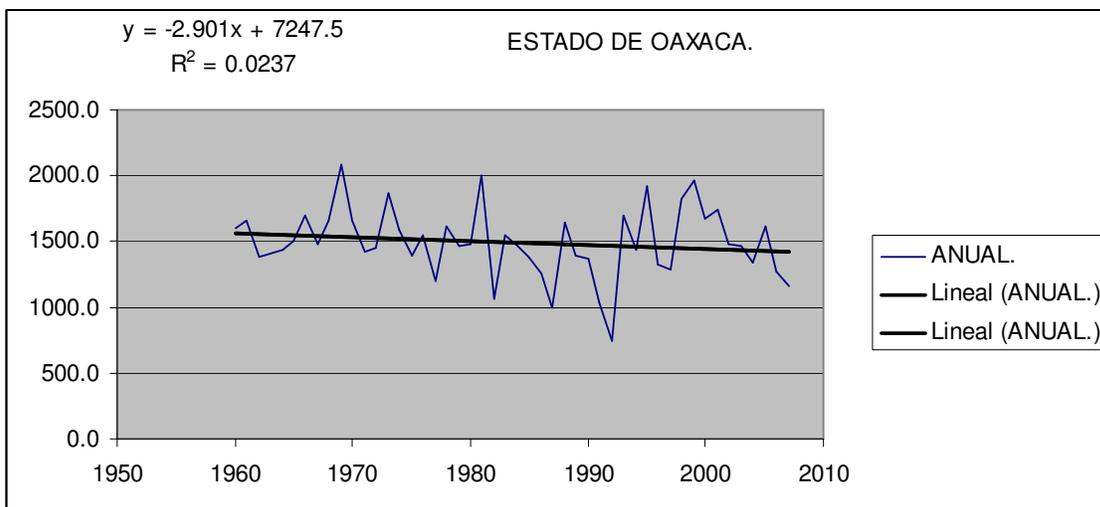
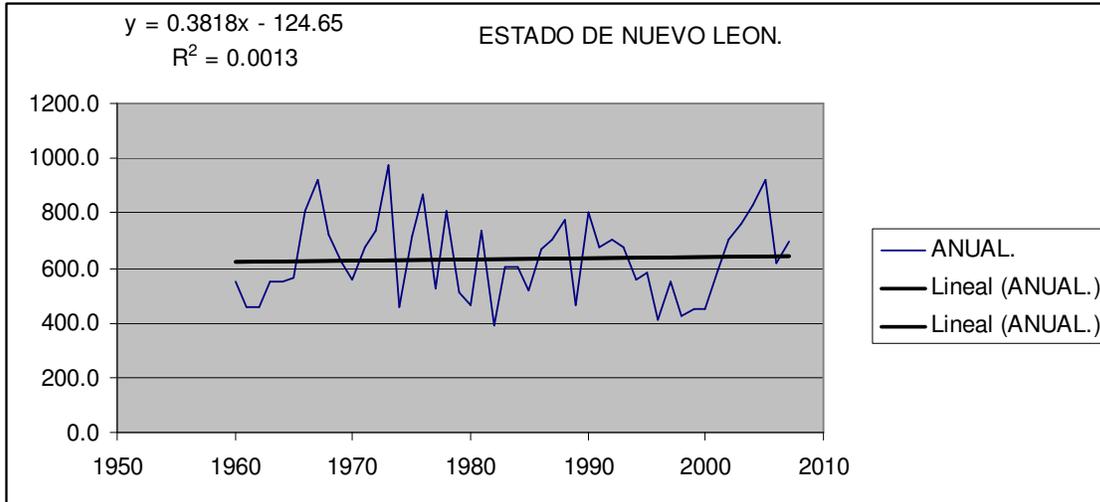


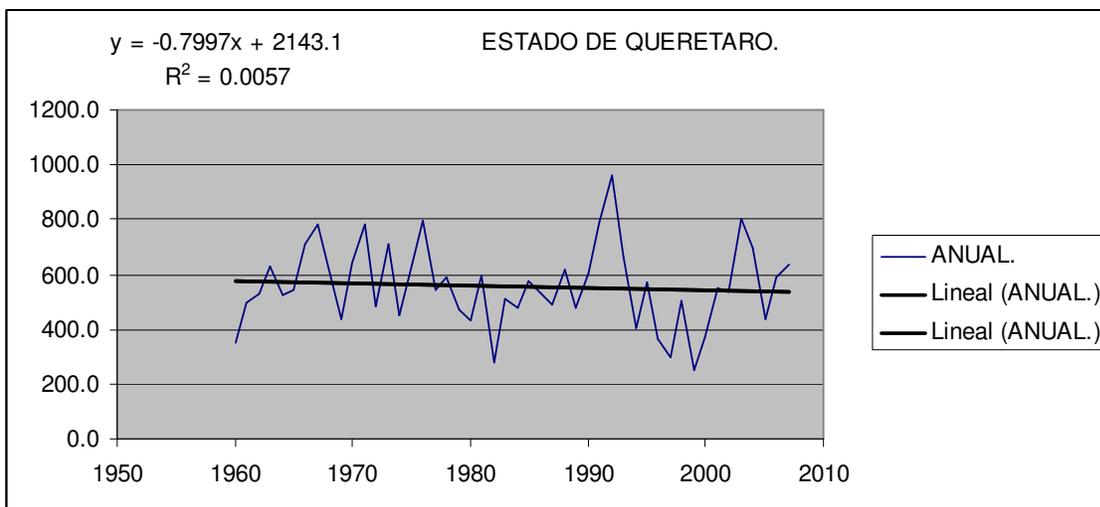
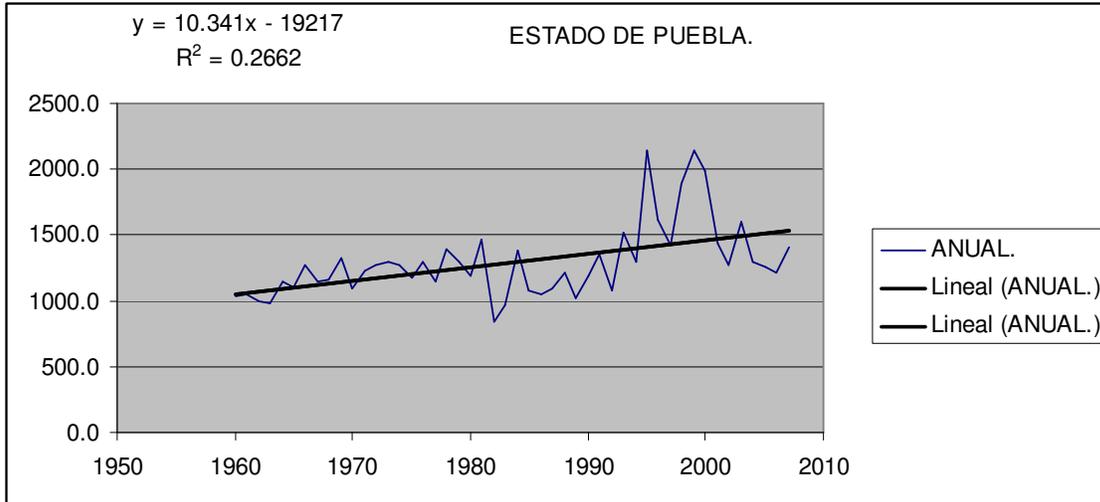


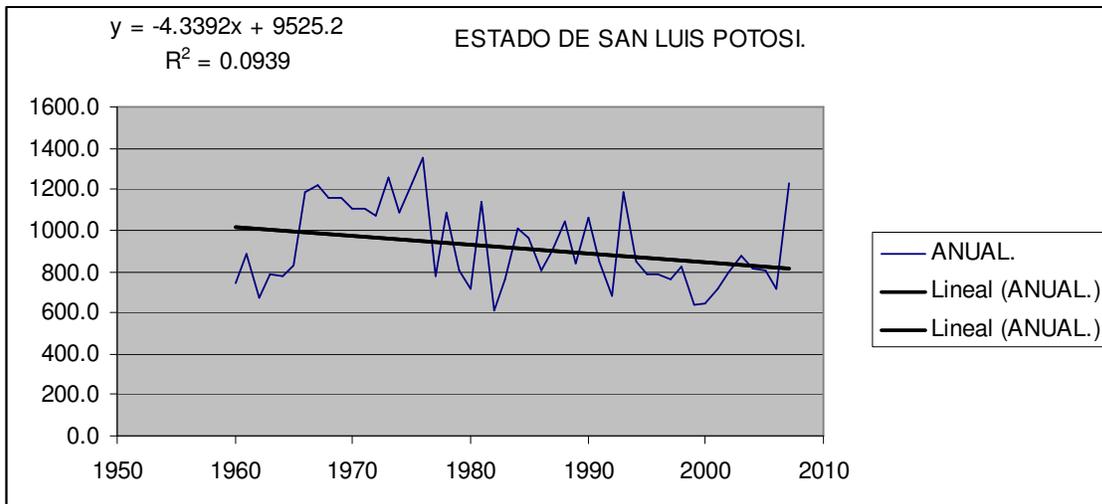
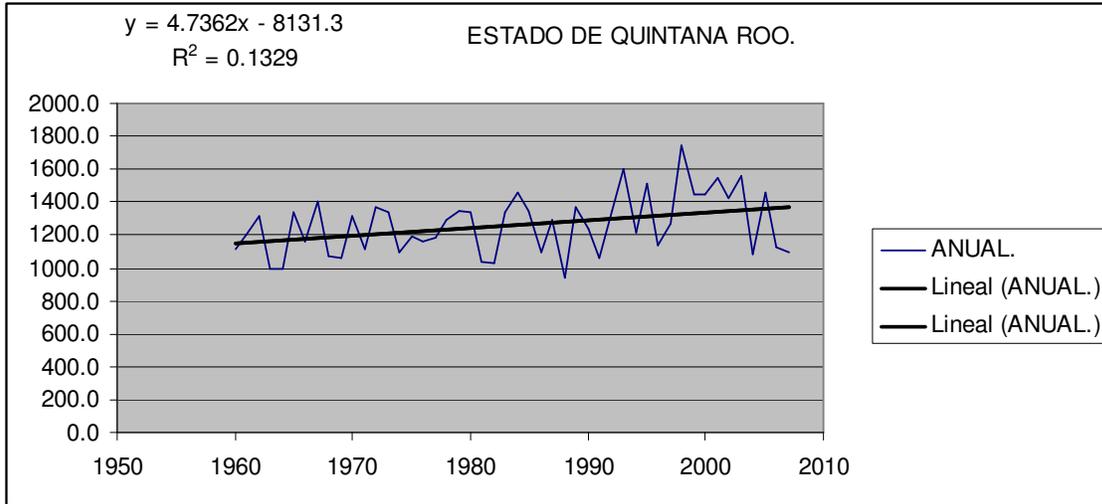


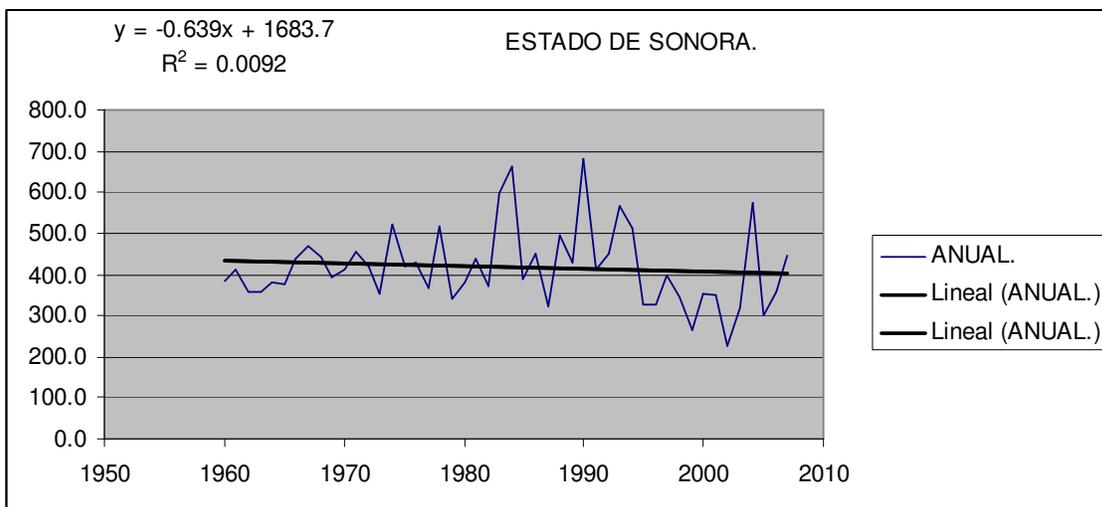
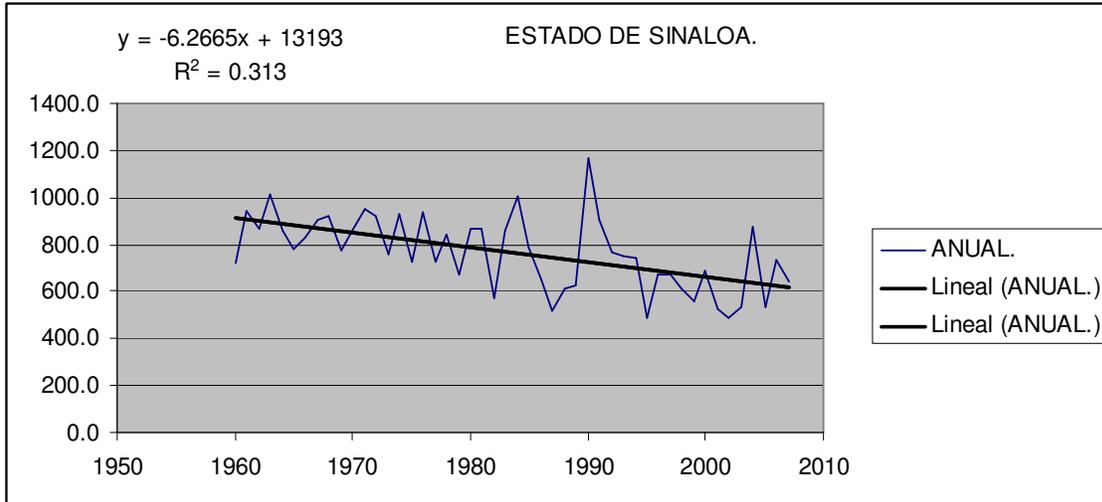


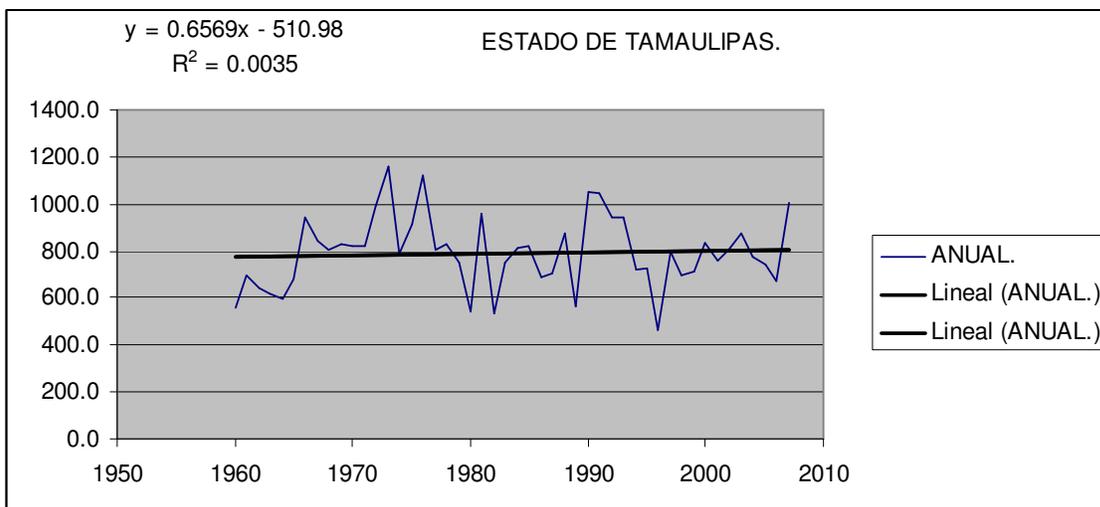
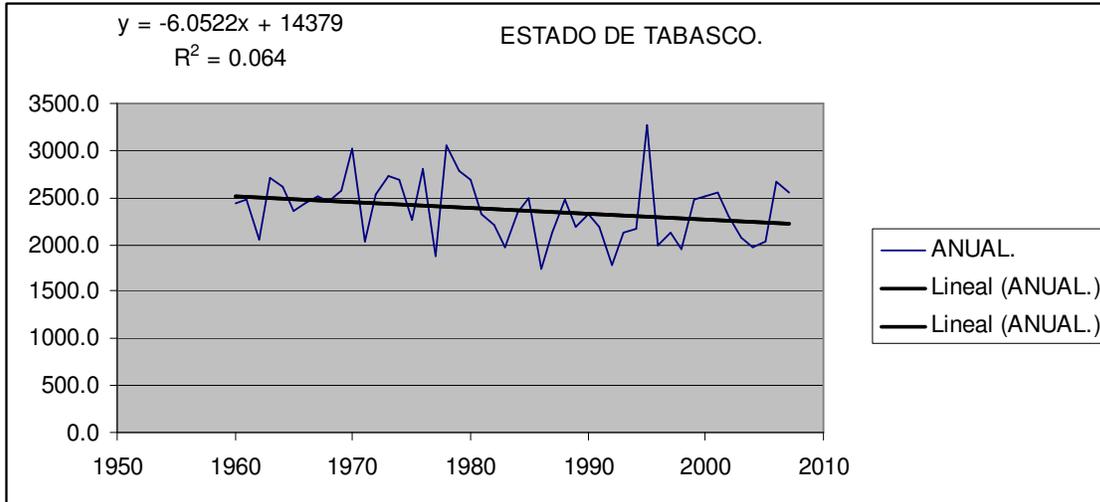


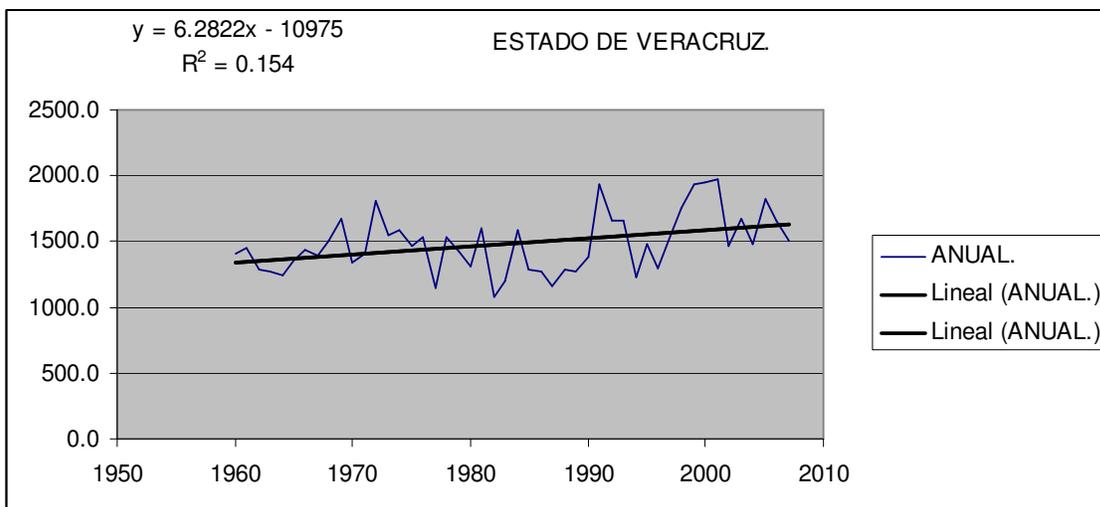
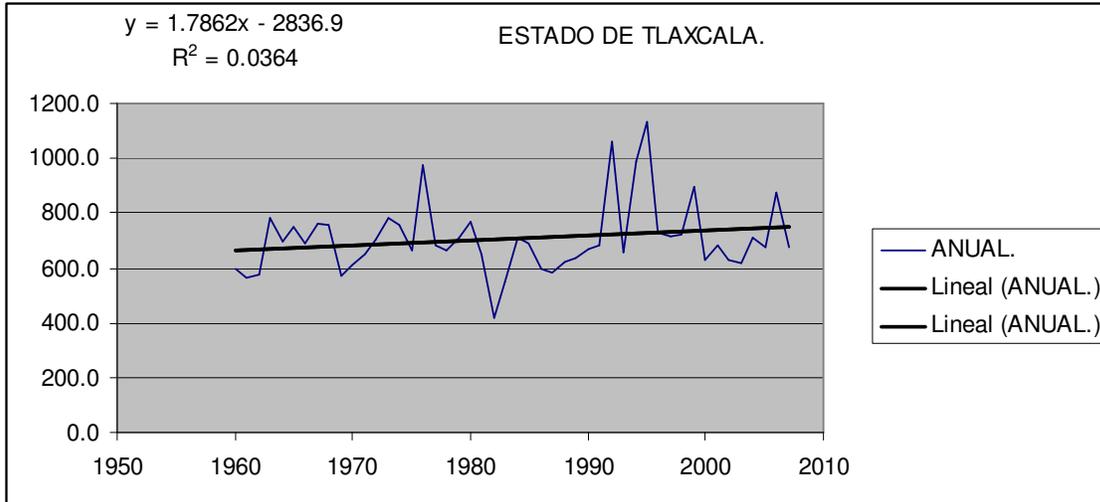


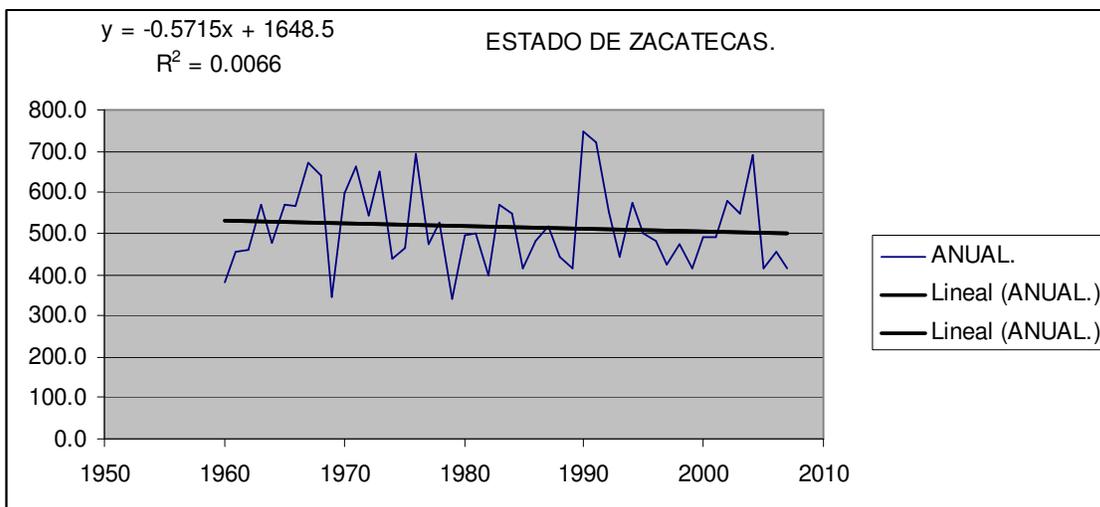
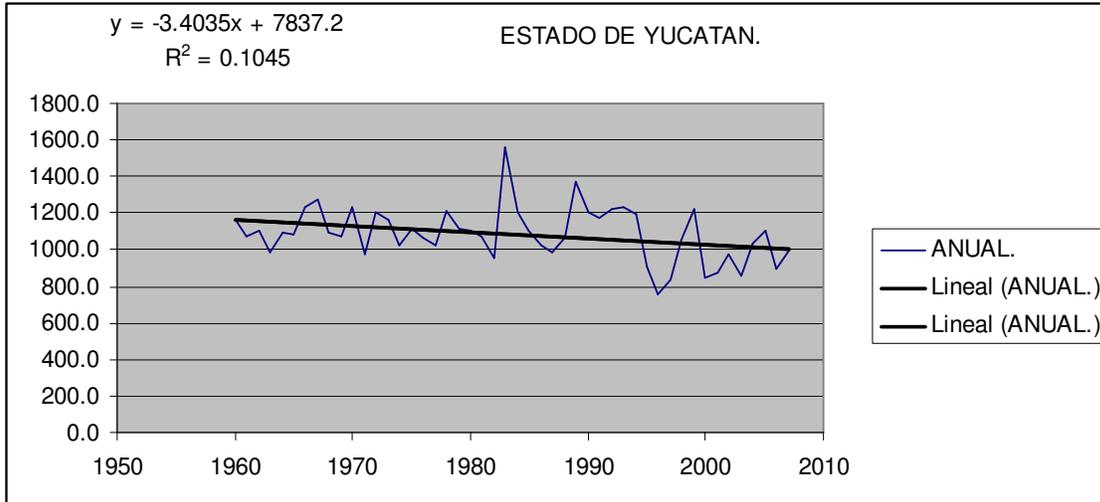




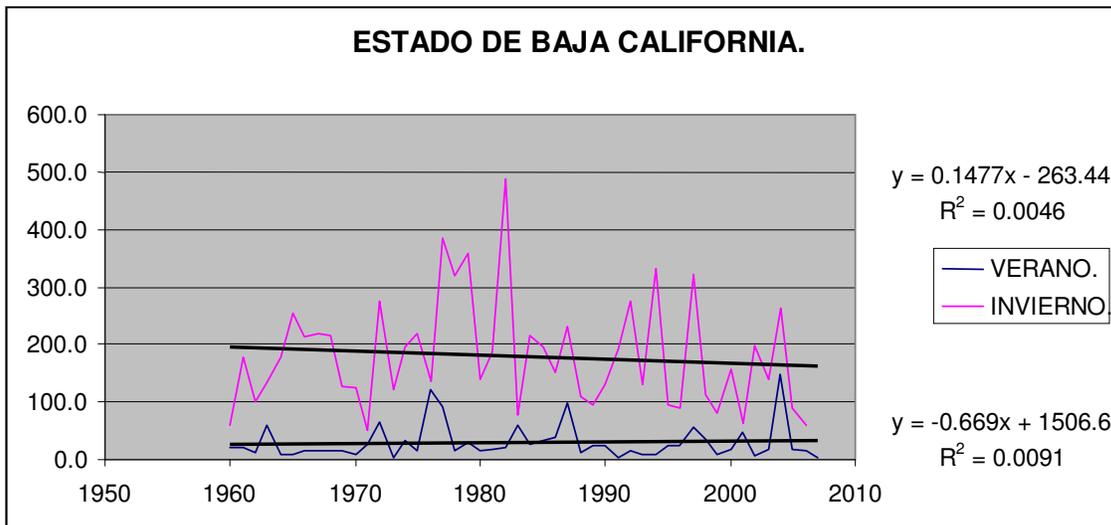
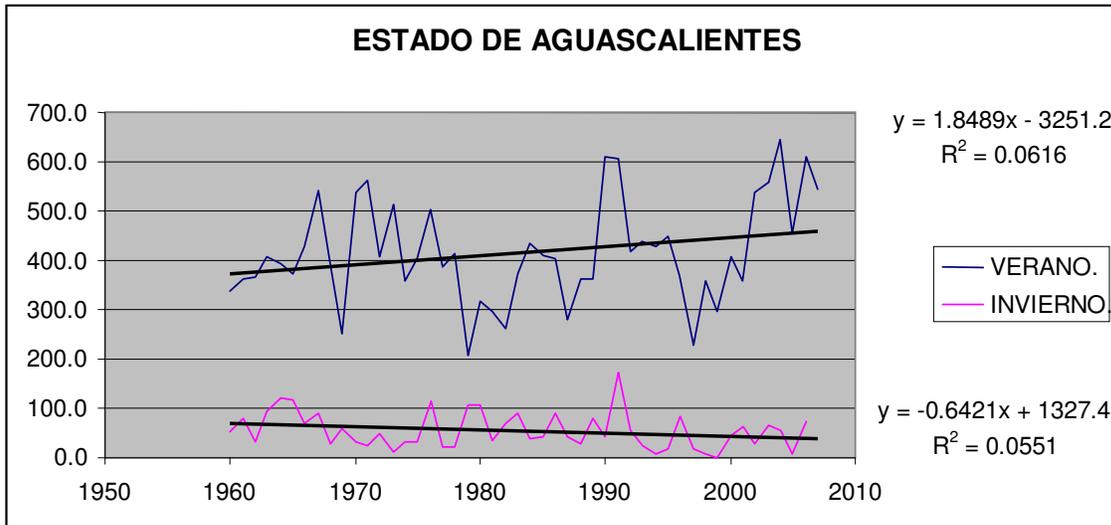


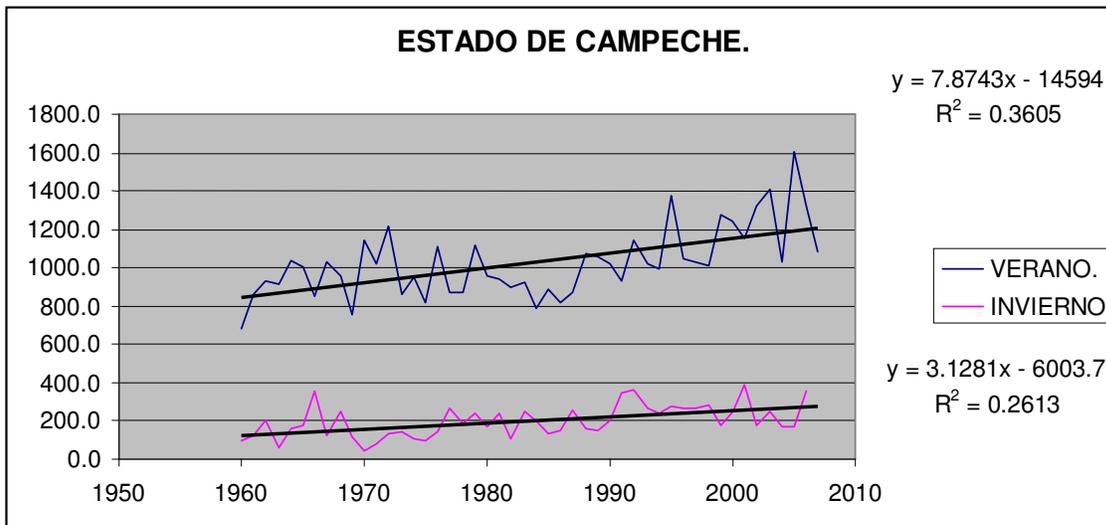
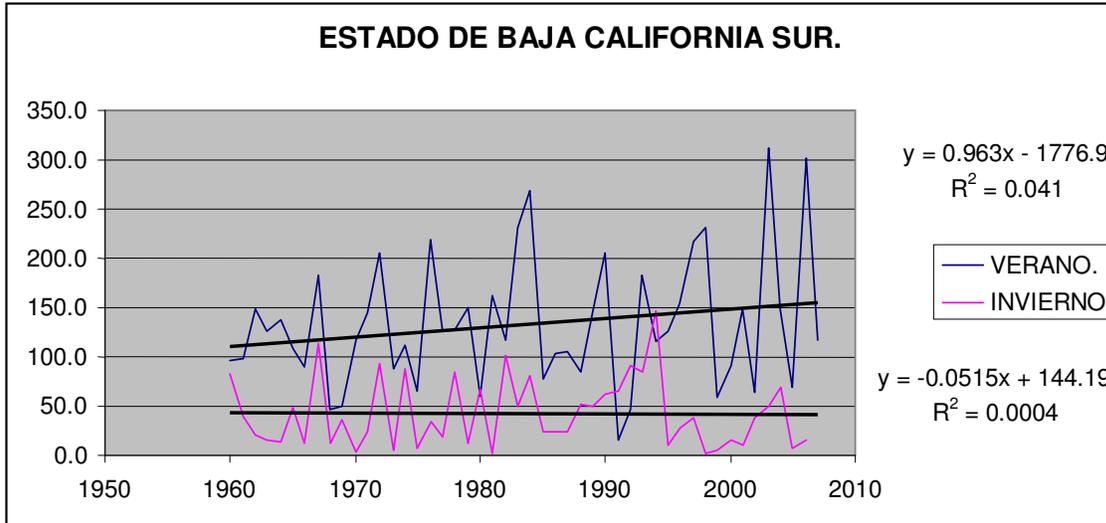


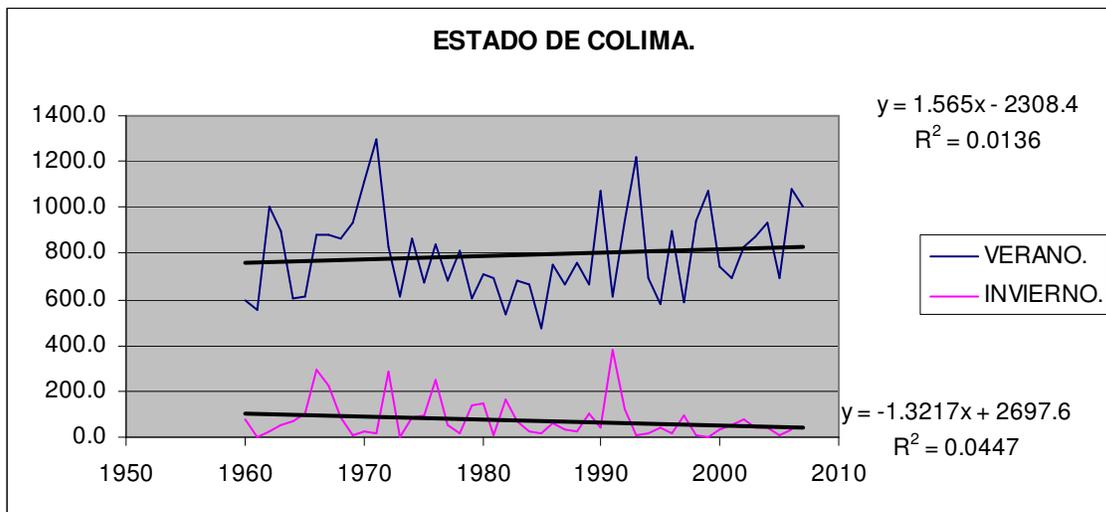
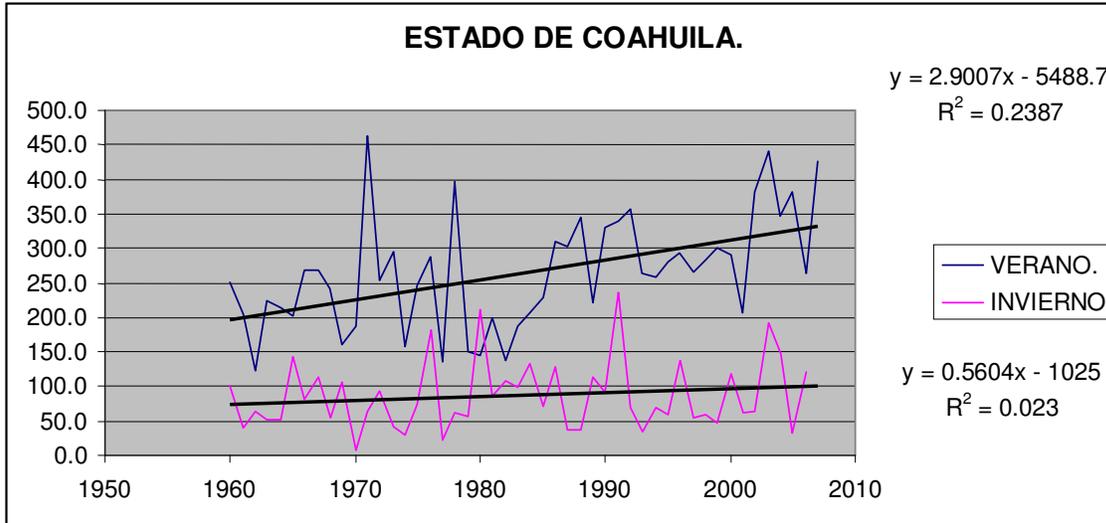


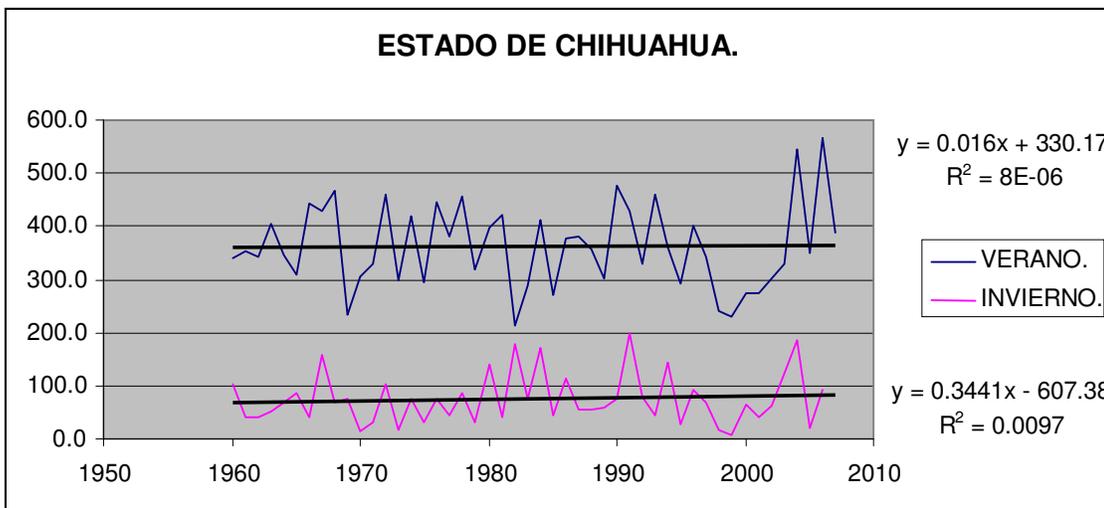
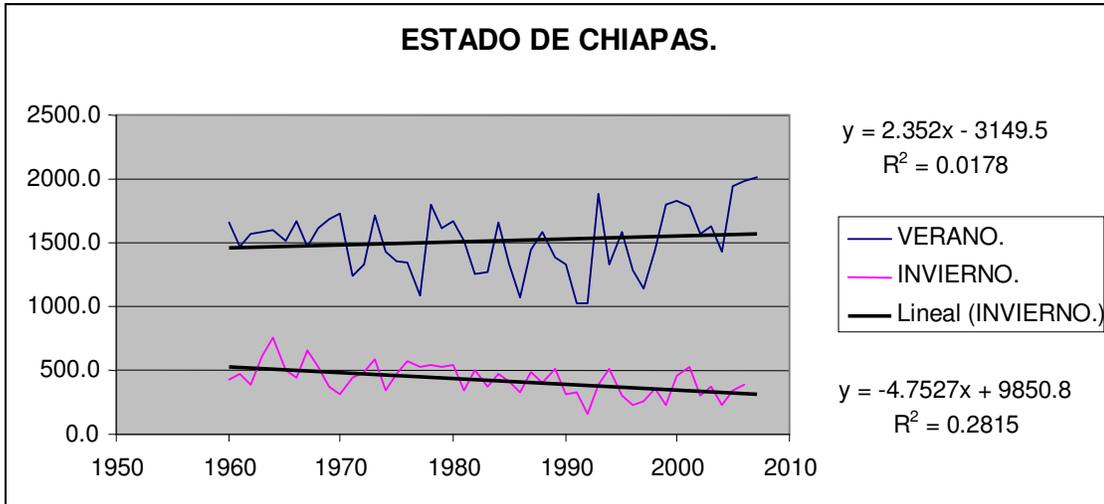


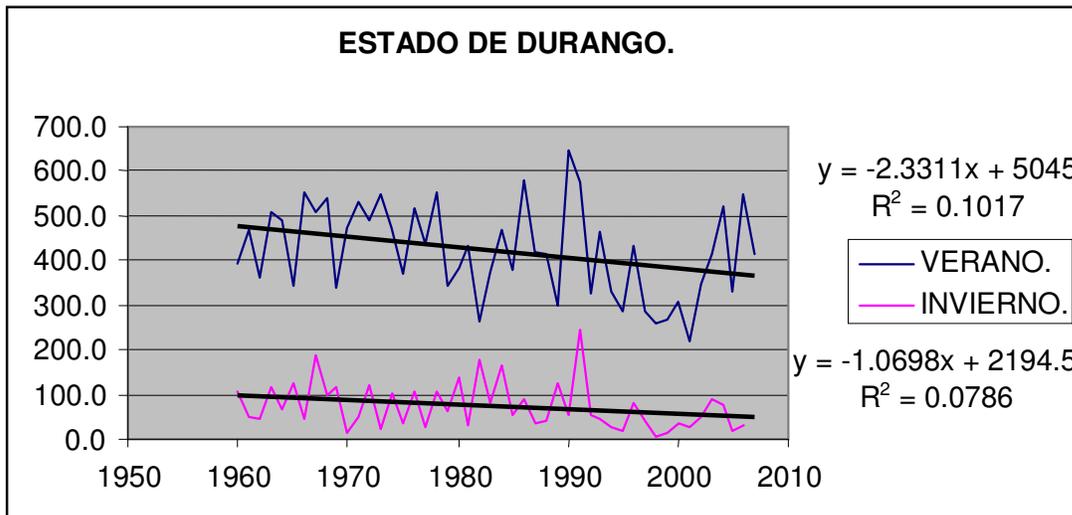
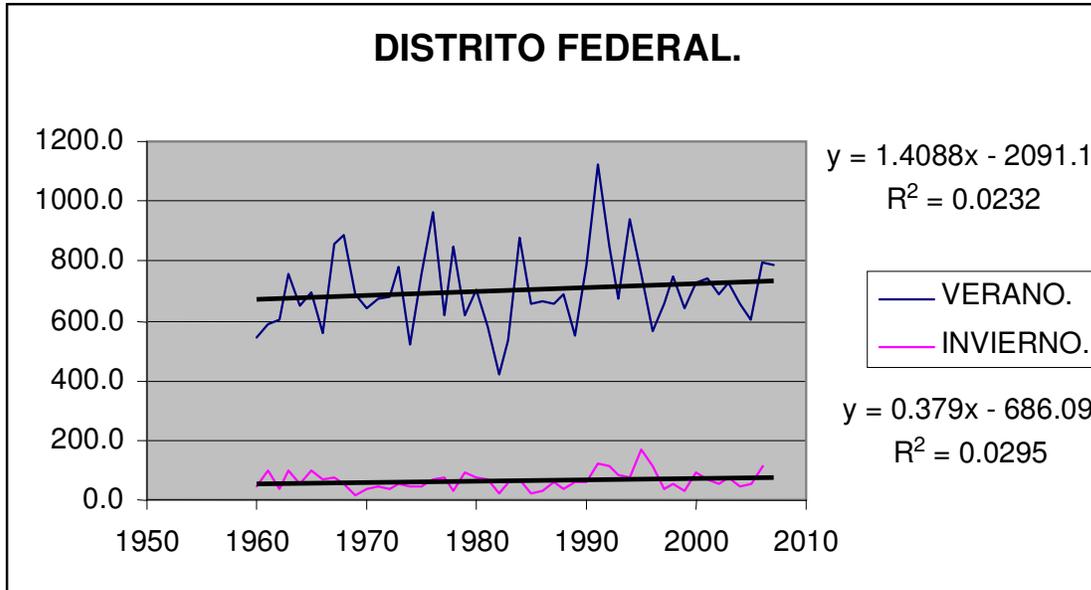
Anexo B: Tendencias de lluvia acumulada en verano e invierno.

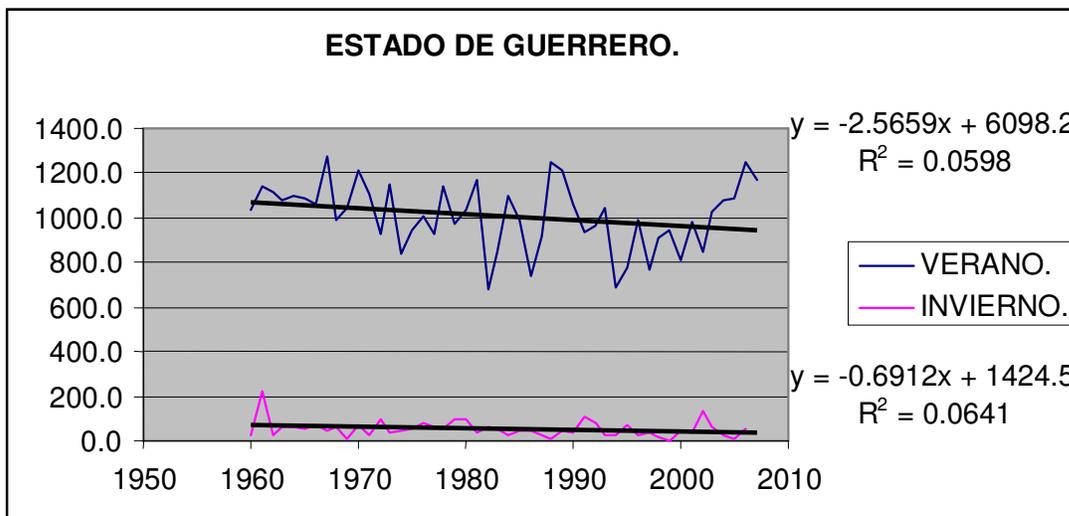
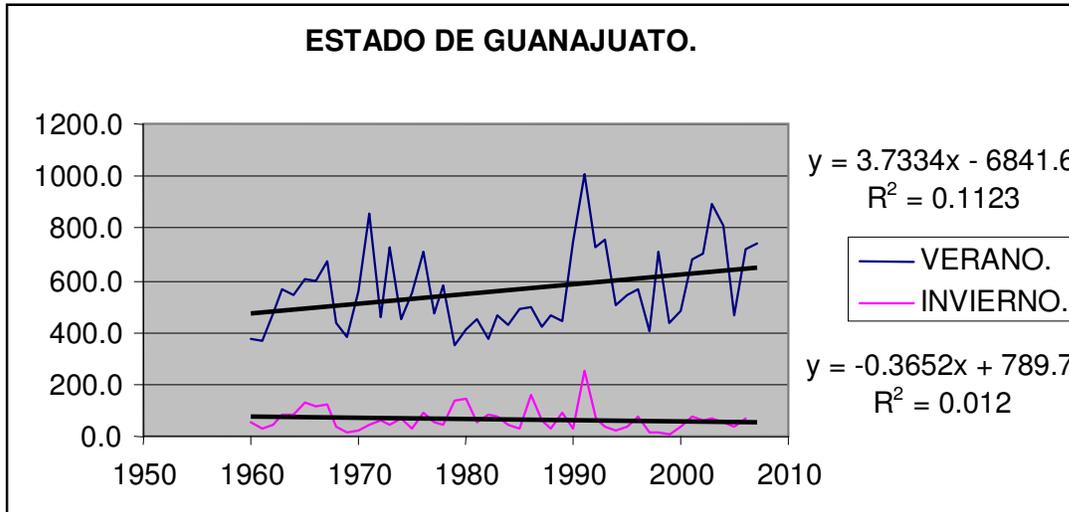


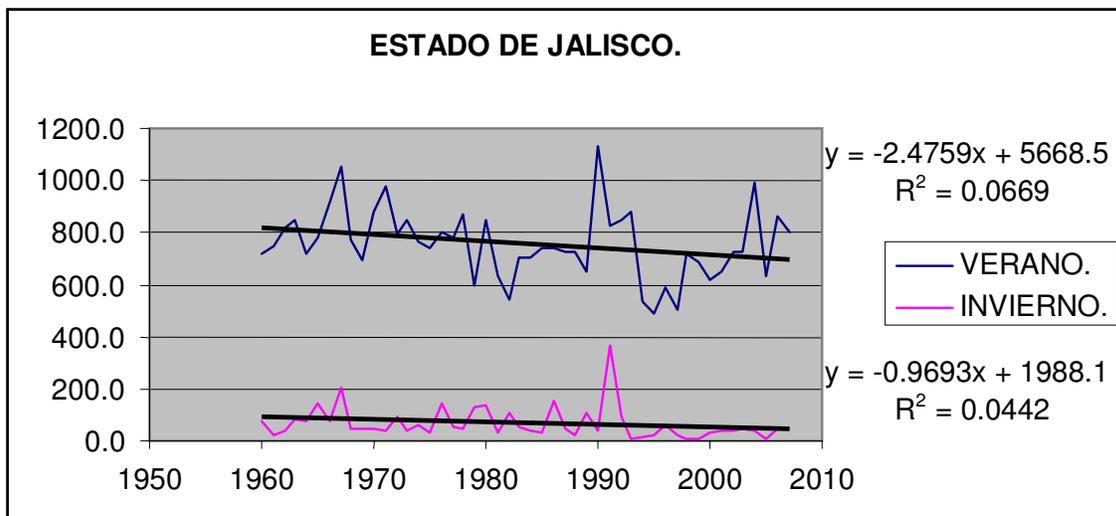
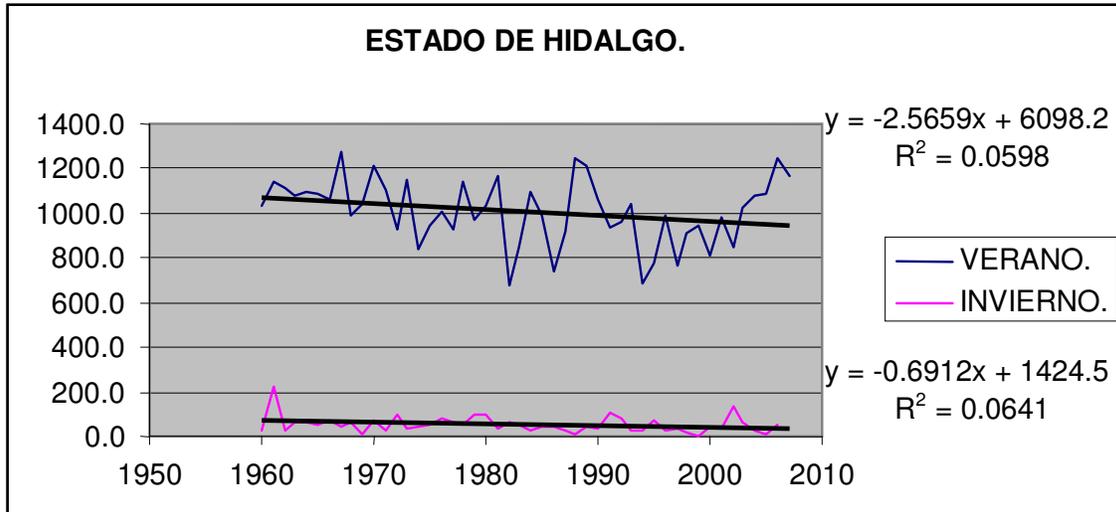


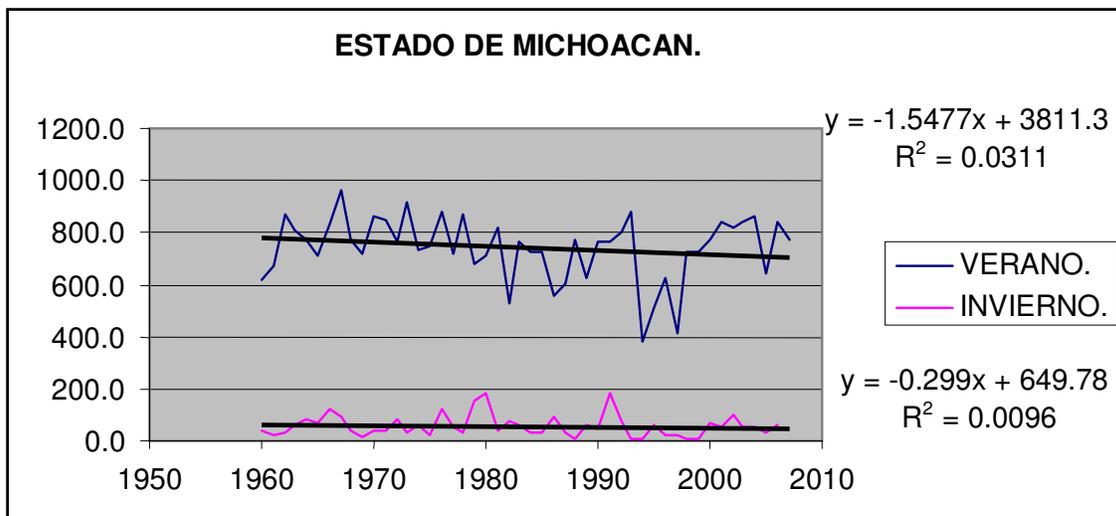
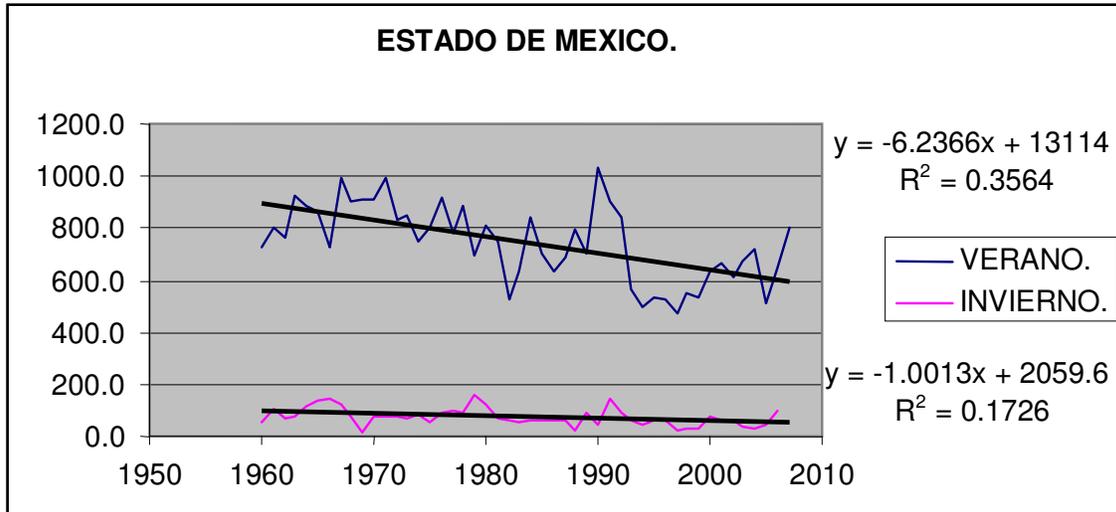


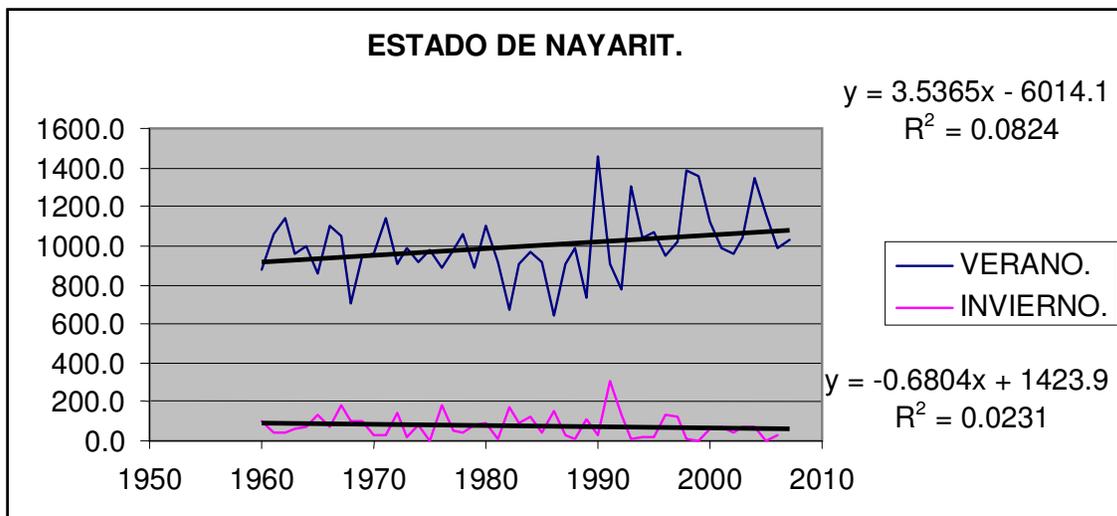
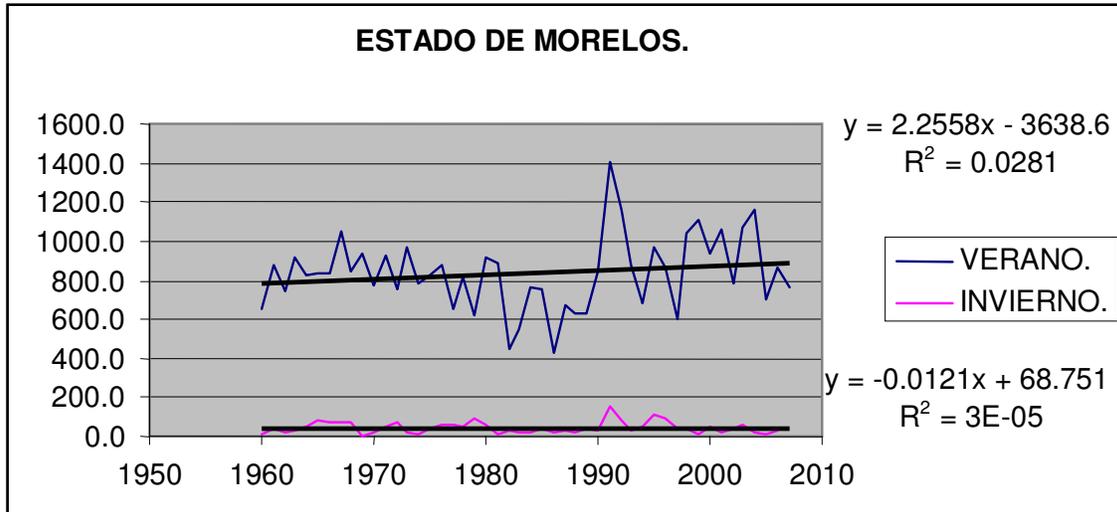


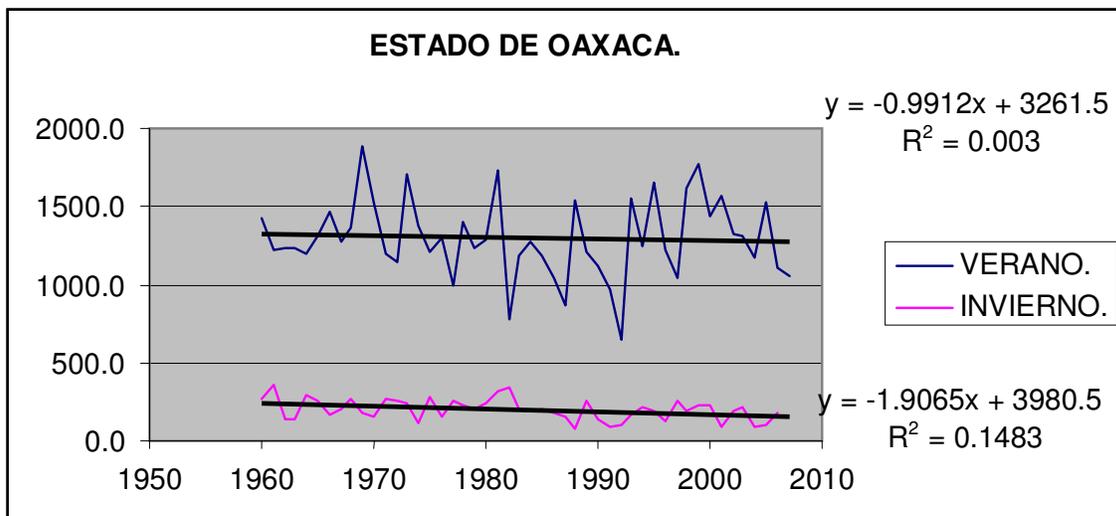
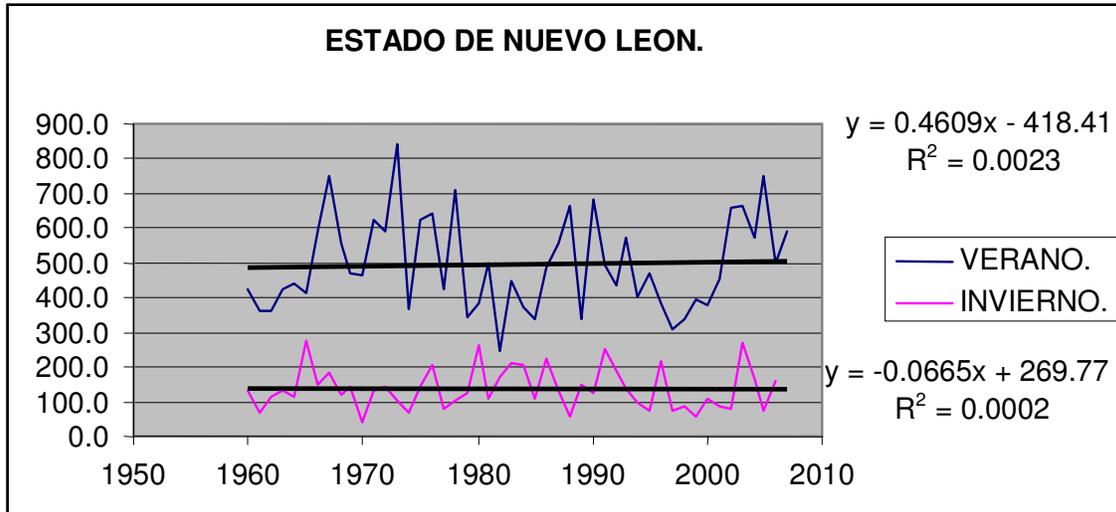


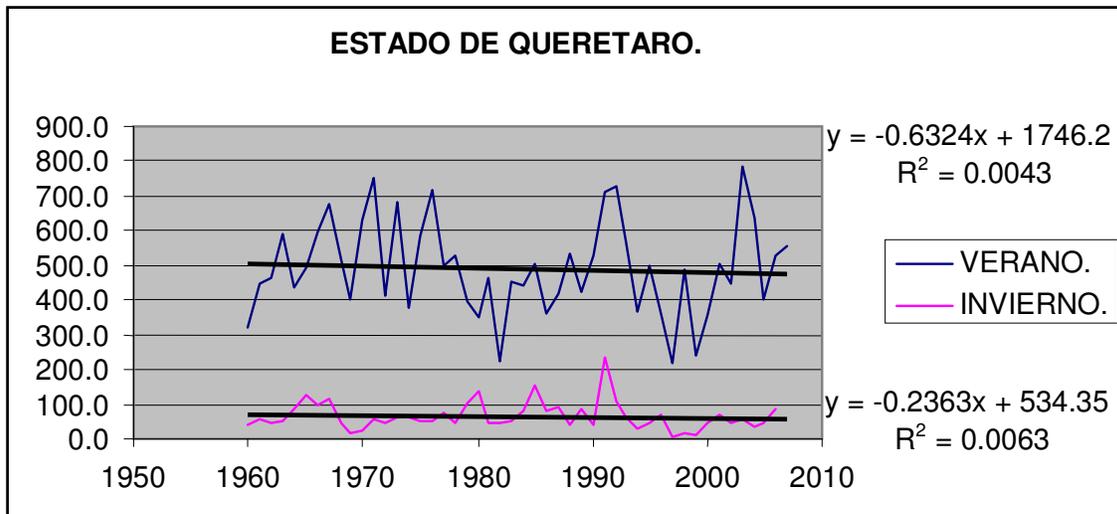
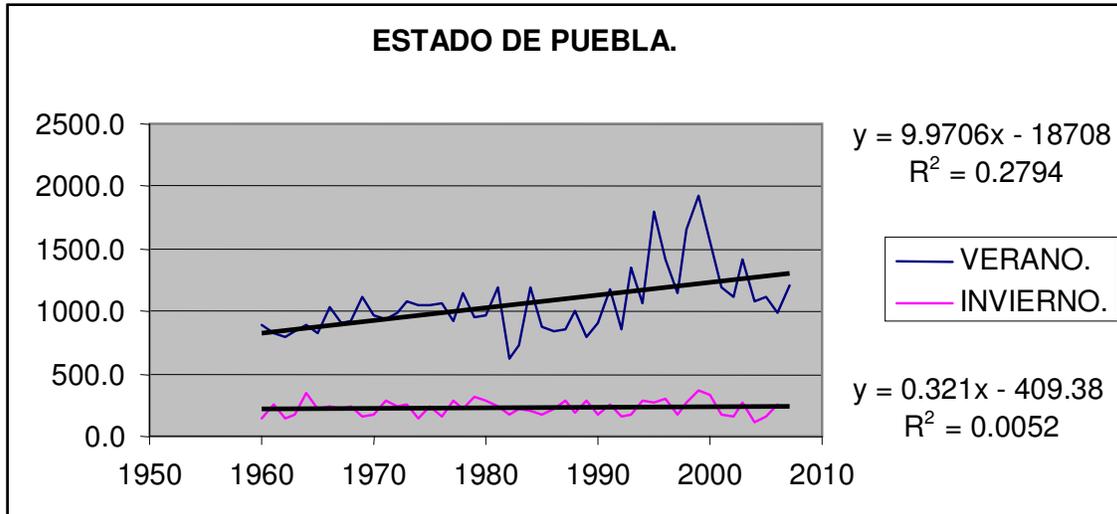


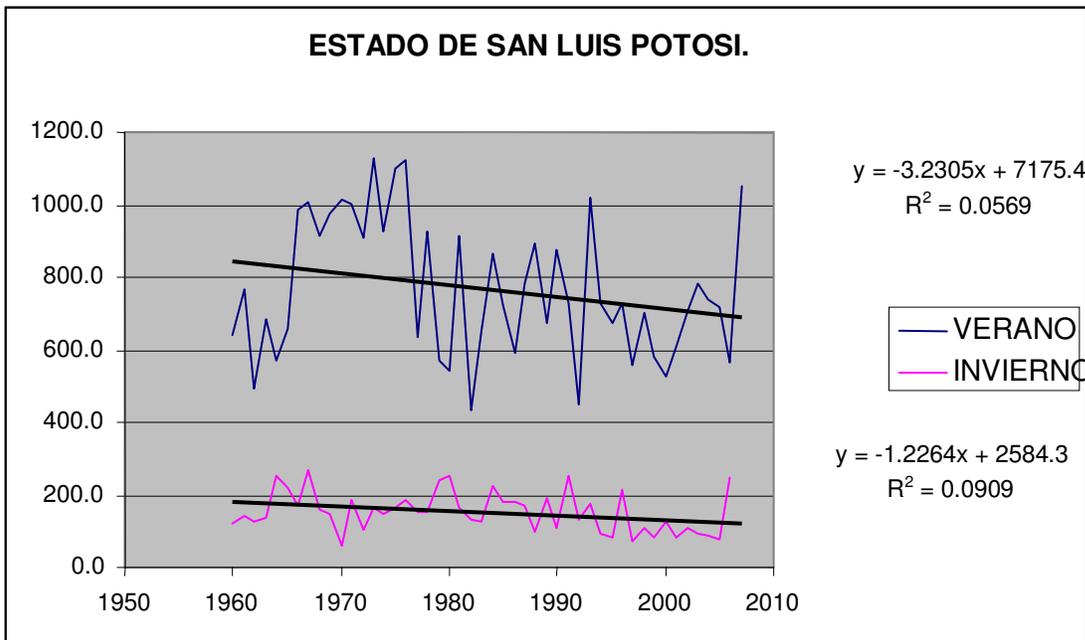
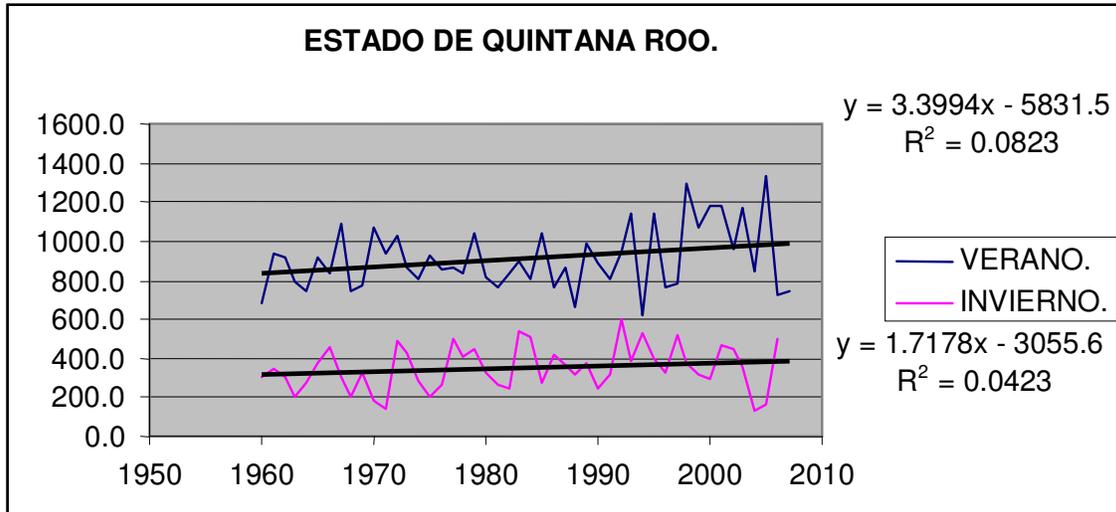


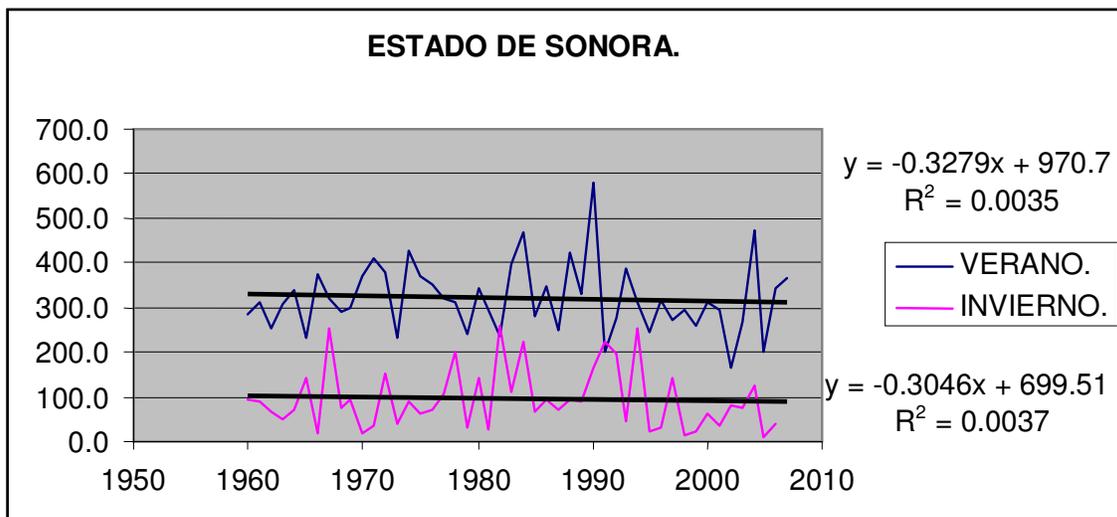
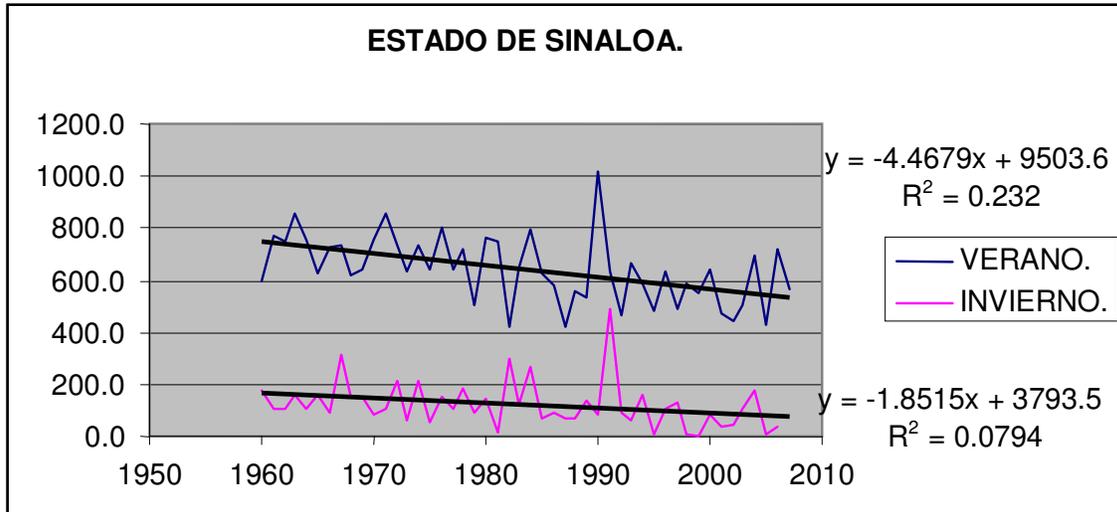


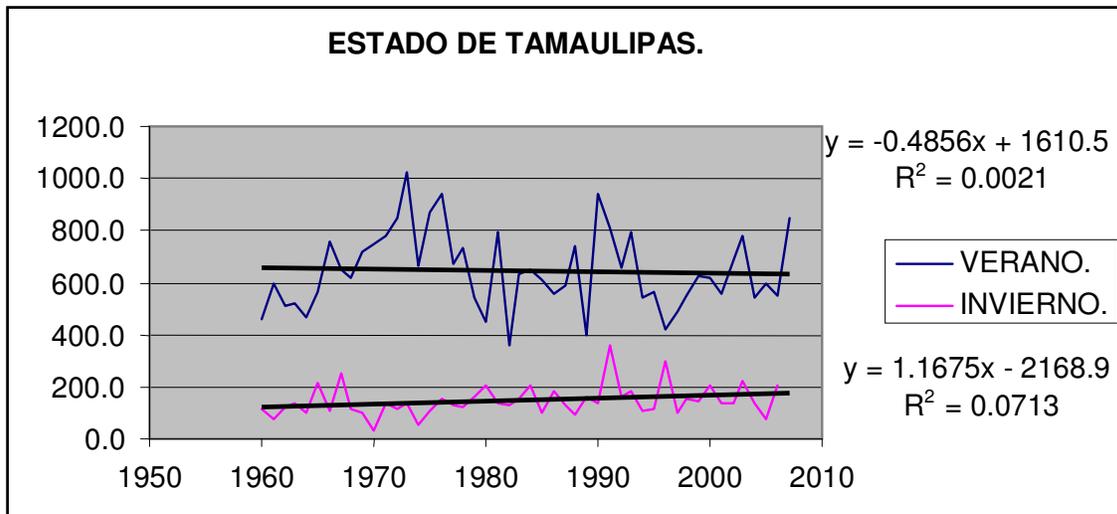
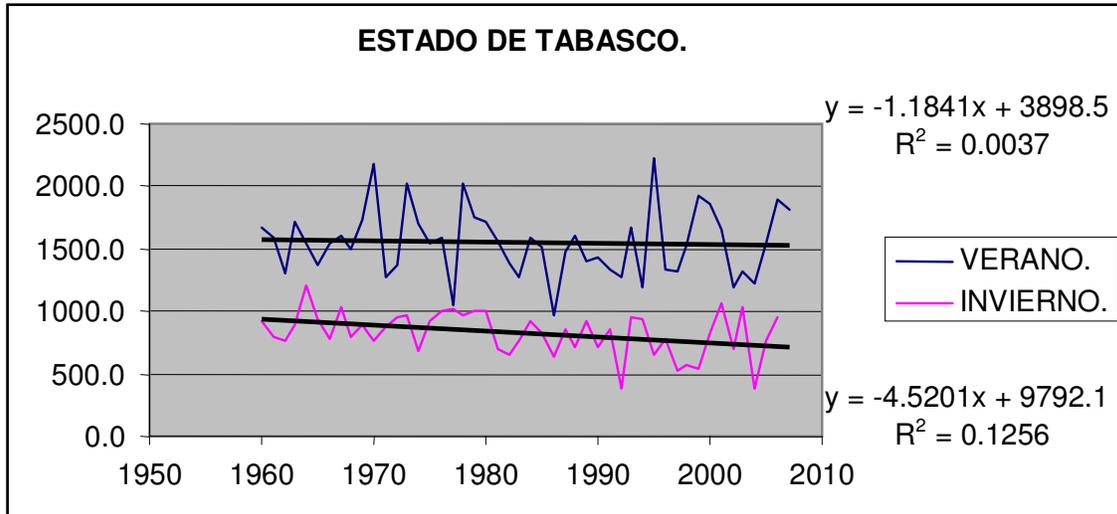


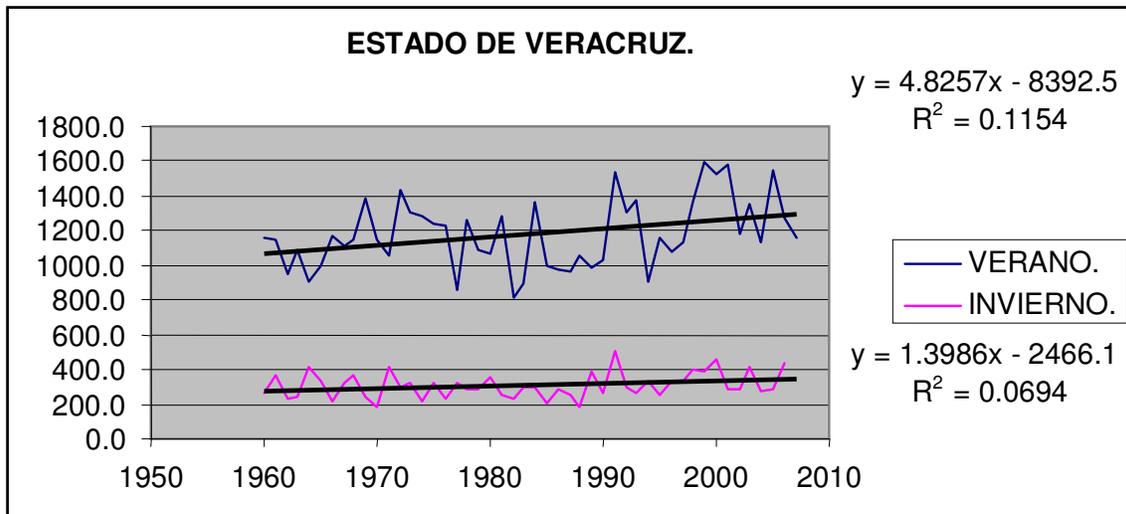
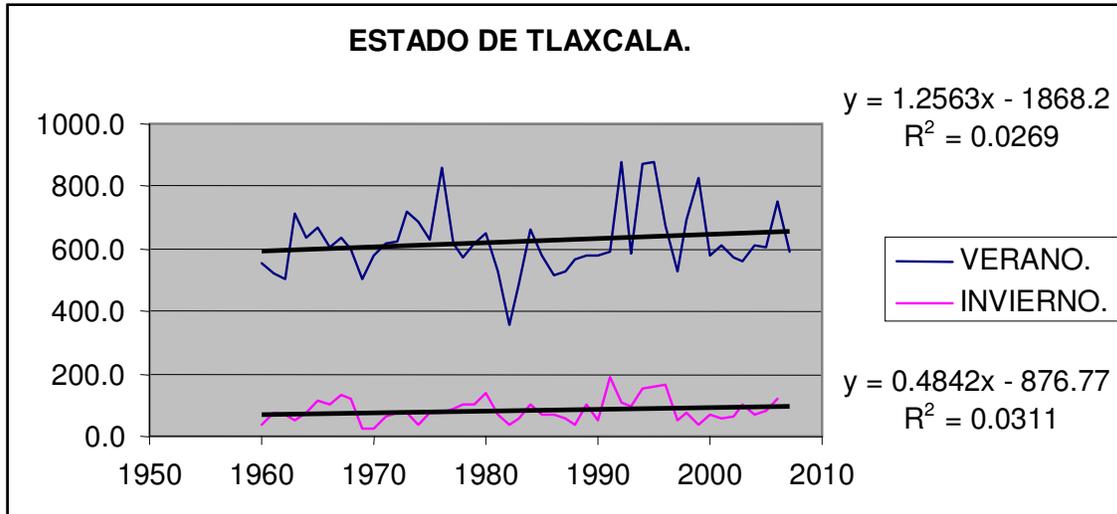


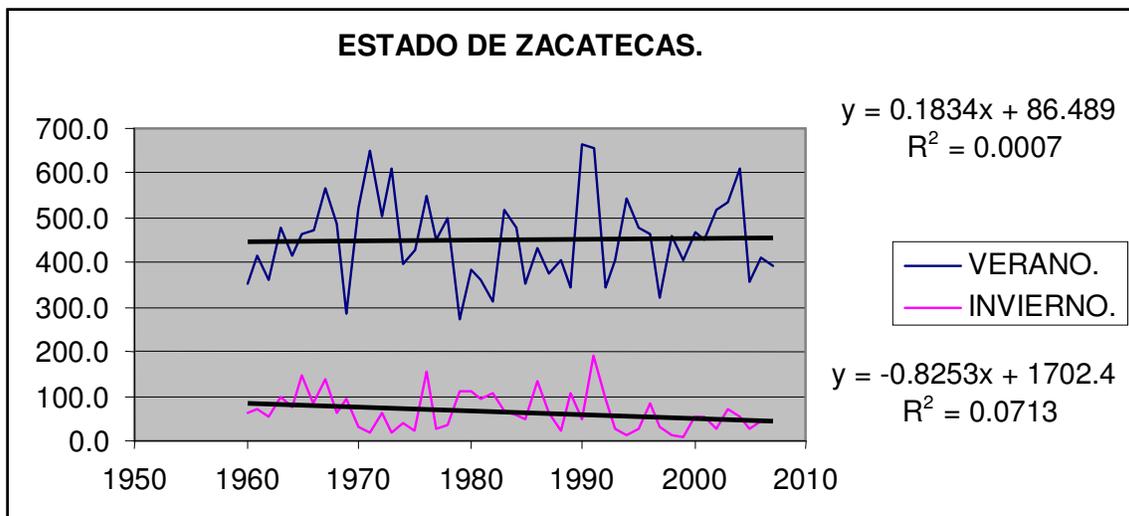
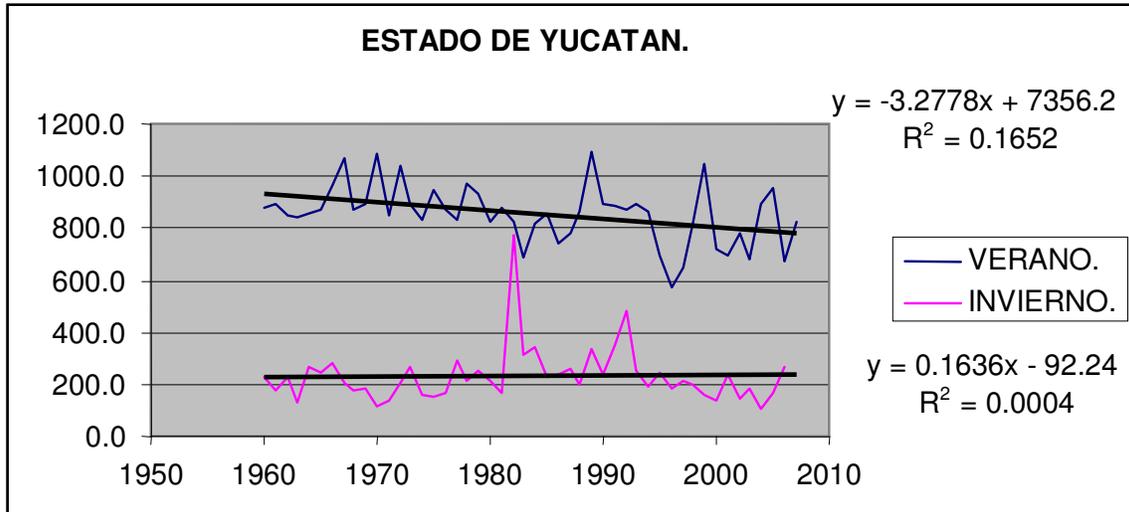












5 MÓDULO DE TENDENCIAS DE FRENTE FRÍOS TANTO EN INTENSIDAD COMO EN DURACIÓN

5.1 Resumen.

Se presentan los resultados de las actividades desarrolladas en el módulo Climatología de frentes fríos (FF), tendencias de intensidad y duración y sus efectos en precipitación y temperatura en México.

Considerando que la actividad de FF está modulada principalmente por la dinámica de El Niño y La Niña, se presenta la actividad de intensidad y frecuencia de FF tanto para años con evento Niño como Niña, así como la variabilidad espacial y temporal mediante Funciones Empíricas ortogonales (FEO), diagnosticando los contrastes entre ambos episodios en FF que afectaron México.

Se comprobó que el número de FF durante años Niño aumenta, ya que la circulación media invernal, con corrientes en chorro sobre el Pacífico Oriental, en la costa de EU es alterada por una onda estacionaria del tipo Rossby (Patrón de Circulación de Norteamérica: PNA), (Magaña, et. al 1999), esta anomalía en la circulación media resulta en cambios en la posición de la corriente en chorro de latitudes medias y subtropical, que se desplaza hacia el sur alrededor de 500 Kms. (Magaña y Quintanar, 1997). Los FF utilizan este sistema de corrientes en chorro para adquirir energía, sus variaciones asociadas al Niño se reflejarán en la actividad de FF.

Se desarrollaron programas de cómputo y macros para aplicar los análisis a los formatos, variables y áreas de interés para el estudio.

5.2 Introducción.

Las invasiones de los frentes fríos (FF), además de afectar las condiciones de la atmósfera tropical y el océano, refuerzan los vientos alisios de 5-10 m/s al este del Océano Pacífico Norte y provocan un aumento de la convergencia cerca de la superficie, como consecuencia genera convección a lo largo de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). (Schultz et al., 1998).

La interacción entre masas de aire frío y caliente se presentan durante todo el año, existiendo meses con mayor frecuencia e intensidad de estas interacciones presentándose un máximo en enero y febrero. Los meses de invierno tiene mucho más incidencia de frentes, sobre el promedio, que los meses de verano, en los meses de invierno los frentes son más activos y tienen una mayor duración. (Henry 1979).

Por su persistencia en la dirección del viento, llegan a generar oleaje que dificulta las maniobras de operación de las plataformas petroleras. En tierra, los vientos en el Istmo de Tehuantepec han provocado volcaduras de vehículos de gran tonelaje y en el Pacífico

llegan con tal fuerza (después de intensificarse en Tehuantepec) que desplazan las masas de agua superficial generando surgencias que transportan aguas más profundas, las cuales son más frías (Trasviña, 1997), modificando el clima regional de invierno. Por lo tanto las invasiones frías con frecuencia e intensidad tienen un impacto en la climatología de México y América Central.

Por otra parte, los FF provocan intensas precipitaciones en Baja California, el litoral del Golfo de México y algunas zonas del sureste del país, estimar las aportaciones de los FF en las precipitación regionales es parte de esta última etapa del módulo.

La actividad de FF está asociada a la dinámica del Pacífico del Este: el número de FF durante años Niño aumenta, ya que la circulación media invernal, con corrientes en chorro sobre el Pacífico Oriental, en la costa de EU es alterada por una onda estacionaria del tipo Rossby (Patrón de Circulación de Norteamérica: PNA), (Magaña, et. Al 1999), esta anomalía en la circulación media resulta en cambios en la posición de la corriente en chorro de latitudes medias y subtropical, que se desplaza hacia el sur alrededor de 500 Kms. (Magaña y Quintanar, 1997). Los FF utilizan este sistema de corrientes en chorro para adquirir energía, sus variaciones asociadas al Niño se reflejarán en la actividad de FF.

5.3 Antecedentes.

Durante 2008 y 2009, se desarrollaron las etapas previas a la que se informa, en esas etapas se atendieron los siguientes objetivos:

- Identificar la actividad frontal a lo largo de su trayectoria observada anualmente (desde el noroeste de Estados Unidos hasta el sur de México), así como su frecuencia más energética, su variabilidad intraestacional y las regiones de máxima intensidad e impacto en temperaturas.
- Establecer criterios de identificación de FF en el Golfo de México y Norte de México.
- Identificar y caracterizar los FF registrados entre 1961 y 2003
- Identificar tendencias en la frecuencia e intensidad de los FF registrados durante el período de estudio.

Para la última etapa se estimaron los efectos en precipitación de FF identificados en etapas previas, describiendo la actividad de FF en años contrastantes: Niño y Niña.

El objetivo del presente módulo es estimar la precipitación asociada a los FF identificados en etapas previas, analizando la actividad de intensidad y frecuencia de FF tanto para años con evento Niño como Niña, diagnosticando los contrastes entre ambos episodios en FF que afectaron México.



Instituto Mexicano de
Tecnología del Agua

5.4 Metodología.

Tendencias climáticas de fenómenos
hidrometeorológicos extremos en México
durante los últimos 40 años



SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES

La variabilidad espacial y temporal de los FF se calculó mediante análisis espectral (onduletas) a datos diarios de temperatura y de viento meridional en 1000 hPa de 1961 a 2000 en siete regiones de Canadá, EU y México. Se utilizó la base de datos de Reanálisis generados por NCEP/NCAR (Kalnay et. al. 1996). Este análisis de onduletas se aplicó individualmente a los 42 años, seleccionado y promediando por banda espectral en dos grupos: años Niño y años Niña.

La resolución espacial de las variables es de 2.5° (aproximadamente 270 Km.) y resolución temporal de 24 horas. Los meses de estudio abarcan de noviembre a mayo, periodo de mayor incidencia de los frentes fríos en México.

Para desarrollar el análisis, se integraron dos fuentes de datos de precipitación de 1961 a 2003 (ERIC III y Reanálisis) utilizando métodos de interpolación.

Aplicación de análisis espectral en 10 sitios de afectación de Frentes Fríos en México para identificar períodos y fechas de ocurrencia de precipitación, correlacionándolo con fechas ocurridas de frentes para diagnosticar la precipitación asociada a Frentes.

Dada la trayectoria frontal que se observa anualmente y a que posee una gran variabilidad espacial, se seleccionaron 5 regiones, las cuales abarcan desde el Noreste de Estados Unidos hasta el Sur de México y que corresponden a:

- $45^\circ\text{N} - 110^\circ\text{W}$ -----Región I
- $35^\circ\text{N} - 100^\circ\text{W}$ -----Región II
- $30^\circ\text{N} - 95^\circ\text{W}$ -----Región III
- $25^\circ\text{N} - 95^\circ\text{W}$ -----Región IV
- $17^\circ\text{N} - 95^\circ\text{W}$ -----Región V

Incorporación de datos de precipitación de ERIC III y Reanálisis utilizando el método Krigging.

La incorporación de dos fuentes de observaciones (en este caso ERIC II y datos de Reanálisis), es posible con un sistema de asimilación de datos que considere tanto la distribución espacial de la lluvia, como una manera óptima de interpolar los puntos cercanos sin importar su origen.

Para tal efecto se utilizó el método de interpolación llamado Krigging, cuyo nombre es en honor de su desarrollador: el sudafricano D.G. Krige. A partir de las últimas décadas, éste método se convirtió en una herramienta fundamental en el campo de la geoestadística. Krigging se basa en la suposición de que el parámetro a ser interpolado puede tratarse como una variable regional, la cual se encuentra entre una variable aleatoria y una completamente determinista, variando ésta de una manera continua de un punto a otro cercano, de manera que ambos puntos poseen una cierta correlación espacial, no obstante los puntos distantes entre sí serán estadísticamente independiente. El método

Krigging es un conjunto de algoritmos de regresión, los cuales minimizan la estimación de la varianza para un modelo de covarianza predefinido.



Figura 5.1 Distribución de las 7 Regiones de estudio

Krigging ordinario.

El paso inicial y fundamental en la interpolación con Krigging en cualquiera de sus variantes es construir el llamado variograma, ello a partir de los puntos dispersados en el área de interpolación. El variograma es una medida de cuán rápido la variable cambia al movernos en el espacio. Esta construcción se basa en que en promedio, dos observaciones cercanas son más similares que dos lejanas. La orientación de la línea que une los dos puntos en cuestión es vital, ya como es el caso de lluvias, su variación espacial no es homogénea hacia cualquier dirección, interviniendo aquí aspectos como orografía, zonas de mayor convección, etc, así, el variograma es función tanto de la dirección (θ) como de la distancia entre puntos (h). En general, el variograma puede ser representado como una función que gráficamente varía de manera radial al alejarnos de un punto (como rebanadas de pastel). Típicamente, el variograma consiste en dos partes: el experimental y el modelado. Suponiendo que el valor a ser interpolado es f , el

variograma experimental se encuentra calculando la varianza g en cada punto con respecto a los otros, graficando estas varianzas contra la distancia h entre los puntos. Existen diversos esquemas de cálculos de varianza, no obstante lo común es calcularla como la mitad de las diferencias de f elevado al cuadrado.

Por otra parte, el variograma modelado se construye como una función matemática simple que se ajusta a la tendencia del variograma experimental. La forma del variograma indica que a distancias h pequeñas, la varianza f es pequeña. En otras palabras, los puntos cercanos entre sí, tendrán valores similares de f . Después de cierta separación, la varianza en los valores de f llega a ser aleatoria y el variograma modelado se vuelve una línea recta, la cual corresponde al promedio de varianza.

Una vez que el variograma modelado se construye, éste se utiliza para calcular los pesos a utilizar en el método Kriging, ello mediante la ecuación:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i f_i$$

donde n es el número de puntos esparcidos en el área de interpolación f_i son los valores de éstos puntos y w_i son pesos asignados a cada punto.

Por ejemplo, para interpolar en el punto P , en base a los puntos circundantes P_1 , P_2 , y P_3 , deben calcularse los pesos w_1 , w_2 y w_3 . Estos pesos son encontrados al hallar la solución de las ecuaciones simultáneas:

$$\begin{aligned} w_1 S(d_{11}) + w_2 S(d_{12}) + w_3 S(d_{13}) &= S(d_{1p}) \\ w_1 S(d_{12}) + w_2 S(d_{22}) + w_3 S(d_{23}) &= S(d_{2p}) \\ w_1 S(d_{13}) + w_2 S(d_{23}) + w_3 S(d_{33}) &= S(d_{3p}) \end{aligned}$$

donde $S(d_{ij})$ es el variograma modelado evaluado en la distancia que existe entre los puntos i y j . $S(d_{1p})$ es el variograma modelado y evaluado en la distancia que existe entre los puntos P_1 y P , mientras que $S(d_{2p})$, referente a los puntos P_2 y P y $S(d_{3p})$ a los puntos P_3 y P . La suma de estos pesos debe satisfacer:

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1.0$$

Como se tienen cuatro ecuaciones y tres incógnitas, se agrega ésta última al sistema teniendo finalmente:

$$\begin{aligned} w_1 S(d_{12}) + w_2 S(d_{22}) + w_3 S(d_{23}) + \lambda &= S(d_{2p}) \\ w_1 S(d_{12}) + w_2 S(d_{22}) + w_3 S(d_{23}) + \lambda &= S(d_{2p}) \\ w_1 S(d_{13}) + w_2 S(d_{23}) + w_3 S(d_{33}) + \lambda &= S(d_{3p}) \\ w_1 + w_2 + w_3 + 0 &= 1.0 \end{aligned}$$

Entonces, las ecuaciones se resuelven para los pesos: w_1 , w_2 y w_3 . El valor f de los puntos en la interpolación se calculan con:

$$f_p = w_1 f_1 + w_2 f_2 + w_3 f_3$$

Utilizando el variograma de esta manera para calcular los pesos, el error esperado en la estimación se minimiza en el sentido de mínimos cuadrados.

Un aspecto importante en el método Krigging es que el variograma puede utilizarse para calcular el error esperado de la estimación en cada punto de la interpolación, ya que éste es función de la distancia a los puntos circundantes.

La estimación de la varianza se calculó con:

$$s_e^2 = w_1 S(d_{1p}) + w_2 S(d_{2p}) + w_3 S(d_{3p}) + \lambda$$

Esto genera un conjunto de varianzas estimadas en la región de interpolación, pudiéndose generar una gráfica de contornos de iso-superficies de varianzas estimadas.

Krigging simple.

Es similar al ordinario, excepto en que la última ecuación:

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1.0$$

no es anexada, y con ello los pesos no suman la unidad. El Krigging simple utiliza el promedio del conjunto de datos en toda la malla, mientras que el ordinario utiliza una media local (la media de los puntos esparcidos en un subconjunto contiguo a un punto en particular), como resultado, el Krigging simple puede ser menos exacto que el ordinario, no obstante produce resultados suavizados.

Krigging Universal.

Utilizado en el presente proyecto para incorporar datos tanto de ERIC II, como de Reanálisis. Una de las suposiciones para aplicar Krigging Ordinario y Krigging Simple, es que los datos que están siendo estimados son estacionarios, esto significa que al movernos de una región a otra en la malla a interpolar, en promedio f es relativamente constante. Krigging Universal se aplica cuando no existe esta estacionalidad, esto es, cuando se tiene una tendencia espacial significativa en los valores de los datos como iso-superficies con pendientes claras. En tales casos la condición de estacionalidad puede imponerse temporalmente en los datos utilizando una función polinomial simple que modela el valor de f promedio. El valor residual es la diferencia entre este polinomio y el valor verdadero de f en la malla, debido a que este residual debe ser estacionario, Krigging Universal es desarrollado sobre estos residuales, los cuales son agregados a la función polinómica para calcular los valores de f . Al uso de esta función polinómica se le llama "Krigging Universal".

Análisis de variabilidad: Funciones Empíricas Ortogonales (FEO)

Se realizó un diagnóstico atmosférico utilizando Funciones Empíricas Ortogonales (FEO) método estadístico también conocido como Componentes Principales, que permite descomponer series de tiempo espacialmente distribuidas para explicar su varianza tanto temporal como espacial disminuyendo el número de datos. Dado que la varianza obtenida a través de los principales modos puede explicarse a través de eventos atmosféricos u oceánicos, este método se aplicó a la variable precipitación observada (estaciones meteorológicas) y agua precipitable estimada a través de datos de Reanálisis de NCEP, experimentando con temperatura superficial del mar como predictor para diferentes áreas de México.

Realizando correlaciones de los modos principales de precipitación y agua precipitable se estimaron las zonas que están correlacionadas (positiva o negativamente) de mayor manera con la región conocida como el Niño 3.4 diagnosticando con ello las zonas de mayor vulnerabilidad ante eventos de el Niño.

Mediante esta técnica se aplicó un método estadístico que analice la variabilidad asociada a años Niño y Niña estimando la modulación que tienen las variaciones de temperatura del océano en la actividad de FF.

Diagnóstico utilizando FEO.

El análisis de FEO se base en un método para estudiar la variabilidad espacial y temporal de una serie de tiempo en varios sitios de manera simultánea. Este método separa la varianza temporal de los datos en patrones espacio ortogonales llamados vectores propios empíricos.

Desde un punto de vista matemático, los análisis de FEO reducen un gran número de datos correlacionados en tiempo y espacio en un pequeño número de funciones ortogonales que son combinaciones lineales de las observaciones originales y explican un gran porcentaje de la varianza total hasta ser usadas en pronósticos climáticos debido a las propiedades de ortogonalidad.

El método forma parte de un conjunto de técnicas estadísticas que si son aplicadas a un mismo sistema de datos se llama análisis multivariado y consiste en la descomposición de una matriz de covarianza o correlación formada a partir de los datos originales.

Obtención de la Matriz de Covarianza.

Los análisis pueden aplicarse a un campo (en cada punto de rejilla o en cada punto espacial) o a un conjunto de campos. Si se realiza las mediciones de una variable S , estas se registran en forma de lista, en un vector columna, para obtener la matriz de covarianza se debe transponer este el vector columna para volverlo vector renglón, si se trata de más de una estación, tendremos entonces un arreglo en cual se encontrará una estación en cada renglón y cada paso de tiempo de la estación en las columnas,

Obteniendo $s_i = [s_{1i} s_{2i} k s_{nt,i}]^T$, Donde: 1,2,...,nt son los pasos de tiempo, i es la posición de la estación en el arreglo y determina también su número (más adelante puede es expresado como ns).

Ejemplo de lo que fue aplicado a los datos de estación.

Los datos generalmente se toman en forma de lista, vector columna, como es ilustrado a continuación:

X1
X2
X3
Ü
xn

De contar con registros de más de una estación se tiene un arreglo en el cual los nombres o claves de las estaciones se sitúan sobre el primer renglón y la fecha o salto de tiempo se encuentra en la primera columna. Consideremos la siguiente matriz "F" para ilustrar lo mencionado en este párrafo.

Ü	Estación 1	Estación 2	Estación 3
Enero	9	15	12
Febrero	15	20	17
Marzo	16	21	18

Se calcula la transpuesta de esta matriz "F" y se obtienen sus medias por columnas para restarle sus respectivos datos y obtener lo siguiente:

Ü	Enero	Febrero	Marzo
Estación 1	9	15	16
Estación 2	15	20	21
Estación 3	12	17	18
medias	12	17.33	18.33

En esta matriz ahora se tiene el tiempo en el primer renglón y las estaciones en la primera columna, el renglón inferior la media de cada columna, al restarle su respectiva media a cada columna de datos obtenemos un matriz de anomalías como la que a continuación se ilustra:

-3	-2.33	-2.33
3	2.67	2.67
0	-.33	-.33

Esta matriz contiene los valores de las anomalías mensuales y nuevamente las se transpone y se define como la matriz S ($S=F_{\text{transp}}$) de esta manera se continúa el análisis con el formato en que originalmente se encontraba los datos.

-3	3	0
-2.33	2.67	-.33
-2.33	2.67	-.33

Las matrices de covarianza y correlación se definen como:

$$a) \text{cov}(s_i, s_i) = \text{var}(s_i) = \frac{1}{nt} \sum_{k=1}^{nt} s_{ki}^2 = \frac{1}{nt} s_i^T s_i$$

Ec. 2.1

$$b) \text{cov}(s_i, s_j) = \text{cov}(s_j, s_i) = \frac{1}{nt} s_{ki} s_{kj} = \frac{1}{nt} s_i^T s_j$$

Esto implica la multiplicación de la matriz S por la matriz Stranp, y la división entre el número de renglones que compone cada columna, de esta manera a) indica que la diagonal de la matriz de covarianza corresponde a los valores de las varianzas de cada columna de datos y los valores alrededor de esa diagonal son las covarianzas entre estaciones y tiempos, la matriz de covarianza es:

9	7.5	7.5
7.5	6.33	6.33
7.5	6.33	6.33

Para calcular la matriz de correlación se realizan los mismo pasos, solo que en lugar de dividir entre el número de datos se divide entre la desviación estándar, lo que se conoce como estandarizar los datos, así que la diferencia para encontrar una o la otra solo radica en la estandarización o no de los datos.

Descomposición de la matriz de covarianza

Los métodos que se basan en la descomposición de la matriz de covarianza o de correlación tienen características comunes. Consideraremos dos variables, denominadas de la izquierda S y de la derecha Z, para las cuales el número de secuencias cronológicas n_s y n_z no son necesariamente iguales pero cuya longitud temporal debe ser el mismo. Es además posible que exista un rezago en tiempo entre algunas de las secuencias cronológicas. Por ejemplo, una serie cronológica podría ser la temperatura superficial del mar en un cierto punto geográfico y otra la precipitación en una estación en tierra un mes después. Sin perder generalidad tomamos n_s mayor o igual que n_z . La matriz de covarianza puede descomponerse de diversas formas dependiendo de sus características

Una vez que se cuenta con la matriz de covarianza o de correlación, se obtienen sus eigenvalores y eigenvectores, para esto al igual que para las operaciones con matrices como las anteriores se utilizó MATLAB o laboratorio de matrices, así, las matrices de eigenvalores (Eval) y eigenvectores (Evec) de C_{SS} se muestran a continuación:

1-65E-15	0	0
0	0.069453	0
0	0	21.597
-1.52e-14	0.76496	0.64408
0.70711	-0.45543	0.54091
-0.70711	-0.45543	0.54091

De todas las matrices anteriores se pueden identificar otras de tal manera que se puede llegar a los datos originales, esto se describe a continuación:

$$A = F \text{transp}' U.$$

Donde A es la nueva variable y se denomina Componente Ortogonal de Variabilidad (COV's).

U es una matriz de peso, y en el proceso es la matriz de eigenvectores, o sea, $U = \text{Evec}$.

P es una matriz que permite recobrar los datos originales y es la matriz de transpuesta de eigenvectores:

$P = Evec_{transp}$.

Por lo tanto, después de obtener las matrices de Evec y Eval: se puede obtener una muy buena aproximación a los datos originales (anomalías) con las nuevas matrices definidas de la sig. manera:

$F_{transp}' = A P$ con $A = F_{transp}' U$, así que todas las variables son conocidas, esto para comprobar que el procedimiento para obtener la matriz de covarianza con sus respectivos eigenvalores y eigenvectores es correcto.

Para recobrar los datos originales se aplicó:

1.- Se calcula A

$A = S U$:

-3	-2.3333	-2.3333	-1.52E-14	0.76496	0.64408
3	2.6667	2.6667	0.70711	-0.45543	0.54091
0	-0.33333	-0.33333	-0.70711	-0.45543	0.54091

Donde:

S es la matriz de anomalías

U es la matriz de pesos o eigenvectores. Por lo tanto A es:

A =

0	-0.17	-4.46
0	-0.13	4.82
0	0.3	0.36060306

Así, A es llamada matriz de COV's (Componentes ortogonales de variabilidad).

Si se desea obtener una aproximación de las anomalías se realiza la siguiente operación:

$F_{transp}' = A P$.

Donde P es la matriz transpuesta de eigenvectores.

$F_{transp}' =$

0	-0.17	-4.46	-1.53E-14	0.70711	-0.70711
0	-0.13	4.82	0.76496	-0.45543	-0.45543
0	0.3	0.36	0.64408	0.54091	0.54091

De este modo F_{transp}' es:

-3.00264	-2.3350355	-2.3350355
3.0050208	2.6663921	2.6663921
0.4613568	0.0580986	0.0580986

La cual es aproximada a la matriz de anomalías.

Análisis de Componentes Principales

En el análisis de componentes principales (ACP) las variables de la derecha e izquierda son idénticas y por lo tanto la matriz de covarianza y la de correlación son reales, simétricas y de dimensiones $n_s \times n_s$. La diagonal mayor de C_{ss} contiene las autocovarianzas ó varianzas de las secuencias cronológicas, mientras que la diagonal de R_{ss} es unitaria. Los elementos ij fuera de la diagonal son las covarianzas o correlaciones cruzadas de la variable i con la j . El ACP consiste en obtener la matriz ortogonal de autovectores y la matriz diagonal de autovalores de las matrices de covarianza o de correlación. En el resto de esta sección se hará referencia a la matriz de covarianza aunque lo mismo se aplica a la matriz de correlación. El problema de autovalores es:

$$C_{ss}E = EL\lambda \quad \text{Ec.2.2}$$

Autovalores y autovectores de una matriz simétrica.

Para una matriz real simétrica, como C_{ss} , los autovectores y autovalores tienen las siguientes propiedades:

1.- Dos vectores propios correspondientes a autovalores diferentes son ortogonales.

$$E^T E = E E^T = I$$

2.- Todos los n_s autovalores son reales.

3.- A $m \leq n_s$ autovalores iguales les corresponde m autovectores ortogonales.

4.- $\text{traza}(C_{ss}) = \text{traza}(L) = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \dots + \lambda_n$. Es decir, la suma de los autovalores iguala la varianza total de las n_s secuencias cronológicas.

Interpretación geométrica de los autovectores

Geoméricamente, el primer autovector, e_1 , (la primera columna de la matriz E), apunta en la dirección del espacio de dimensionalidad n_s a lo largo de la cual los vectores de datos exhiben en conjunto la mayor variabilidad. El primer autovector es el asociado al autovalor de mayor valor. El segundo autovector es el asociado al autovalor de segundo mayor

tamaño, y está restringido a ser perpendicular a e_1 y apuntar en la dirección en la que los vectores muestran la segunda mayor variabilidad. Los autovectores subsiguientes se numeran de acuerdo al orden descendente de los autovalores, son mutuamente perpendiculares entre sí, y localizan las direcciones en las que los datos muestran mayor variabilidad. Los autovectores definen un nuevo sistema de coordenadas para representar

los datos. Este sistema de coordenadas mutuamente perpendiculares está orientado de tal forma que cada nuevo eje apunta en la dirección de mayor variabilidad conjunta. Los ejes son diferentes para conjuntos de datos diferentes porque son extraídos de la matriz de covarianza que es particular para cada conjunto de datos. Esto es, son funciones ortogonales, pero son definidos de manera empírica de acuerdo al conjunto de datos bajo estudio. Esta es la razón por la que el método también se conoce como análisis en funciones ortogonales empíricas.

Componentes ortogonales de variabilidad (coeficientes de expansión).

El problema de autovalores se puede reescribir de la siguiente forma

$$\frac{1}{nt} S^T S E = E L \lambda \Rightarrow \frac{1}{nt} E^T S^T S E = E^T E L = I L = L. \quad Ec.2.3$$

De la ecuación anterior podemos identificar los factores de peso $U = V = E$, y que la matriz diagonal D corresponde a la matriz de autovalores L . Como los autovectores son ortogonales por filas y por columnas se obtienen los patrones $P = Q = E^T$. La ecuación

$$\frac{1}{nt} A^T A = L.$$

2.3 equivale a la relación de ortogonalidad de los COV

5.5 Resultados.

Integración de bases de datos

La aplicación de la metodología se realizó mediante macros ejecutados en el sistema GrADS, los cuales integran los datos de precipitación de NCEP (Reanálisis) con los de EricIII en la siguiente secuencia:

Compilación de datos de precipitación de 1961 a 2003 de dos fuentes: ERIC III y Reanálisis, la integración de ambas bases de datos fue realizada utilizando el método de Krigging.

Análisis de onduletas en 10 sitios de afectación de Frentes Fríos en México para identificar períodos y fechas de ocurrencia de precipitación.

Diagnóstico de precipitación

Con la bases de datos ERICIII, se estimaron medias diarias, estacionales y mensuales en territorio mexicano.

En invierno, la distribución de precipitación media diaria está asociada al paso de FF provenientes del noroeste de EU, así, las cadenas montañosas juegan un papel

fundamental en esta distribución, ya que, por la alineación norte-sur de las rocallosas, estos flujos de aire frío son encauzados hacia México, donde las regiones montañosas locales bloquean estos flujos y provocan convección, así, la primera zona de afectación en precipitación de los FF es Baja California Norte (**Figura 5.2**), donde las lluvias son invernales y asociadas a la Sierra de San Pedro Mártir, el flujo restante avanza hacia Sonora, donde la Sierra Madre Occidental provoca convección y precipitación paralela a esta cadena montañosa, nuevamente, el flujo restante avanza hacia el Golfo de México, donde flujos del Golfo provocan precipitación en esta vertiente (Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo).

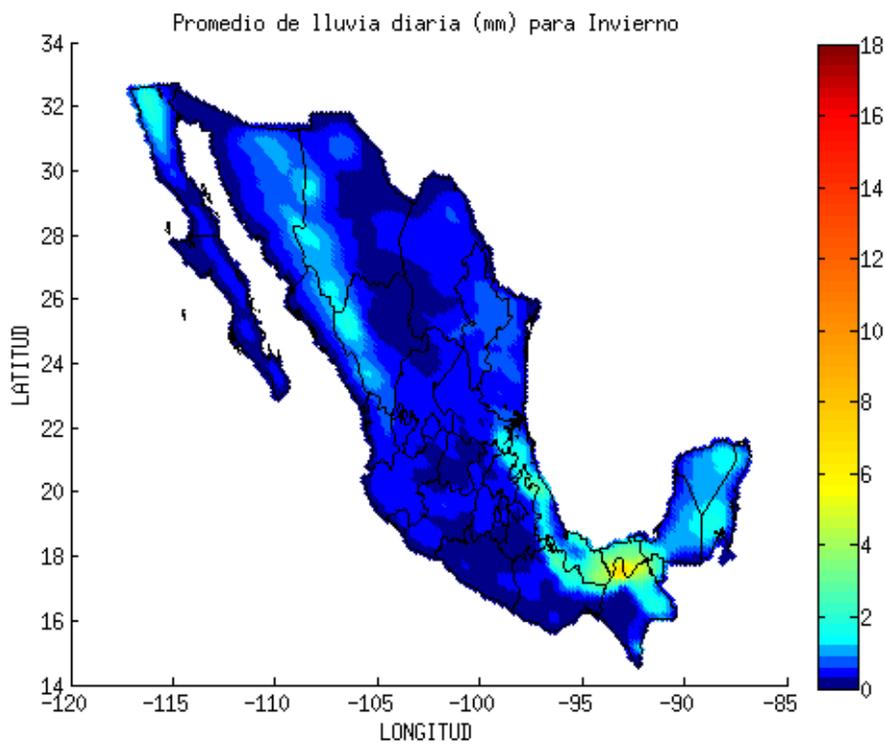


Figura 5.2 Precipitación media diaria en invierno.

En primavera, los FF continúan su efecto sobre el territorio mexicano, siendo en invierno menor la precipitación en Baja California, así como en la vertiente del Golfo de México (**Figura 5.3**), en esta temporada inicia la precipitación en el sur de la vertiente del Pacífico Mexicano (zonas costeras de Nayarit a Chiapas), las cuales están asociadas a eventos tropicales.

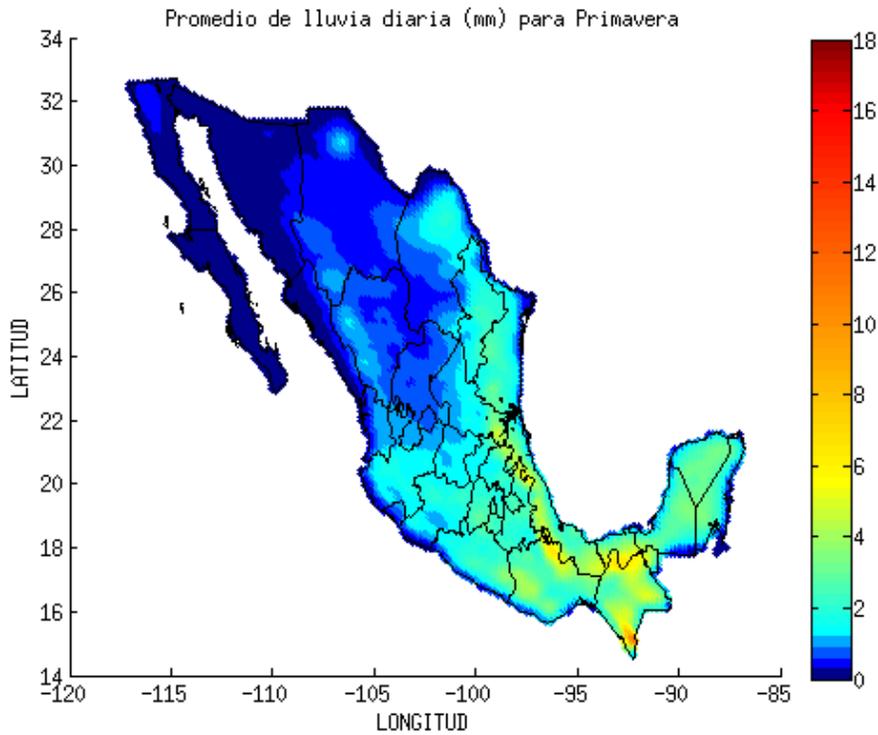


Figura 5.3 Precipitación media diaria en primavera.

En verano, en ambos litorales el área de precipitación se extiende hacia el norte (**Figura 5.4**), siendo más intensa que en primavera, en esta temporada las ondas tropicales, sistemas convectivos de mesoescala y huracanes generan esta precipitación, la cual es afectada por las grandes cadenas montañosas mexicanas.

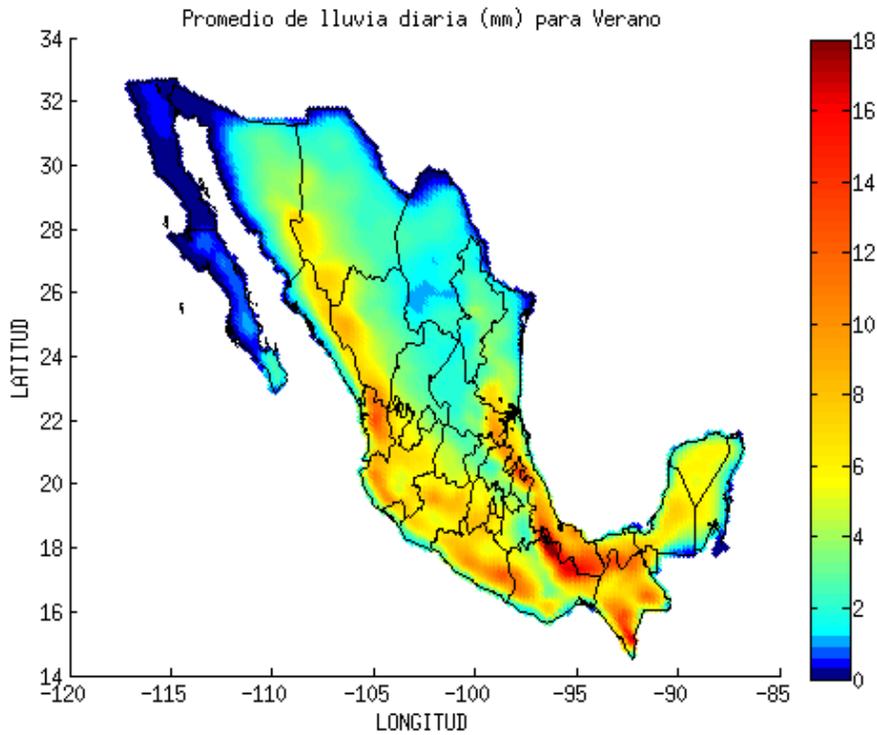


Figura 5.4 Precipitación media diaria en verano.

En otoño comienza a declinar la temporada de lluvias en la mayoría del territorio nacional (**Figura 5.5**), manteniéndose en la vertiente del Golfo de México, región que es afectada por FF, de igual forma, en Baja California Norte inicia la temporada de lluvias, ya que también en esa región los FF provocan la mayoría de la precipitación registrada.

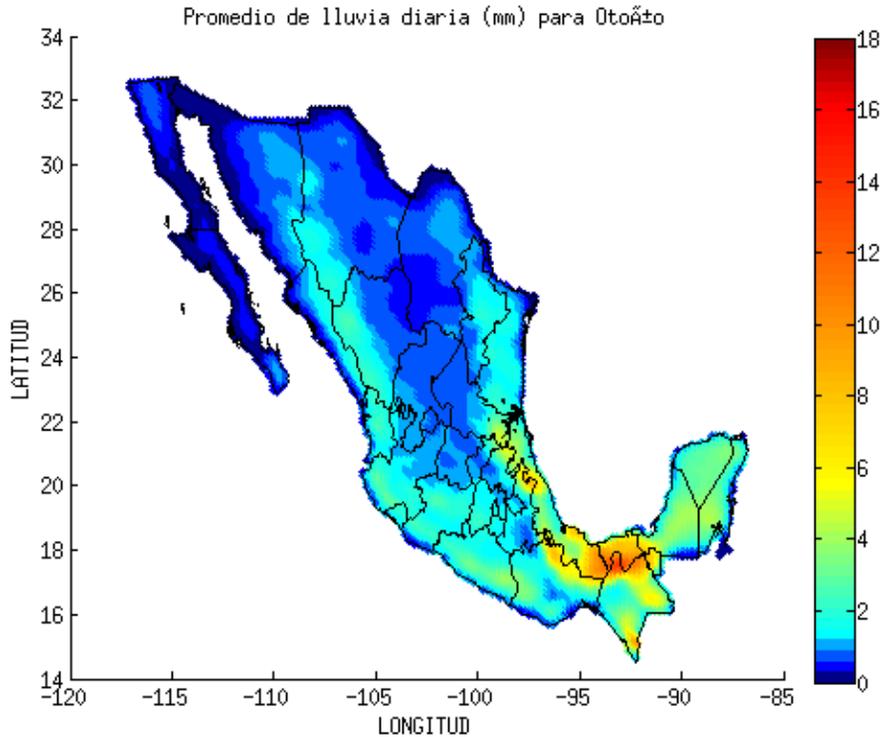


Figura 5.5 Precipitación media diaria en otoño.

La precipitación media mensual por estación del año se muestra en las **Figuras 5.6 a 5.9**, la cual mantiene la distribución espacial que la precipitación diaria respecto a las **Figuras 5.2 a 5.5**. A pesar de que Verano es la temporada con mayor precipitación acumulada en un mes, con regiones como el litoral del Golfo de México con valores cercanos a 1600 mm, Invierno, mes de mayor afectación de precipitación por FF y esto sucede también en el litoral del Golfo de México, con máximos estacionales de 800 mm aproximadamente, es decir, en este litoral, las precipitaciones asociadas a FF representan cerca del 50% de las registradas en verano (temporada de mayor precipitación, que incluye ondas tropicales, sistemas convectivos y huracanes). Este porcentaje es significativo considerando que se está comparando con al menos la acumulación de tres eventos meteorológicos tropicales.

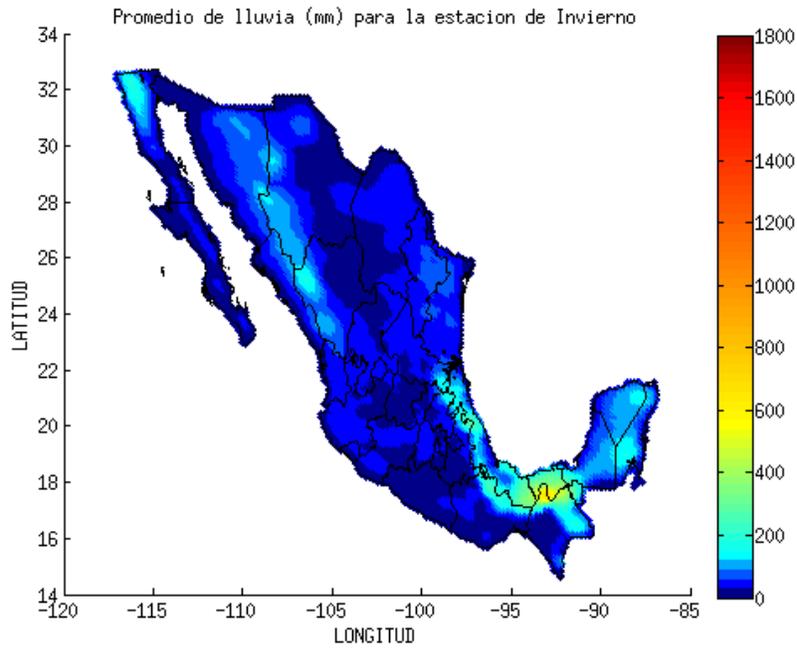


Figura 5.6 Precipitación media en invierno.

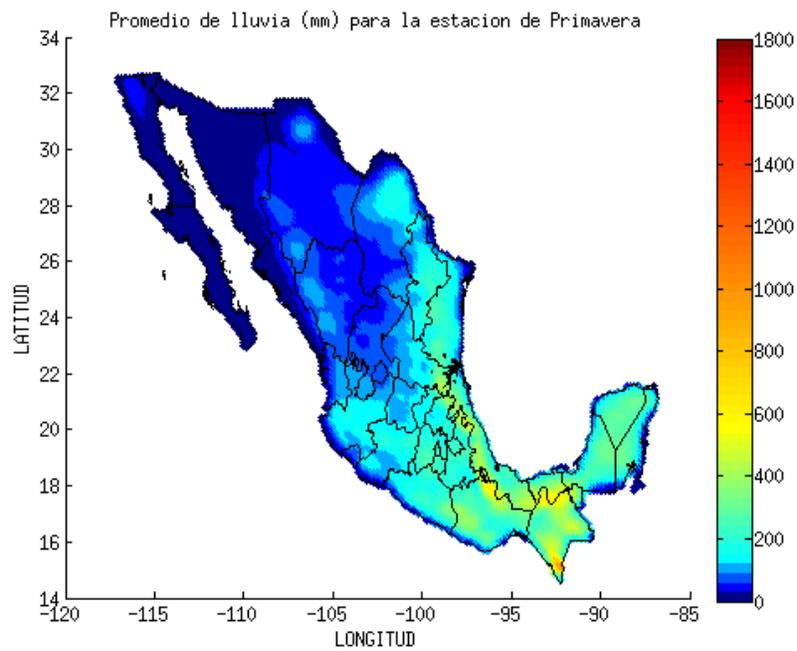


Figura 5.7 Precipitación media en primavera.

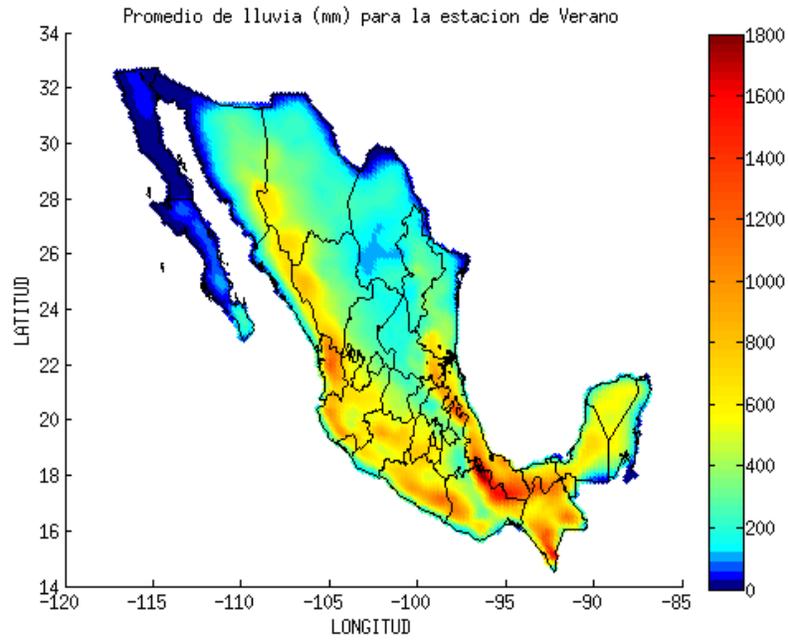


Figura 5.8 Precipitación media en verano.

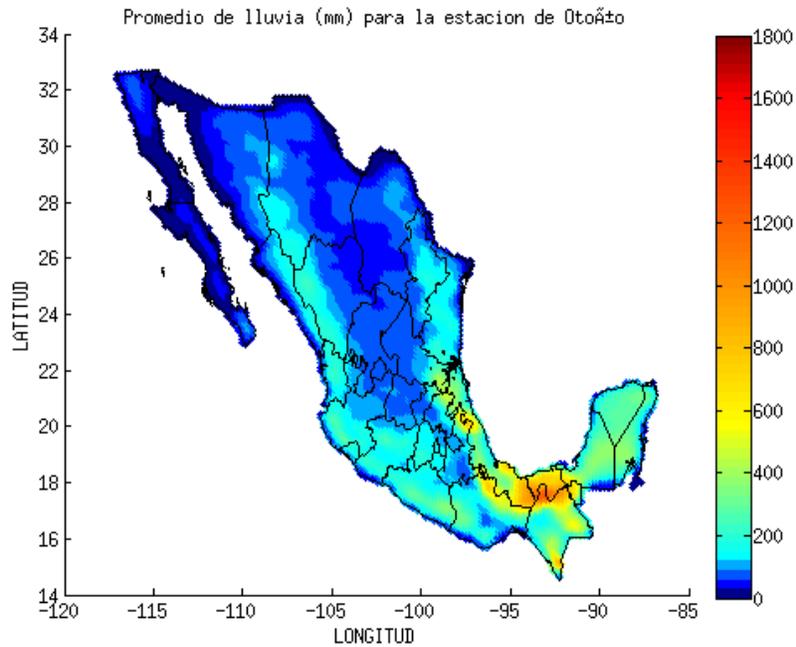


Figura 5.9 Precipitación media en otoño.

La precipitación media anual está afectada totalmente por la distribución montañosa mexicana, a pesar de que la dirección de los eventos que provocan precipitación en todo el territorio nacional es diversa, la distribución espacial obedece a los grandes contrastes orográficos mexicanos (**Figura 5.10**).

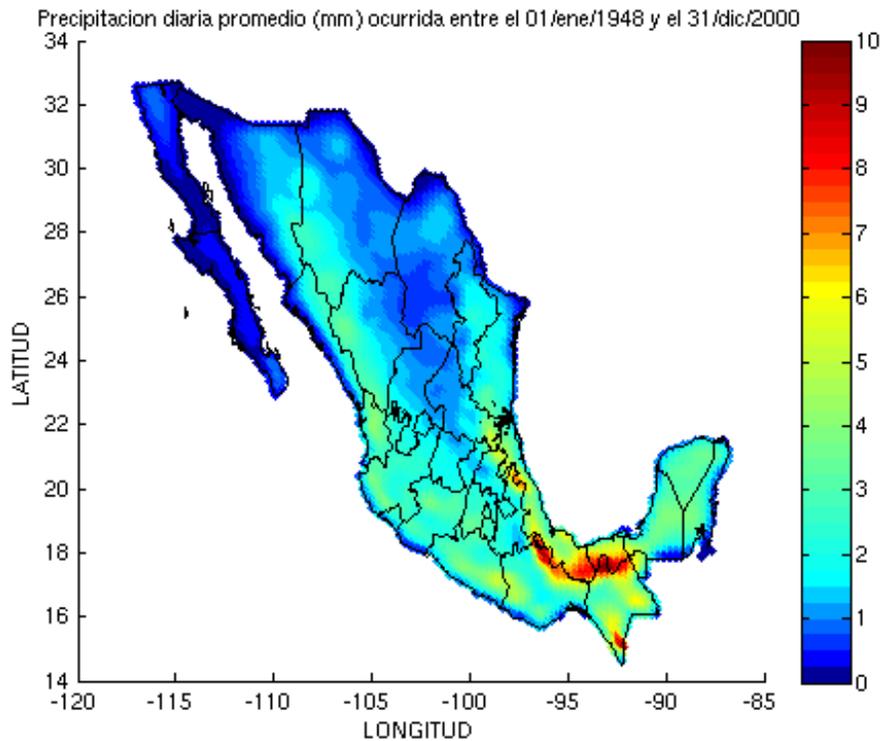


Figura 5.10 Precipitación media anual.

Análisis de variabilidad: años Niño y Niña

Considerando que el modo de interacción océano-atmósfera más importante en la regulación del clima regional es el fenómeno de el Niño y la Niña, esto a través de la interacción de la corriente en chorro del Pacífico con los FF que toman energía a su paso y posteriormente se intensifican y provocan precipitaciones en México. Por ello se calculó la precipitación asociada a ambos grupos de años en base a la **Tabla 5.1**.

Para años Niña, la región noroeste de México (Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango y Baja California), experimenta menor precipitación (**Figura 5.11**) que años Niño (**Figura 5.12**), esto es acorde a estudios previos que así lo indican. Por otro lado, para la vertiente del Golfo de México se mantiene la precipitación en ambos episodios, a excepción de la Península de Yucatán, donde en años Niño se incrementa la precipitación.

Años	
Niño	Niña
1965	1966
1971	1973
1974	1983
1976	1987
1989	1992
1999	1998

Tabla 5.1 Identificación de años Niño y Niña.

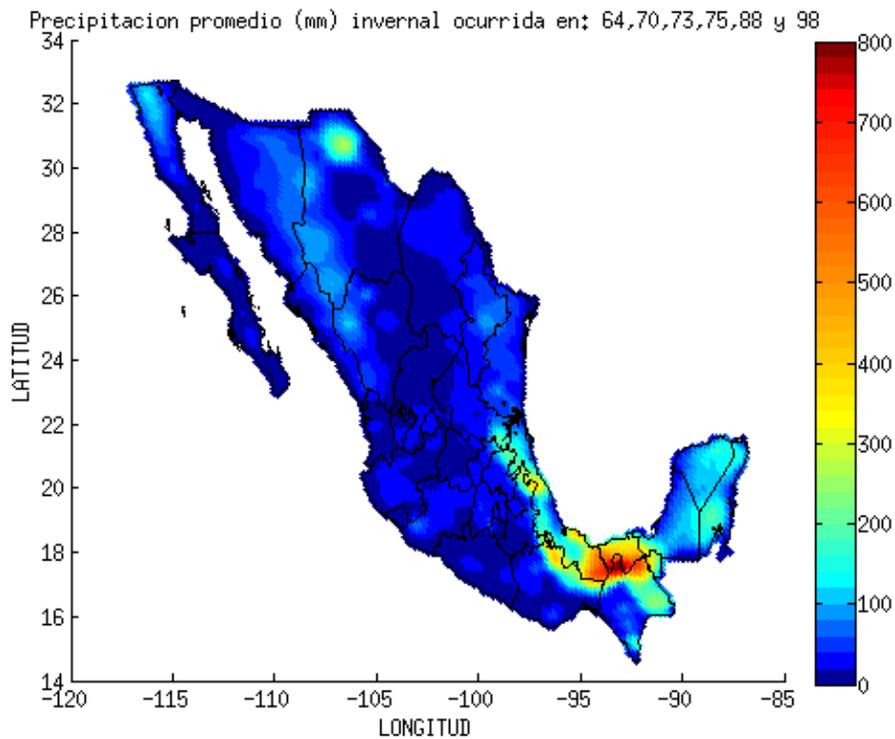


Figura 5.11 Precipitación media en invierno de año Niña.

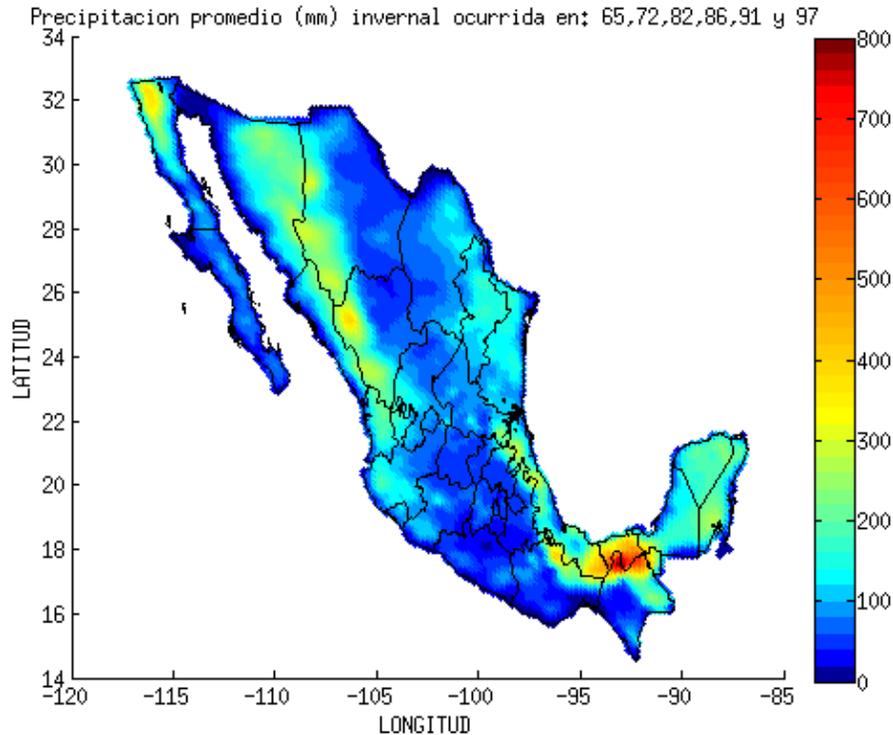


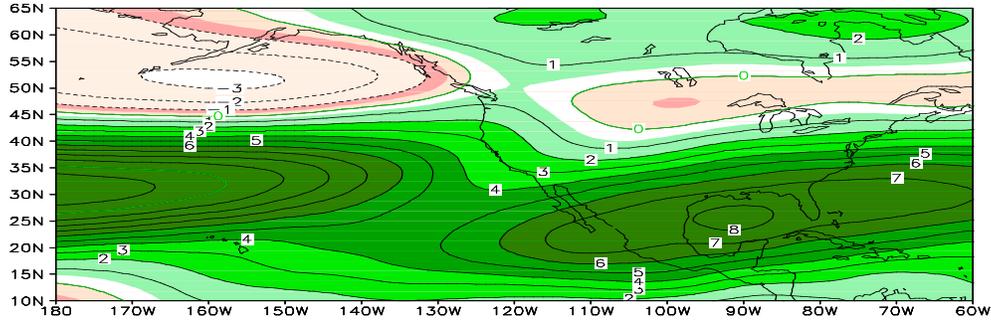
Figura 5.12 Precipitación media en invierno de año Niño.

Análisis de varianza: Funciones Empíricas ortogonales

La identificación de variabilidad espacial asociados a años Niño y Niña, se realizó aplicando análisis de funciones empíricas ortogonales y análisis de precipitación.

Considerando la relación entre la corriente en chorro del Pacífico y la dinámica de FF, se aplicó un análisis de variabilidad para años Niña y Niño, utilizando Funciones Empíricas Ortogonales (FEO) en 500 hPa, nivel del máximo de la corriente en chorro. Este análisis. Para el primer modo se observa sobre el territorio mexicano una anomalía positiva con máximo en el Golfo de México (**Figura 5.13**), sobre la zona de mayor intensidad de FF identificada en la primera etapa de este módulo que coincide con el máximo sobre el Pacífico, sobre la zona de la corriente en chorro del Pacífico, esto hace suponer una relación directa entre actividad de FF en México y la intensidad y ubicación de la corriente en chorro.

Primera EOF, explica el 53.516% de la Varianza de u_{500}
para eventos Niña (1966, 1973, 1983, 1987, 1992, 1998)



Segunda EOF, explica el 8.683% de la Varianza de u_{500}
para eventos Niña (1966, 1973, 1983, 1987, 1992, 1998)

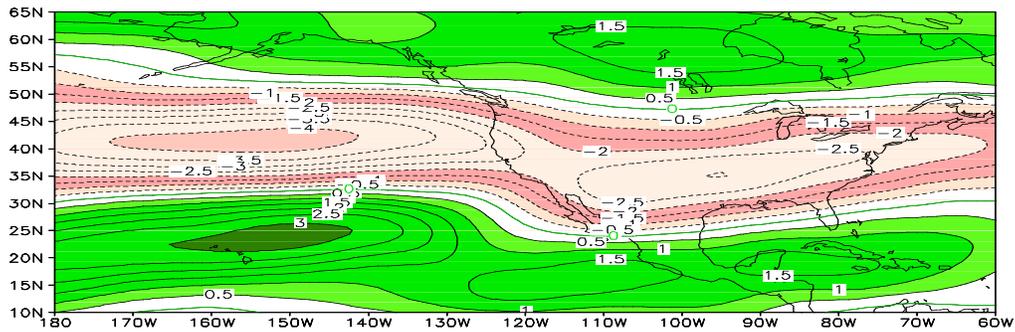
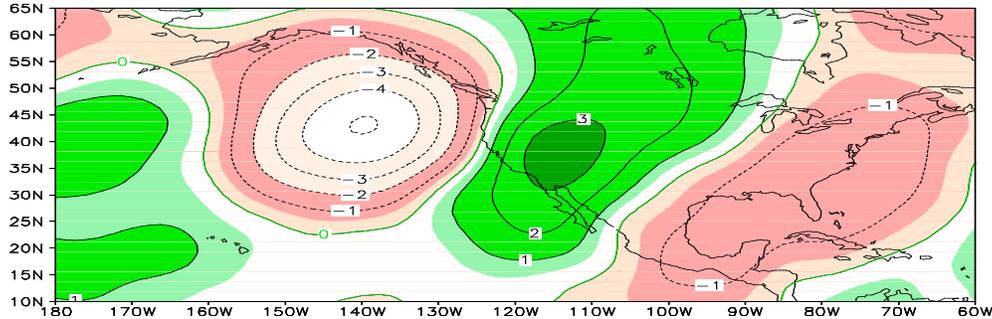


Figura 5.13 FEO para años Niña viento zonal a 500 hPa.

En el caso de la anomalías de viento meridional, también existe una correlación en el primer modo entre su signo sobre el Pacífico y el Golfo de México en 500 hPa, en ambos sitios son negativas (**Figura 5.14**), indicando estar en fase ambas señales.

Primera EOF, explica el 24.050% de la Varianza de a_{v500}
para eventos Niña (1966, 1973, 1983, 1987, 1992, 1998)



Segunda EOF, explica el 19.482% de la Varianza de a_{v500}
para eventos Niña (1966, 1973, 1983, 1987, 1992, 1998)

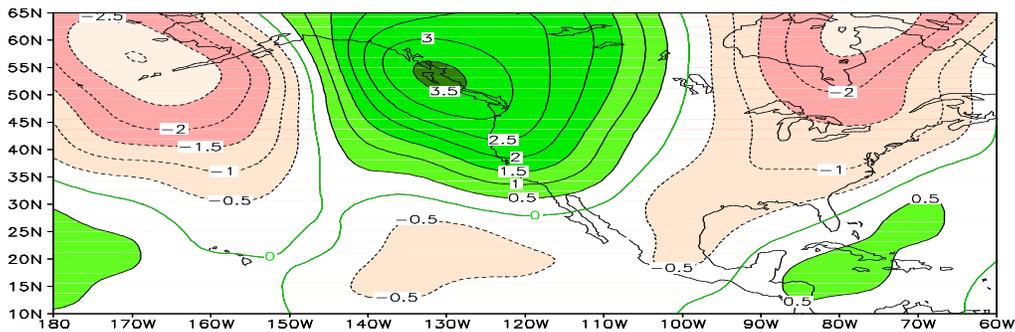
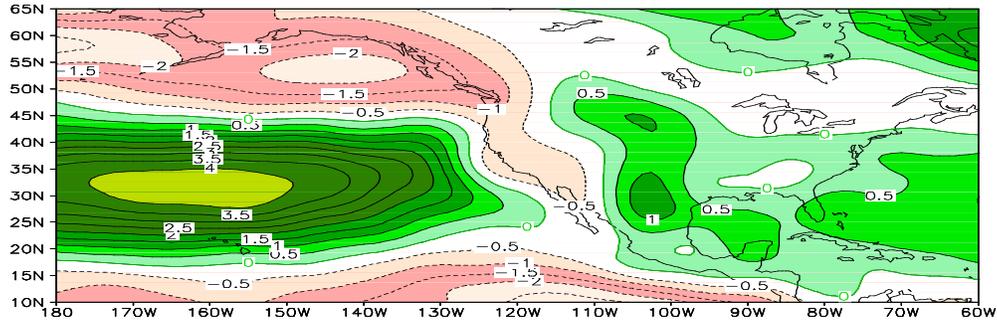


Figura 5.14 FEO para años Niña viento meridional a 500 hPa.

En la superficie, se observa también una correlación en el signo de la anomalía entre el pacífico y el Golfo de México, indicando una relación causa efecto directa entre la corriente en chorro y la intensidad de FF.

Para años Niño en general se observa la misma correlación en el signo de la anomalía entre el Pacífico y el Golfo de México para viento zonal y meridional tanto en 500 hPa como en superficie (**Figuras 5.15 a 5.20**), indicando que se mantiene la relación entre la posición de la corriente en chorro y los FF registrados en el Golfo de México.

Primera EOF, explica el 44.669% de la Varianza de a_{uwnd}
para eventos Niña (1966, 1973, 1983, 1987, 1992, 1998)



Segunda EOF, explica el 11.054% de la Varianza de a_{uwnd}
para eventos Niña (1966, 1973, 1983, 1987, 1992, 1998)

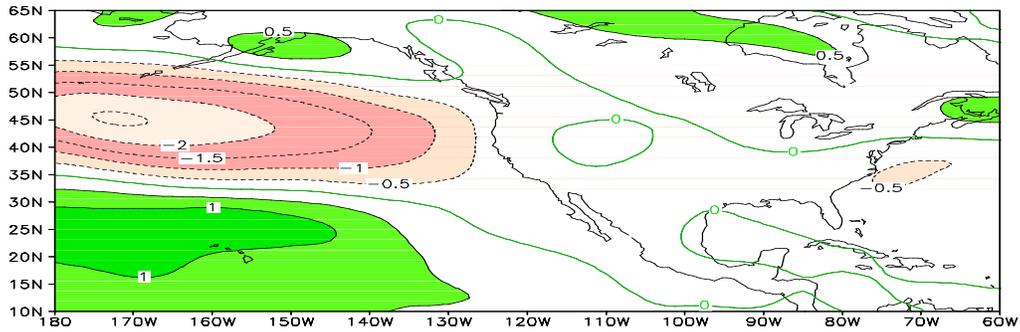
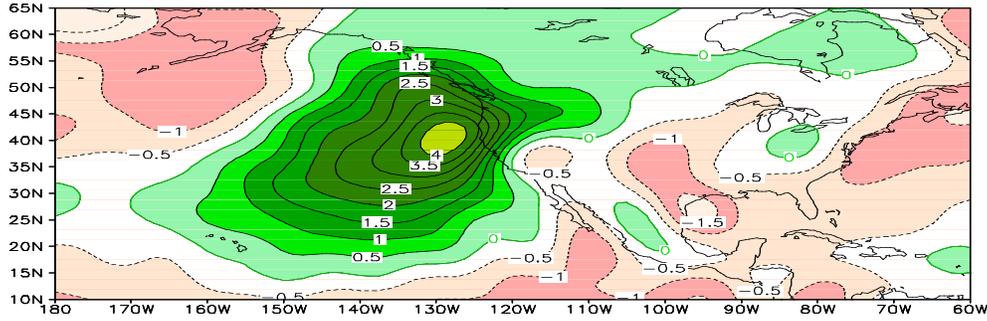


Figura 5.15 FEO para años Niña viento zonal en superficie.

Primera EOF, explica el 36./56% de la Varianza de a_vwnd
para eventos Niña (1966, 1973, 1983, 1987, 1992, 1998)



Segunda EOF, explica el 10.590% de la Varianza de a_vwnd
para eventos Niña (1966, 1973, 1983, 1987, 1992, 1998)

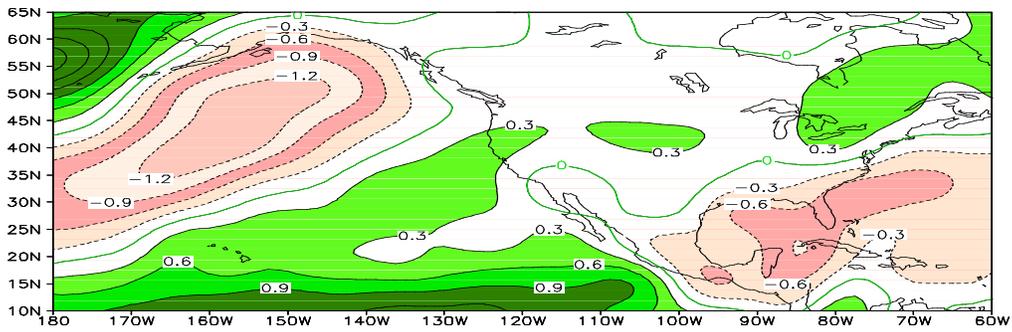
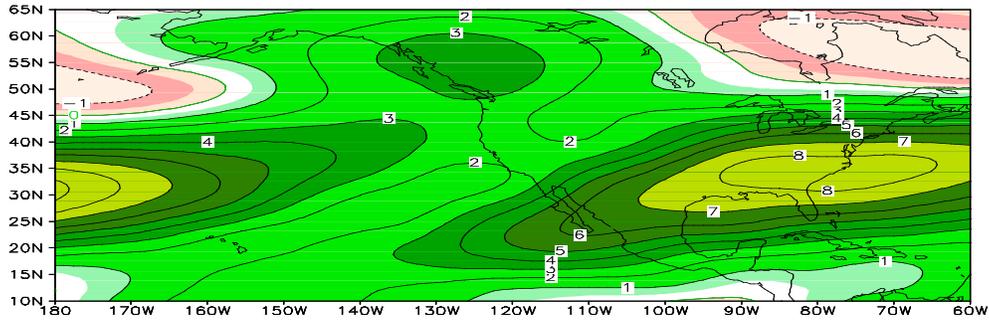


Figura 5.16 FEO para años Niña viento meridional en superficie.

Primera EOF, explica el 47.501% de la Varianza de o_{u500}
para eventos Niño (1965, 1971, 1974, 1976, 1989, 1999)



Segunda EOF, explica el 12.691% de la Varianza de o_{u500}
para eventos Niño (1965, 1971, 1974, 1976, 1989, 1999)

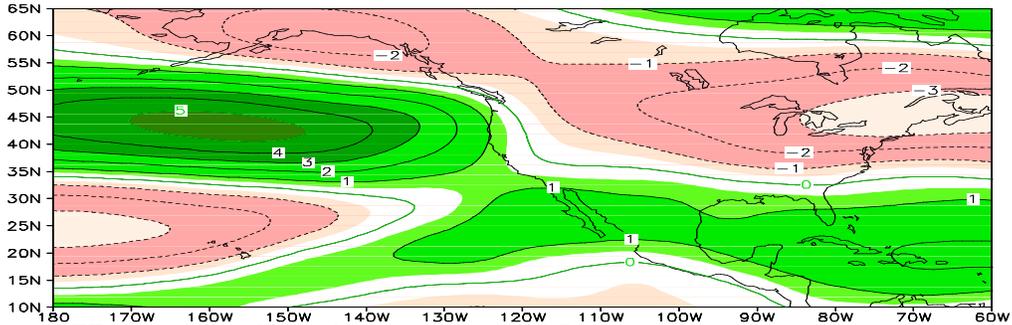
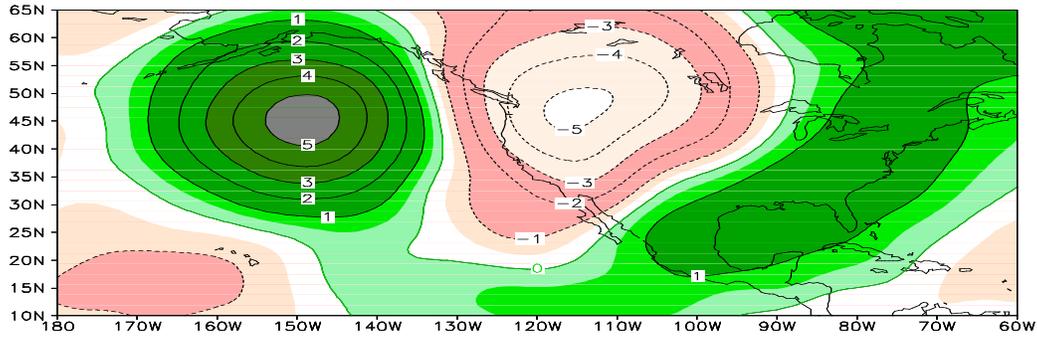


Figura 5.17 FEO para años Niño viento zonal a 500 hPa.

Primera EOF, explica el 29.464% de la Varianza de σ_{v500}
para eventos Niño (1965, 1971, 1974, 1976, 1989, 1999)



Segunda EOF, explica el 20.025% de la Varianza de σ_{v500}
para eventos Niño (1965, 1971, 1974, 1976, 1989, 1999)

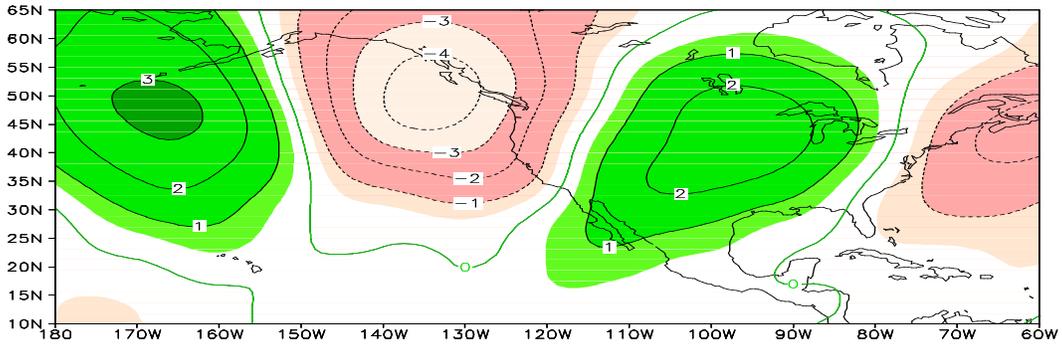
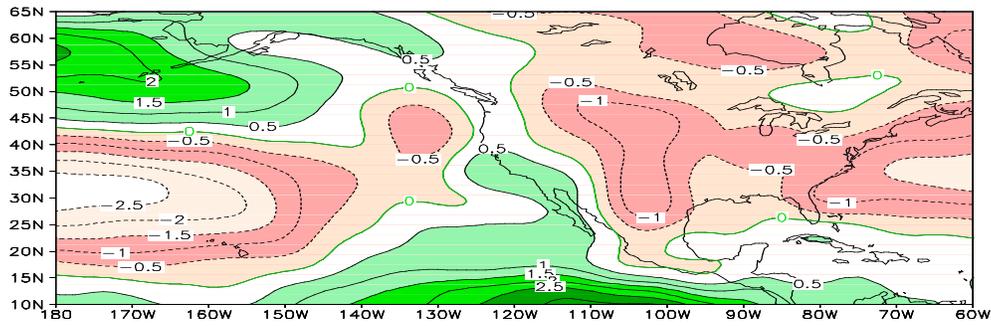


Figura 5.18 FEO para años Niño viento meridional a 500 hPa.

Primera EOF, explica el 27.449% de la Varianza de o_{uwnd}
para eventos Niño (1965, 1971, 1974, 1976, 1989, 1999)



Segunda EOF, explica el 20.125% de la Varianza de o_{uwnd}
para eventos Niño (1965, 1971, 1974, 1976, 1989, 1999)

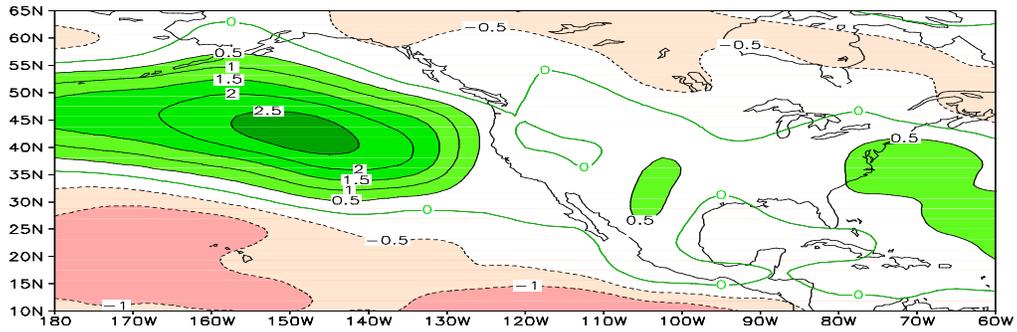
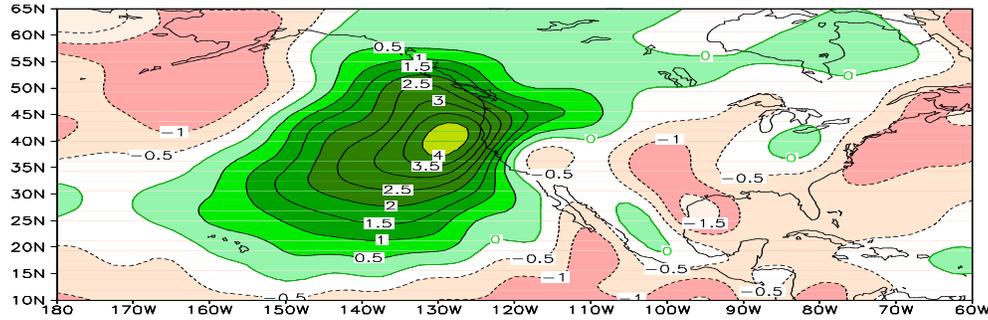


Figura 5.19 FEO para años Niño viento zonal en superficie.

Primera EOF, explica el 36.756% de la Varianza de a_{vwnd}
para eventos Niña (1966, 1973, 1983, 1987, 1992, 1998)



Segunda EOF, explica el 10.590% de la Varianza de a_{vwnd}
para eventos Niña (1966, 1973, 1983, 1987, 1992, 1998)

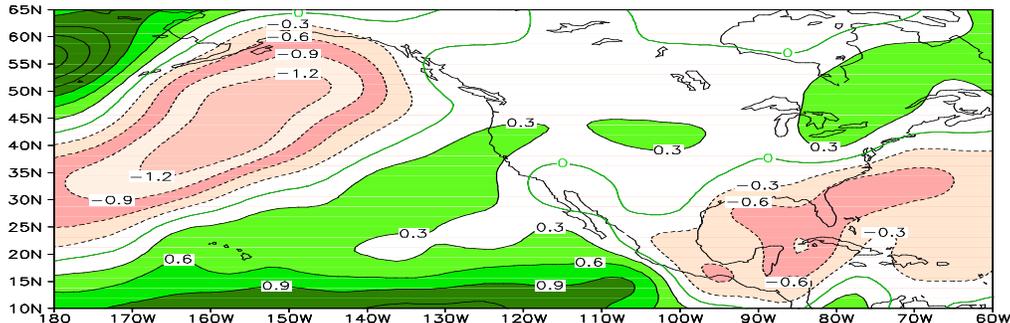


Figura 5.20 FEO para años Niño viento meridional en superficie.

Variabilidad en frecuencia para años Niña.

Para conocer la variabilidad de los eventos con los períodos más significativos identificados en etapas previas (5 y 9 días), se calculó su varianza en las 7 regiones del estudio tanto para años Niño como años Niña.

En años Niña, para los FF de 5 días de período se observa una gran variabilidad en este grupo de años, los cuales se refieren a los inviernos formados por dos años consecutivos (diciembre a marzo). La variabilidad temporal muestra que en la Región 1, (ver **Figura 5.1**) en el invierno de 1964-65 hubo la mayor varianza, esto en el mes de abril, mientras que para el invierno de 1970-71 fue mayor en diciembre, la media de todos los años Niña muestra una distribución temporal uniforme con dos máximos relativos, el primero durante diciembre-enero y el segundo durante abril-mayo (**Figura 5.21**).

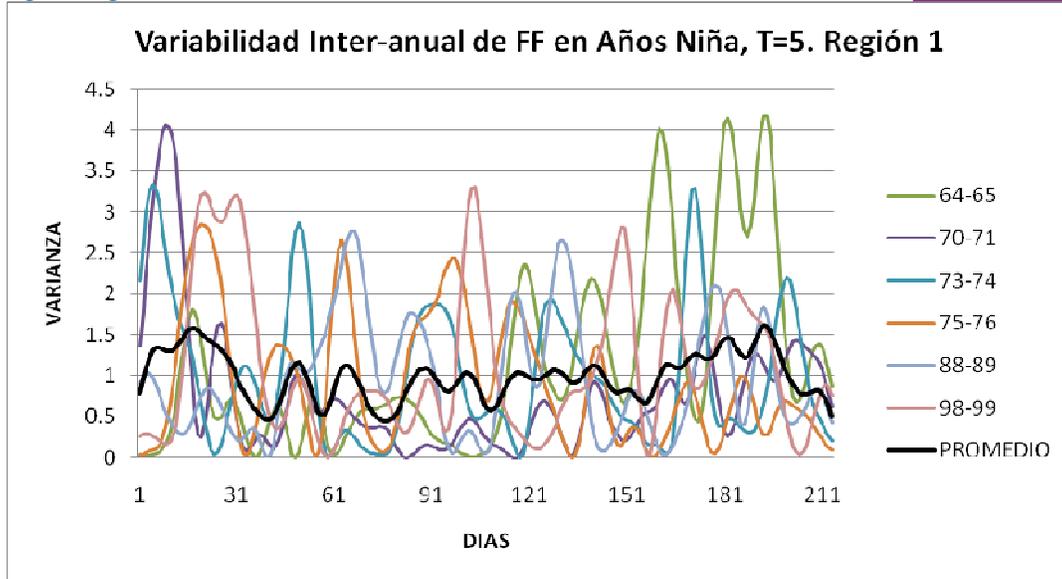


Figura 5.21 Varianza en años Niña para perturbaciones de 5 días de período en la Región 1 (ver mapa **Figura 5.1**).

En la región 2 la varianza media es mayor (**Figura 5.22**), manteniéndose el invierno de 1964-65 como el de mayor valor, pero en los meses de marzo-abril.

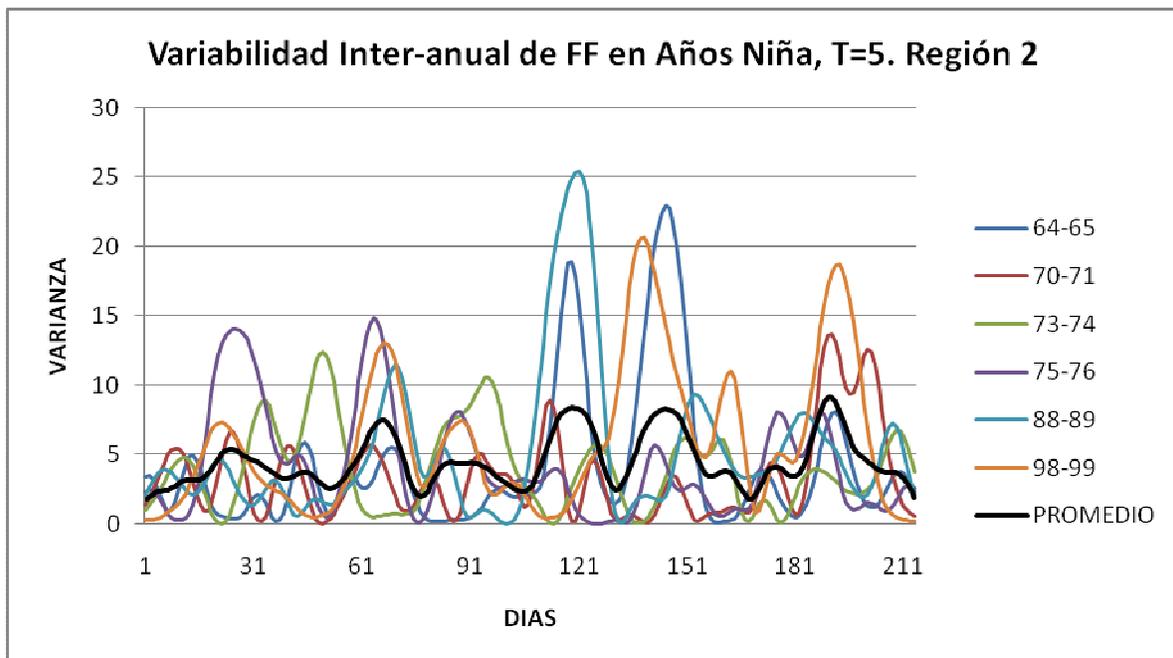


Figura 5.22 Varianza en años Niña para perturbaciones de 5 días de período en la Región 2 (ver mapa **Figura 5.1**).

En la región 4 aumenta aún más su varianza (**Figura 5.23**), siendo ésta la región con mayor varianza de las 7 del estudio. Hacia el sur de esta zona (regiones 5 a 7) la varianza disminuye.

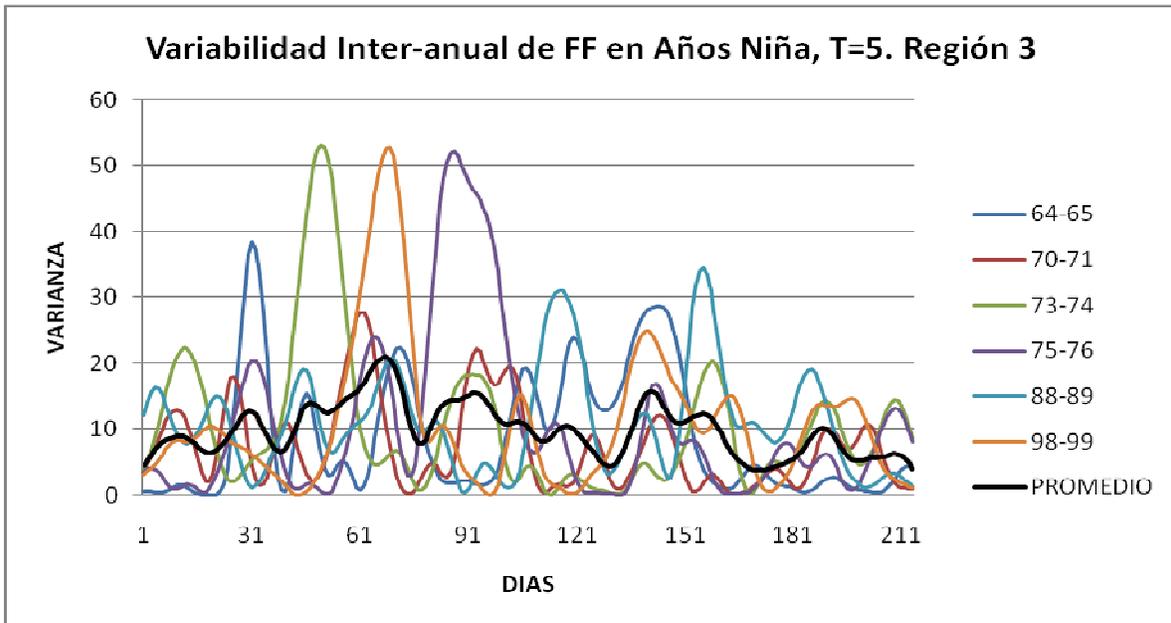


Figura 5.23 Varianza en años Niña para perturbaciones de 5 días de período en la Región 3 (ver mapa **Figura 5.1**).

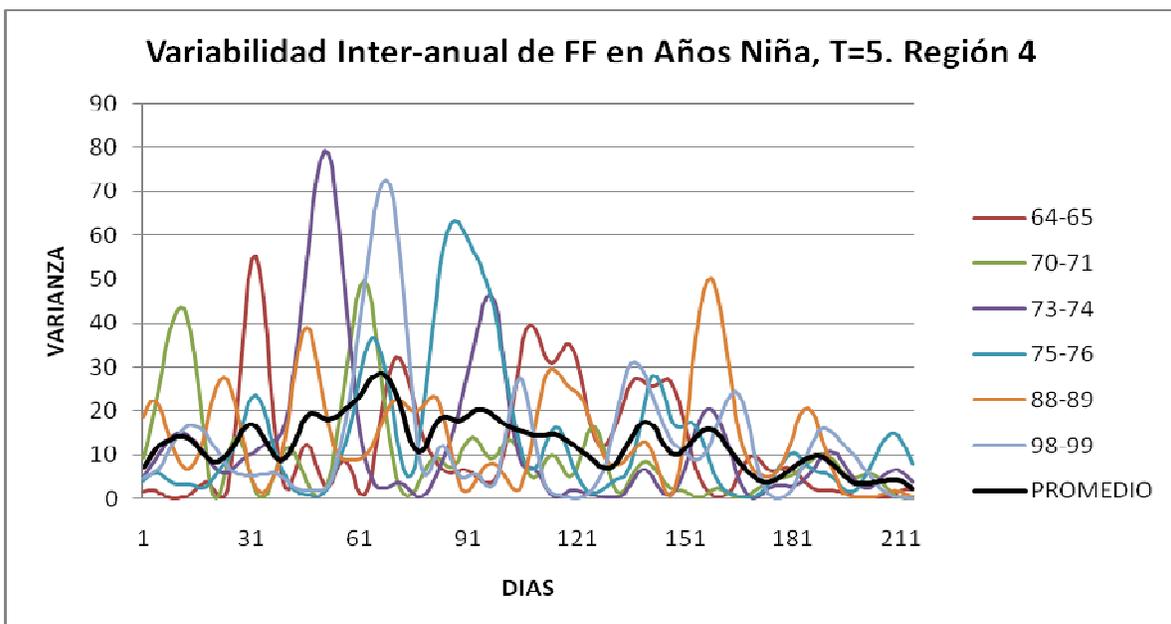


Figura 5.24 Varianza en años Niña para perturbaciones de 5 días de período en la Región 4 (ver mapa **Figura 5.1**).

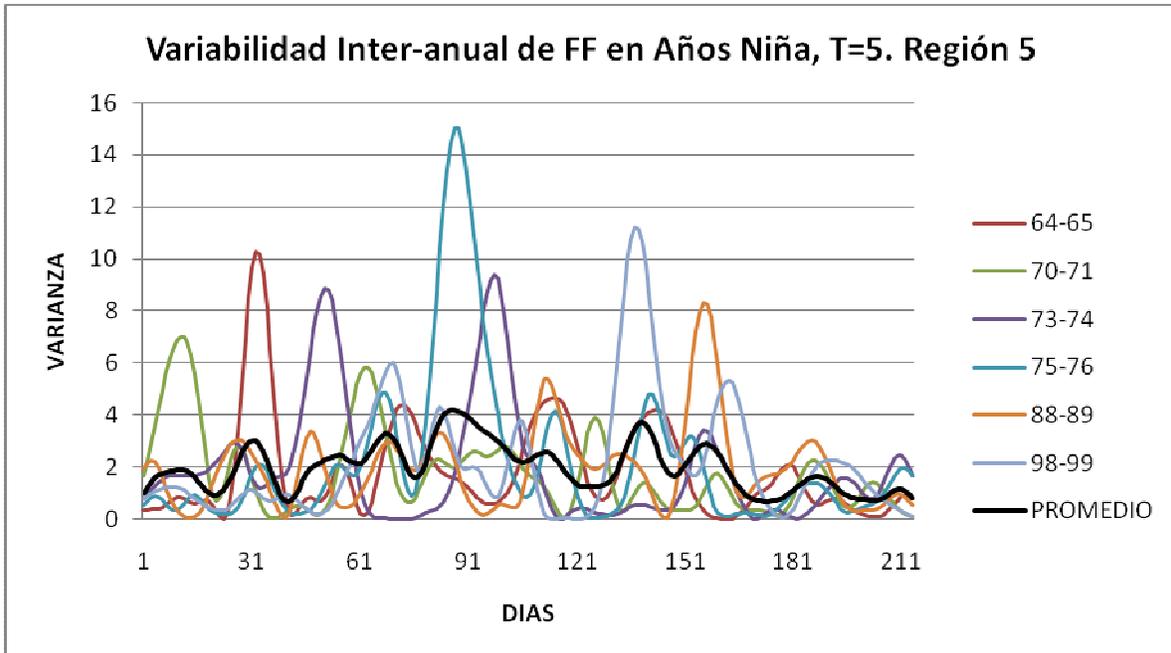


Figura 5.25 Varianza en años Niña para perturbaciones de 5 días de período en la Región 5 (ver mapa **Figura 5.1**).

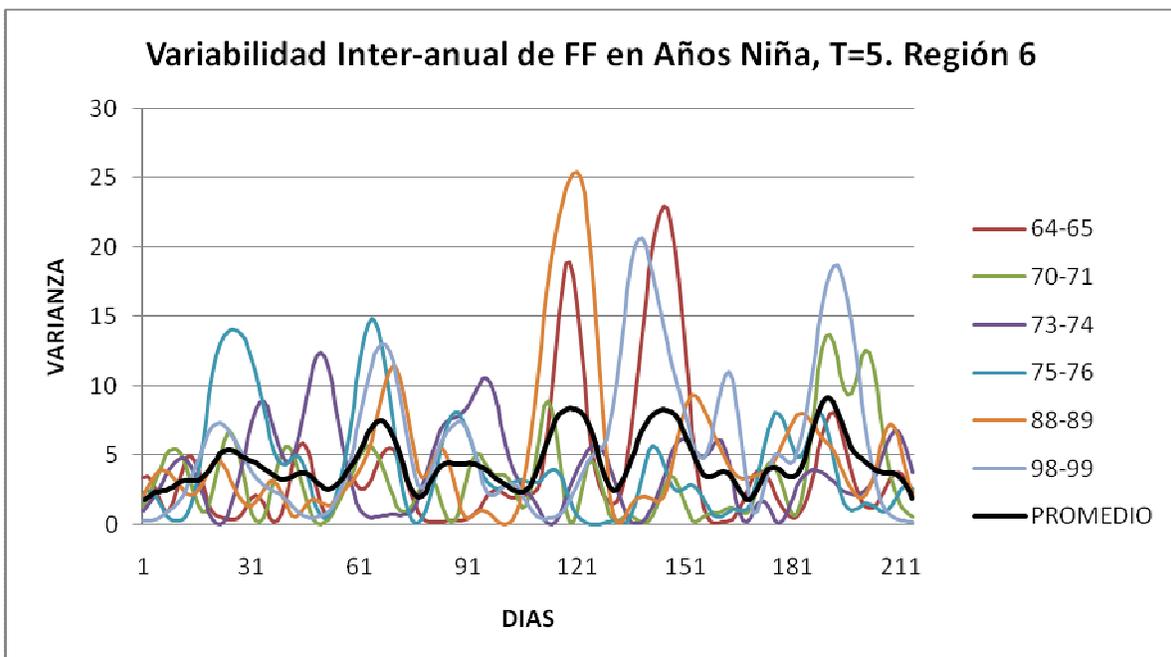


Figura 5.26 Varianza en años Niña para perturbaciones de 5 días de período en la Región 6 (ver mapa **Figura 5.1**).

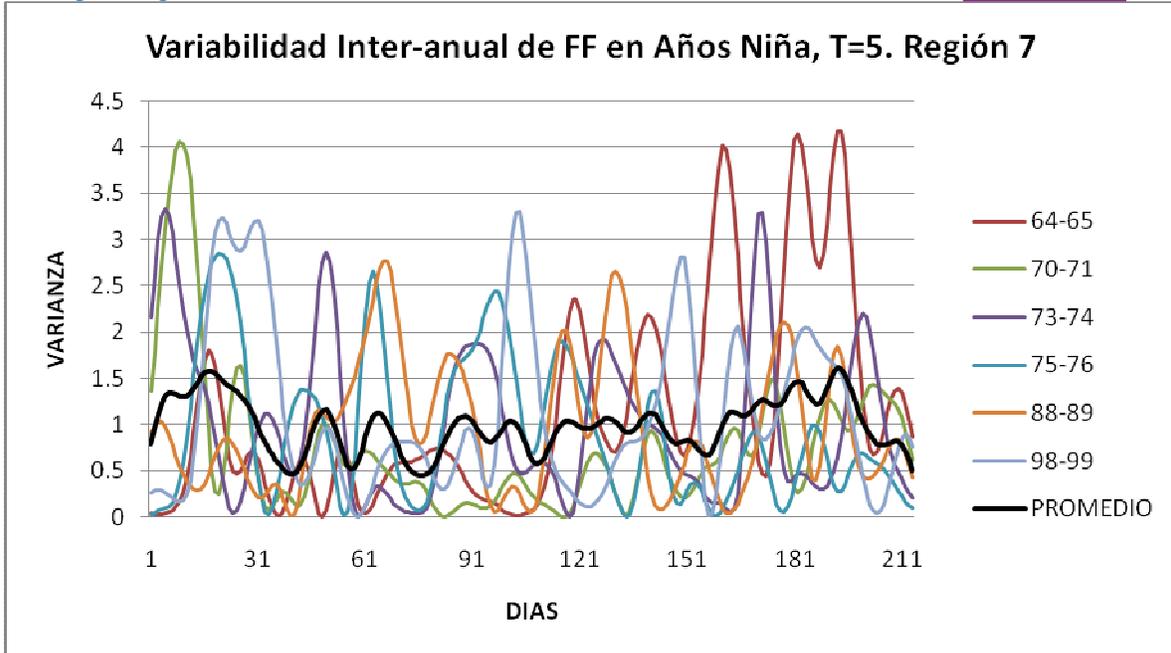


Figura 5.27 Varianza en años Niña para perturbaciones de 5 días de período en la Región 7 (ver mapa **Figura 5.1**).

La variabilidad espacial muestra que para todos los años Niña las regiones 3 y 4 son las de mayor varianza (**Figura 5.28**), por encima de la media, mientras que las regiones 1 (la más al norte) y 7 (la más al sur) registraron varianzas menores a la media. En las regiones de mayores valores: 3 y 4 se observa un máximo absoluto en ambos casos en los meses de febrero (entre los días 31 y 61 del registro) y máximos relativos entre marzo y abril y mayo y junio.

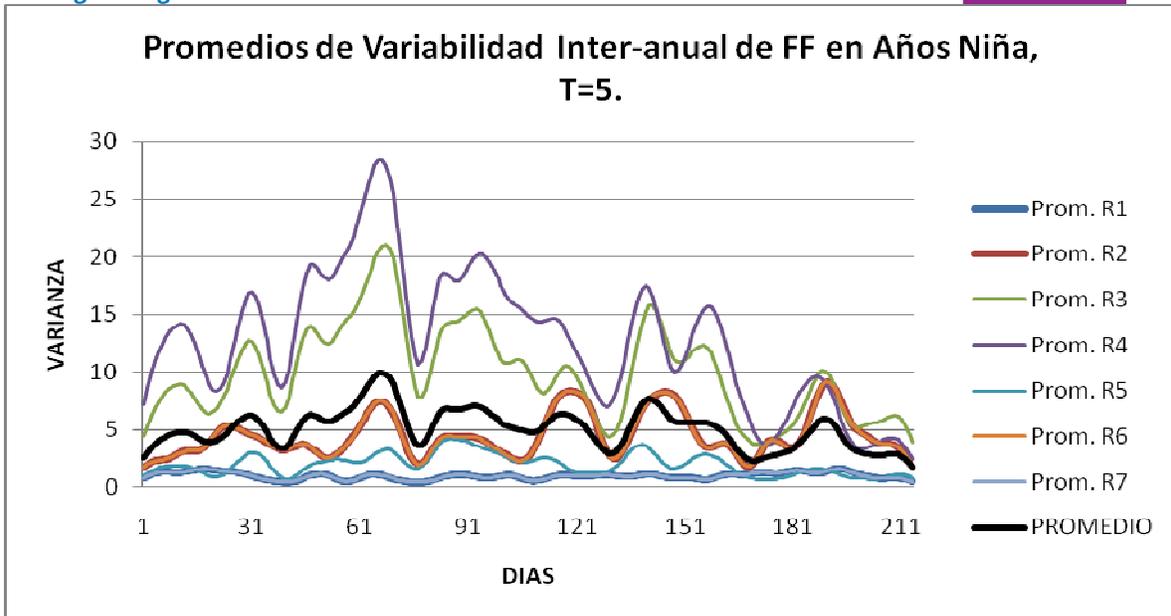


Figura 5.28 Varianza en años Niña media para perturbaciones de 5 días en todas las Regiones (ver mapa **Figura 5.1**).

Para las perturbaciones de 9 días de período, en la Región 1, a excepción del invierno de 1973 y 74 existe una baja varianza (**Figuras 5.29 a 5.35**), siendo las regiones 3 y 4 las de mayor varianza, como se observó para las perturbaciones de 5 días.

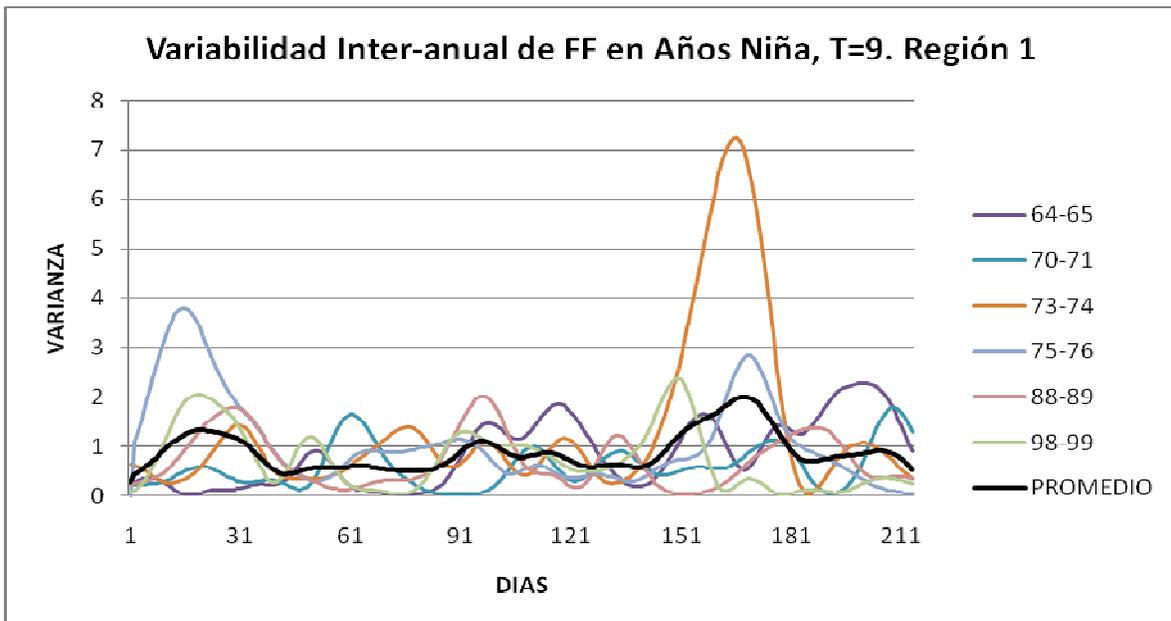


Figura 5.29 Varianza en años Niña para perturbaciones de 9 días de período en la Región 1 (ver mapa **Figura 5.1**).

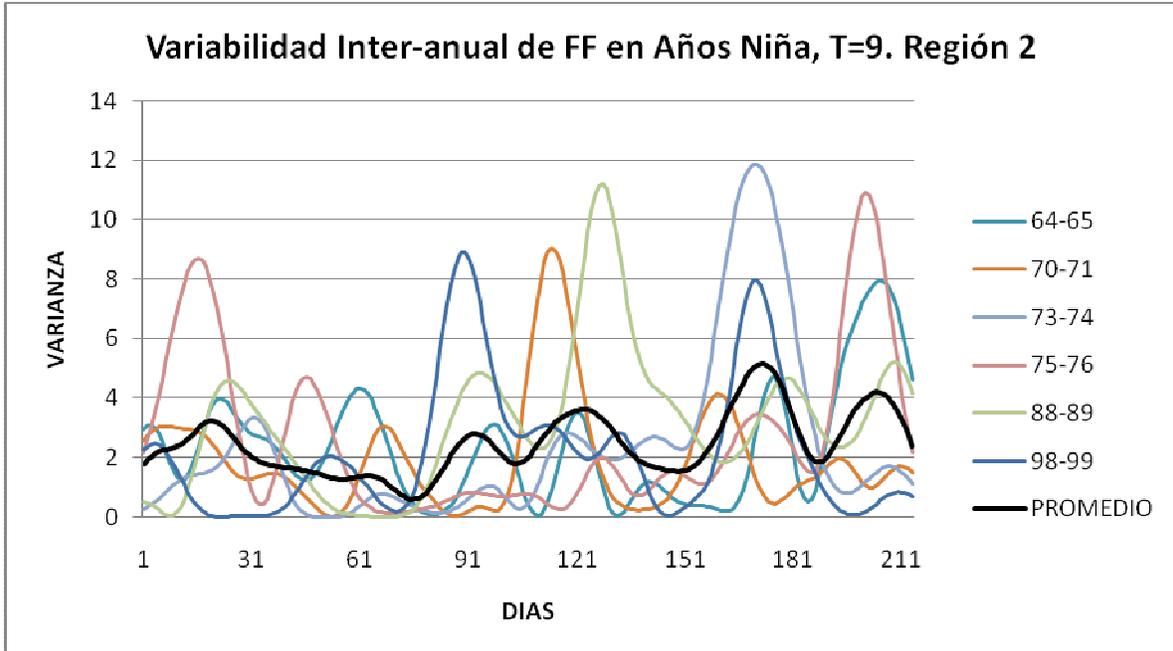


Figura 5.30 Varianza en años Niña para perturbaciones de 9 días de período en la Región 2 (ver mapa **Figura 5.1**).

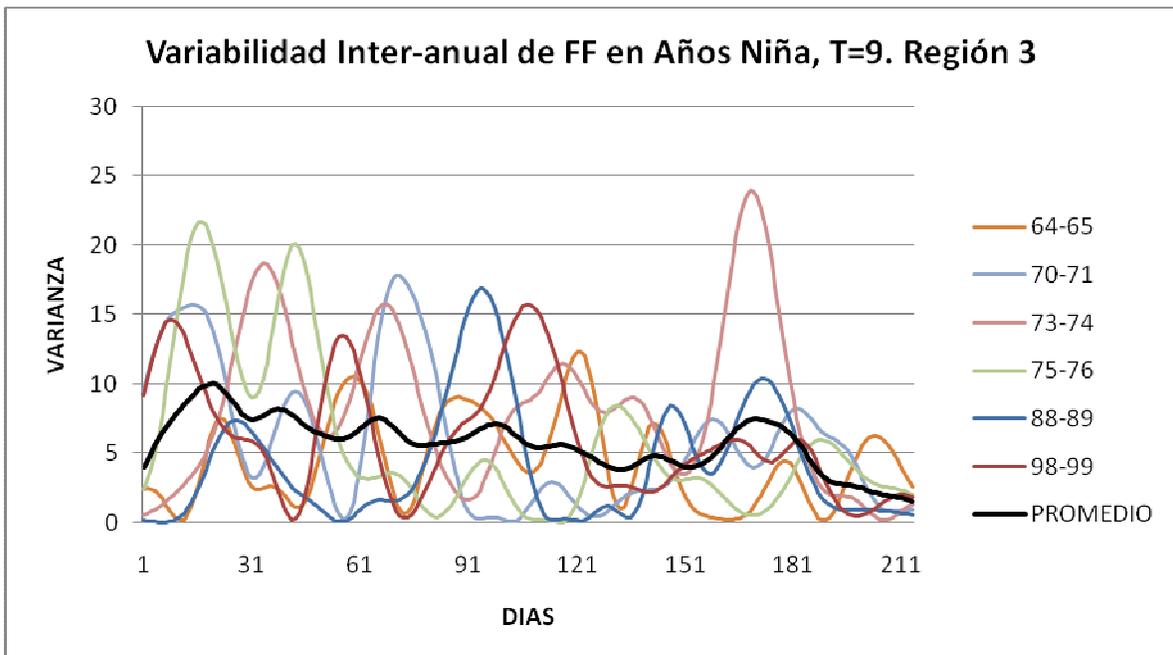


Figura 5.31 Varianza en años Niña para perturbaciones de 9 días de período en la Región 3 (ver mapa **Figura 5.1**).

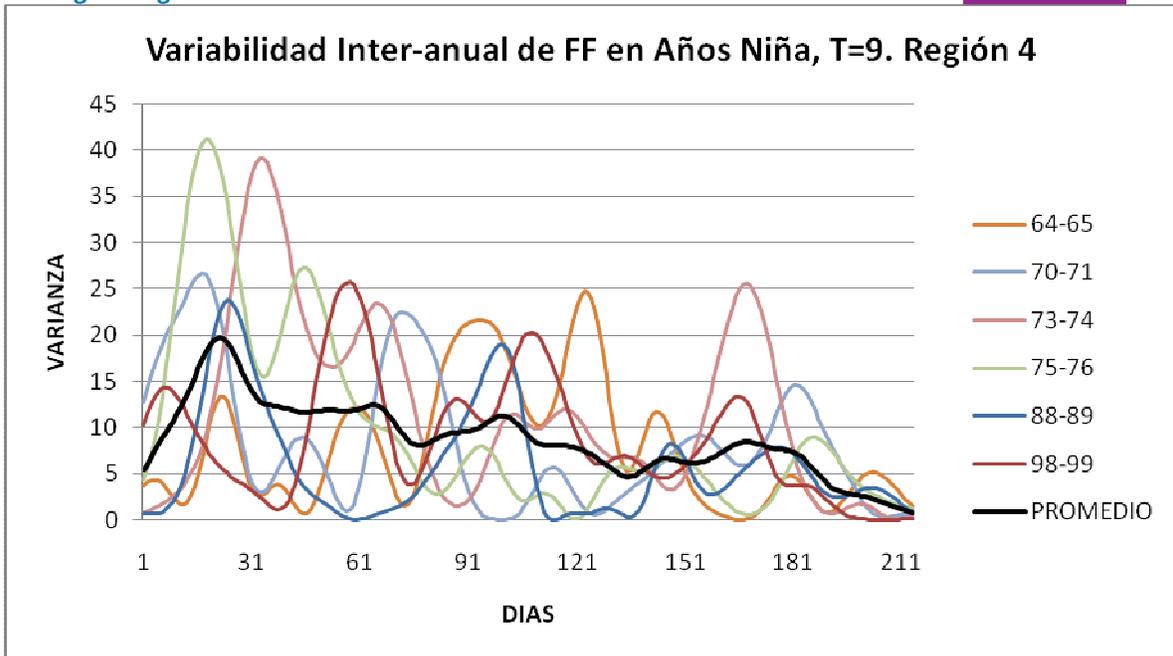


Figura 5.32 Varianza en años Niña para perturbaciones de 9 días de período en la Región 4 (ver mapa **Figura 5.1**).

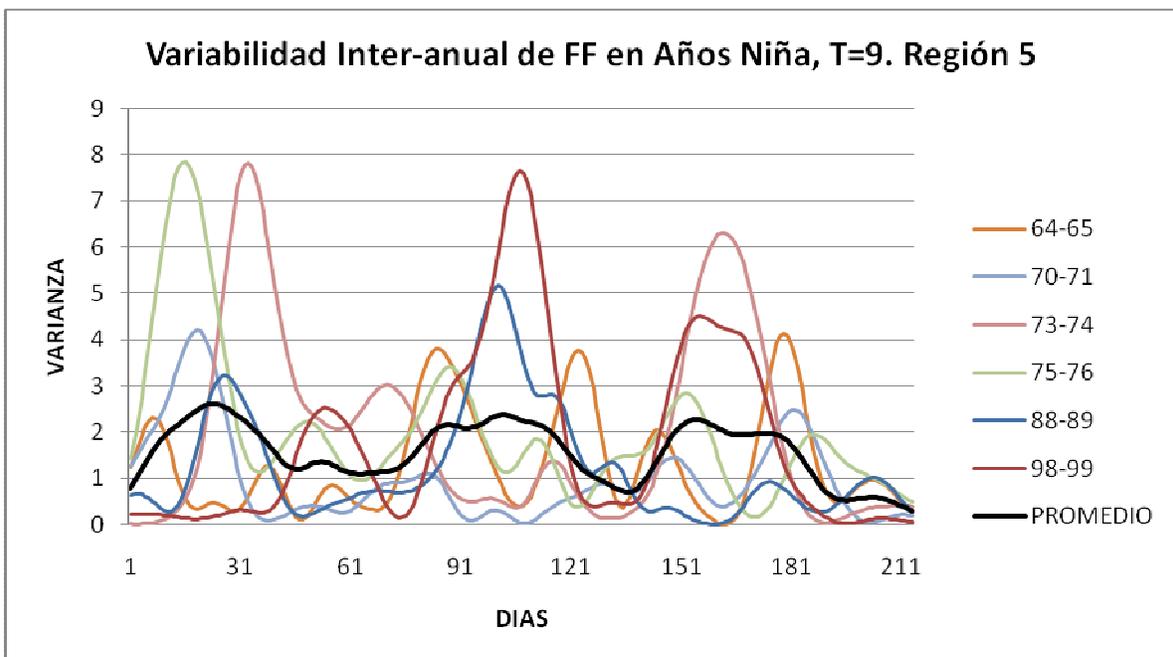


Figura 5.33 Varianza en años Niña para perturbaciones de 9 días de período en la Región 5 (ver mapa **Figura 5.1**).

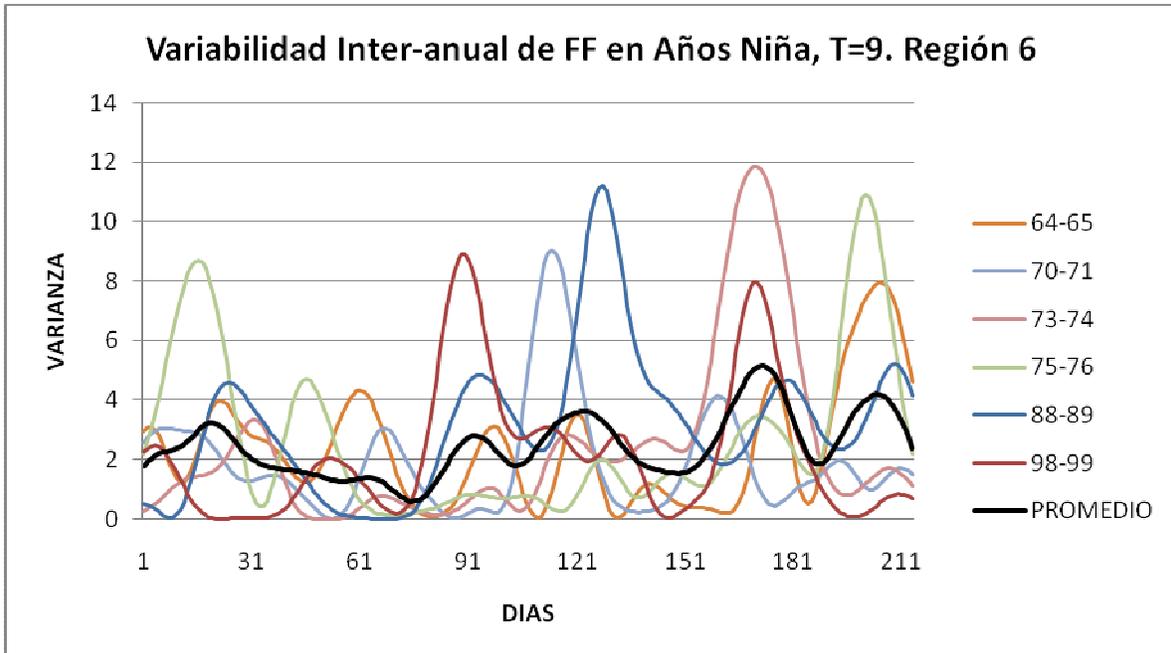


Figura 5.34 Varianza en años Niña para perturbaciones de 9 días de período en la Región 6 (ver mapa **Figura 5.1**).

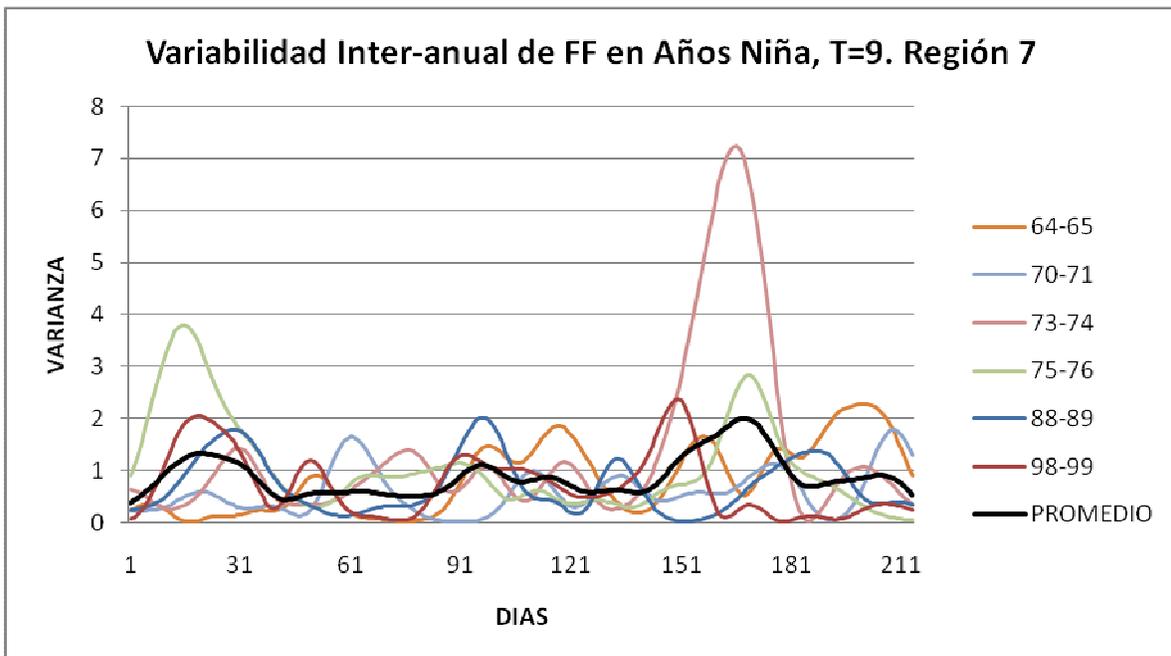


Figura 5.35 Varianza en años Niña para perturbaciones de 9 días de período en la Región 7 (ver mapa **Figura 5.1**).

Las medias de varianza por regiones muestran que el período de 9 días además de mantener a las regiones 3v y 4 como las de mayores valores, éstos se presentan en una distribución decreciente al avanzar la temporada de FF (**Figura 5.36**)

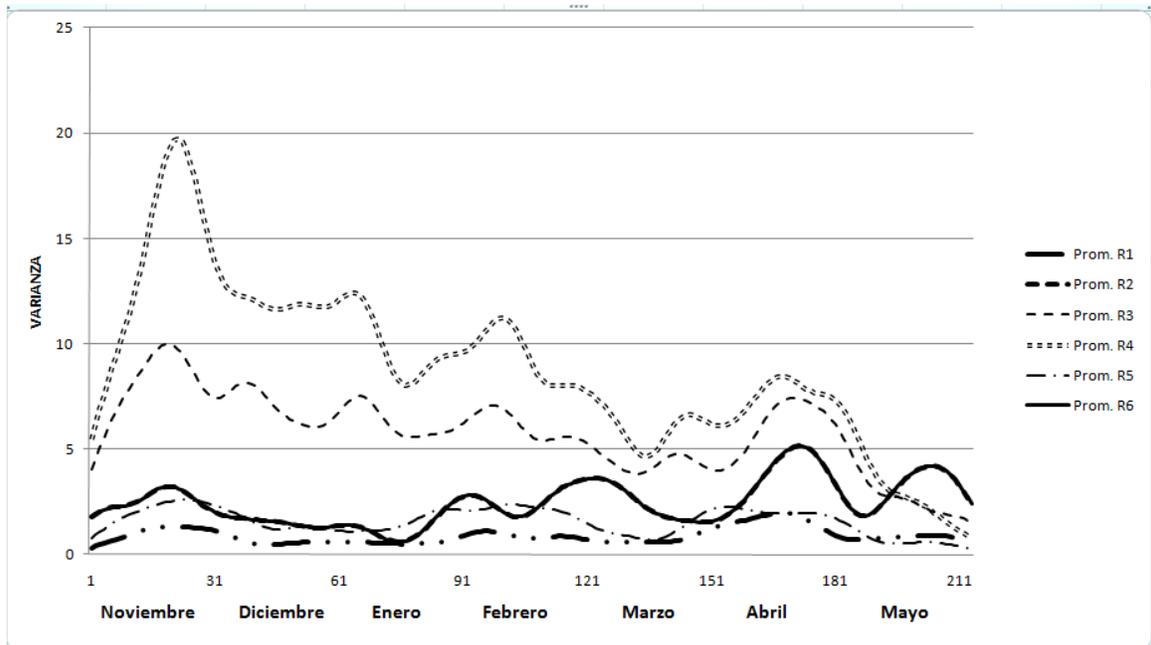


Figura 5.36 Varianza en años Niña para perturbaciones de 9 días de período en todas las Regiones en año Niña(ver mapa **Figura 5.1**).

Variabilidad en frecuencia para años Niño

Para años Niño la varianza de las siete regiones se distribuye más homogéneamente en el tiempo (**Figuras 5.37 a 5.51**), manteniéndose las regiones 3 y 4 las de valores mayores.

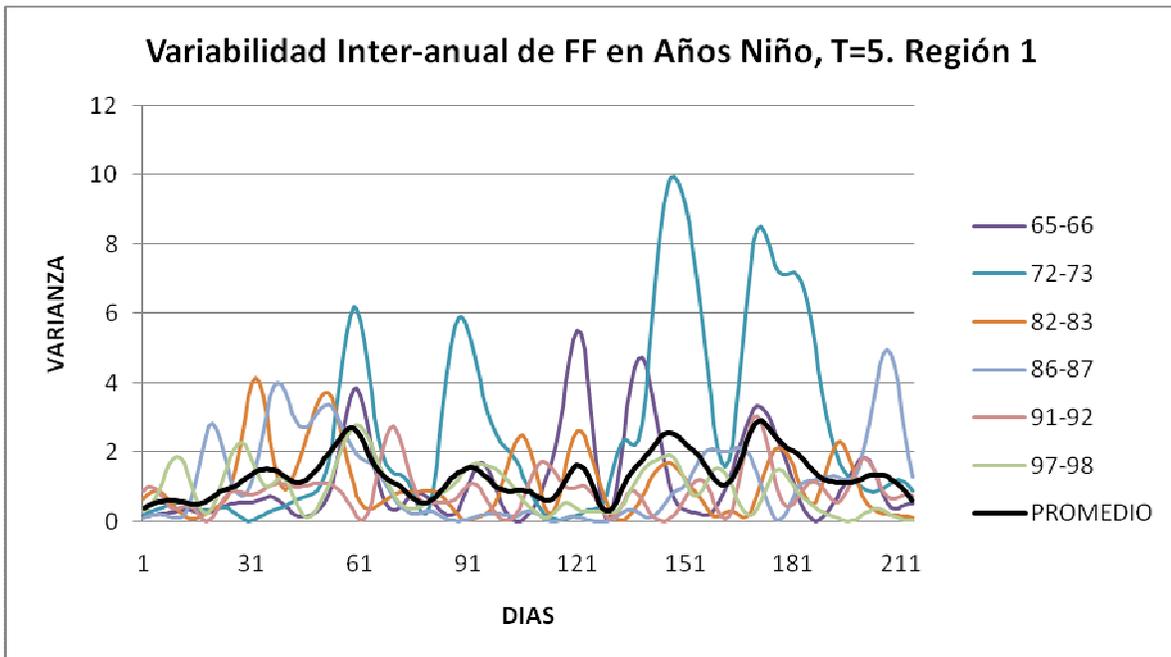


Figura 5.37 Varianza en años Niño para perturbaciones de 5 días de período en la Región 1 (ver mapa **Figura 5.1**).

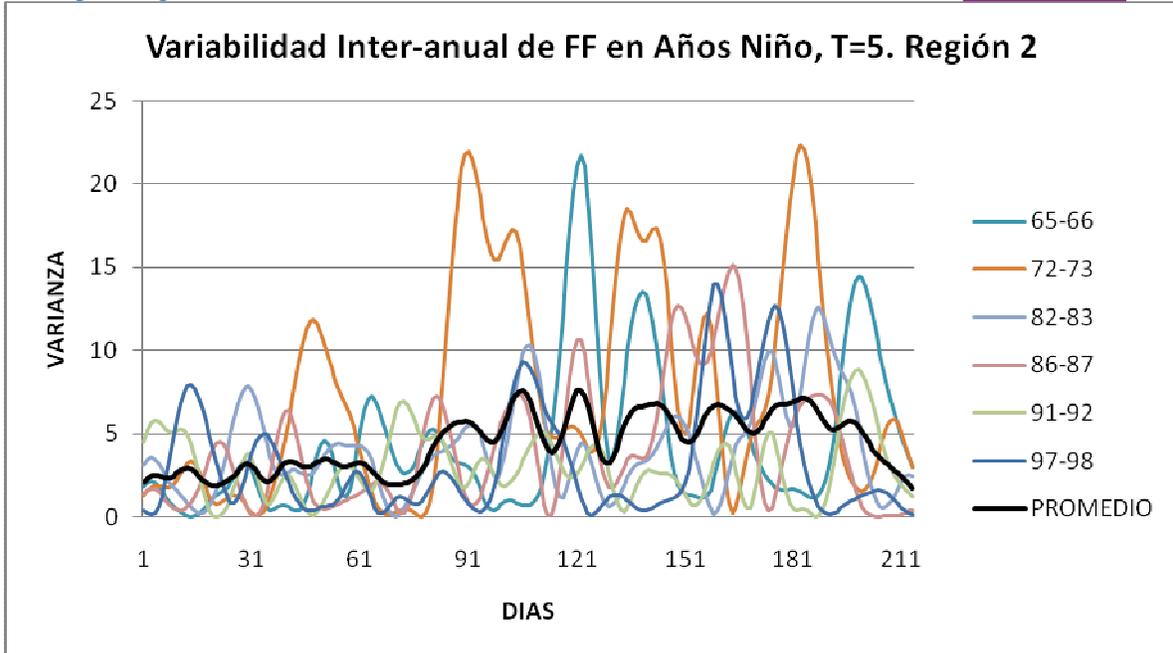


Figura 5.38 Varianza en años Niño para perturbaciones de 5 días de período en la Región 2 (ver mapa **Figura 5.1**).

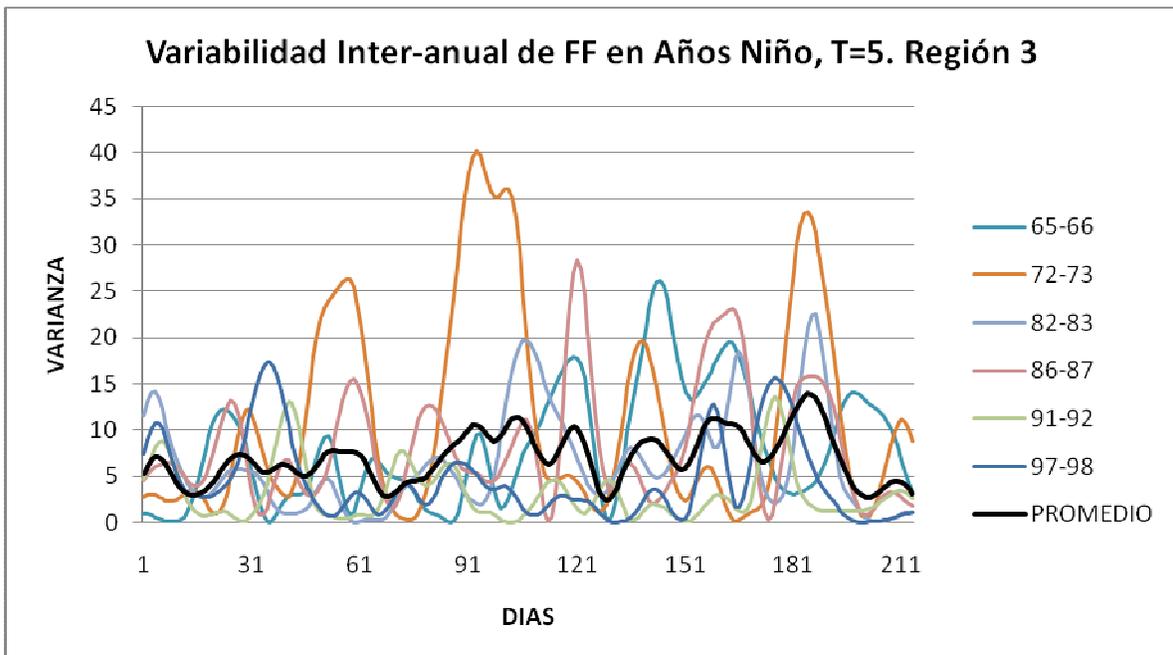


Figura 5.39 Varianza en años Niño para perturbaciones de 5 días de período en la Región 3 (ver mapa **Figura 5.1**).

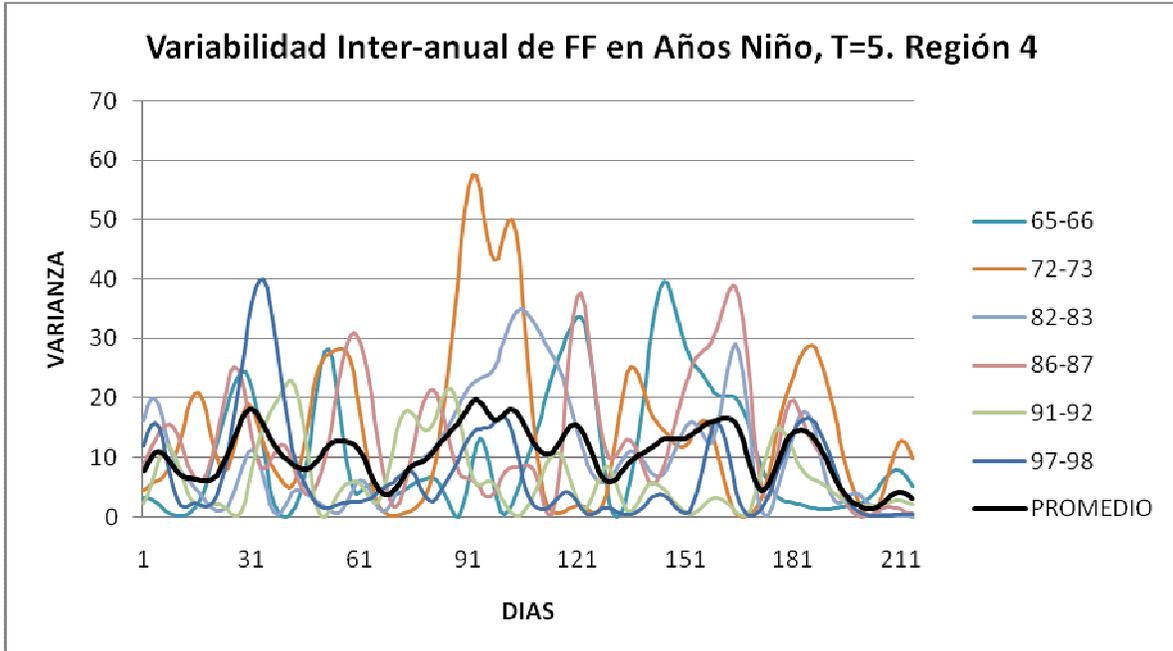


Figura 5.40 Varianza en años Niño para perturbaciones de 5 días de período en la Región 4 (ver mapa **Figura 5.1**).

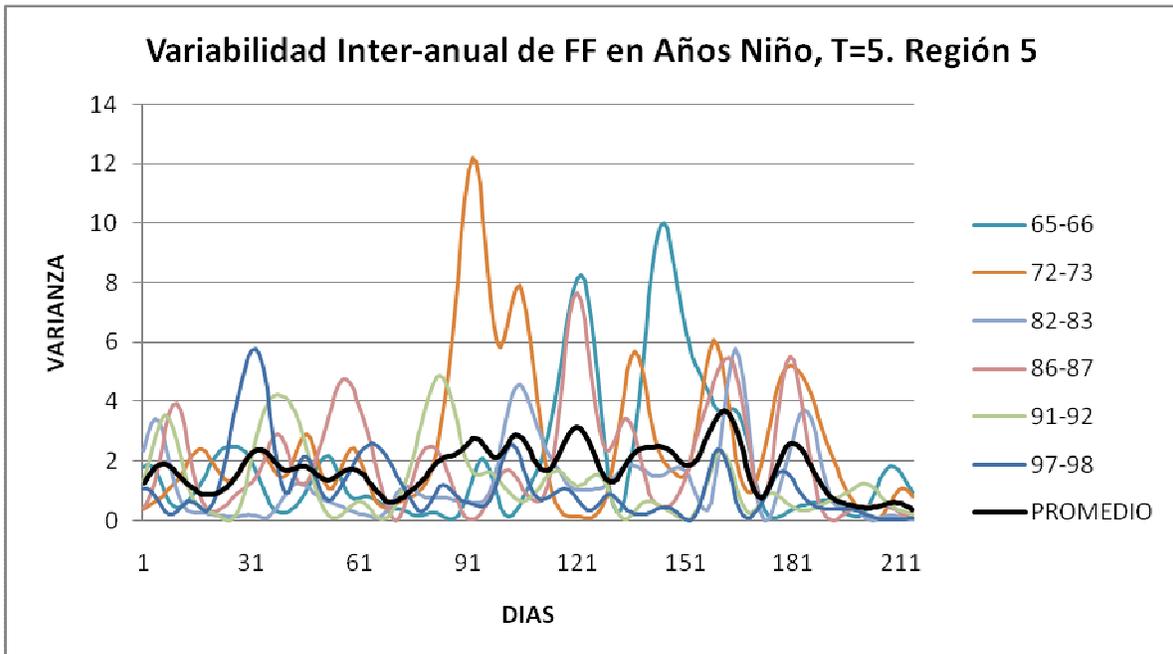


Figura 5.41 Varianza en años Niño para perturbaciones de 5 días de período en la Región 5 (ver mapa **Figura 5.1**).

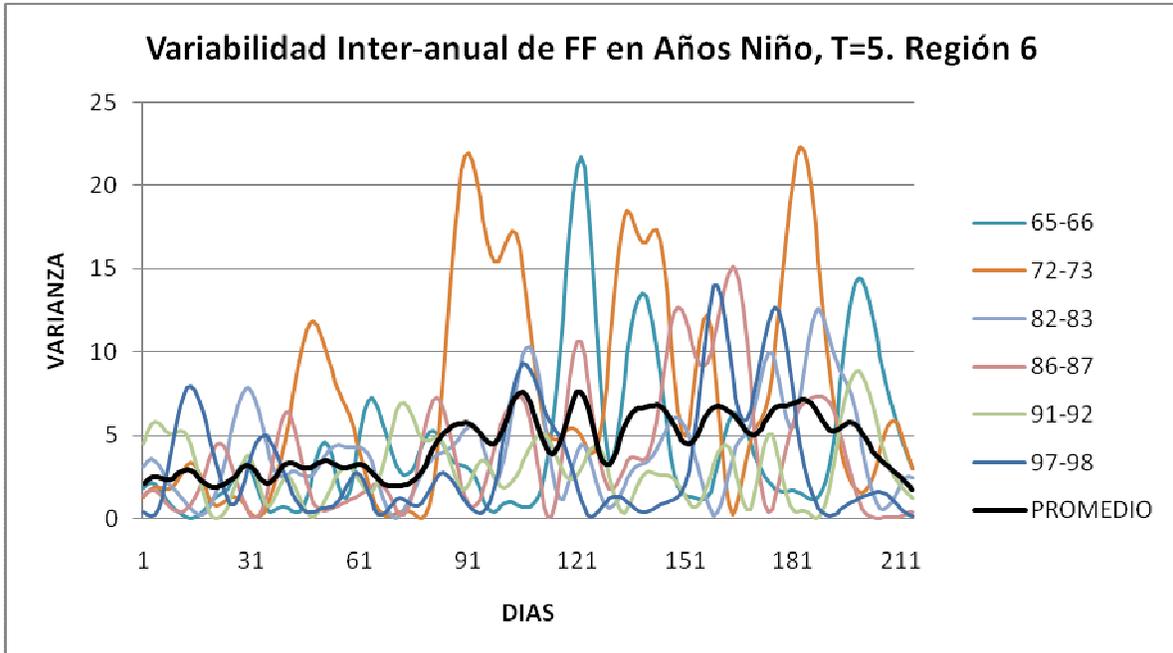


Figura 5.42 Varianza en años Niño para perturbaciones de 5 días de período en la Región 6 (ver mapa **Figura 5.1**).

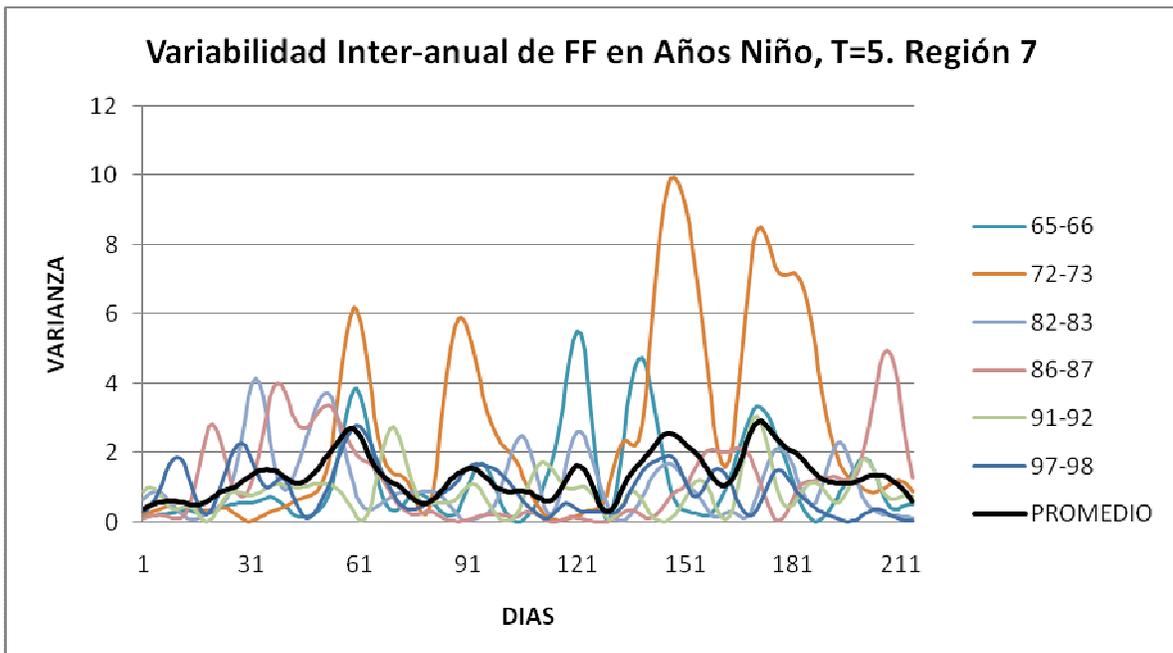


Figura 5.43 Varianza en años Niño para perturbaciones de 5 días de período en la Región 7 (ver mapa **Figura 5.1**).

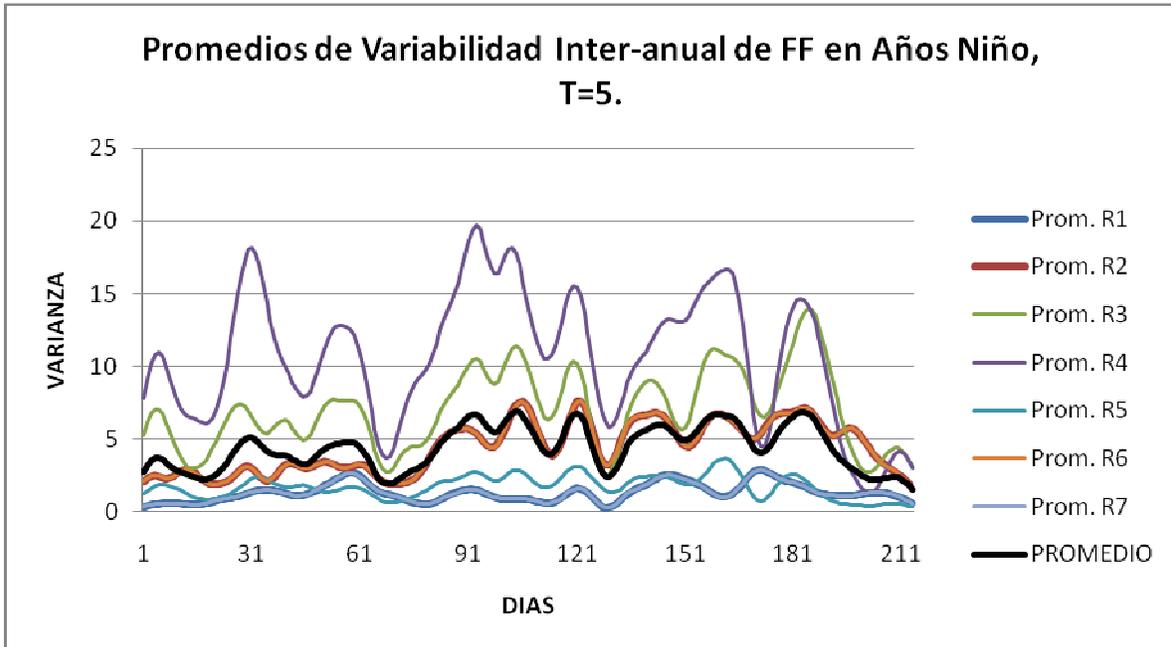


Figura 5.44 Varianza en años Niño para perturbaciones de 5 días de período en todas las regiones (ver mapa **Figura 5.1**).

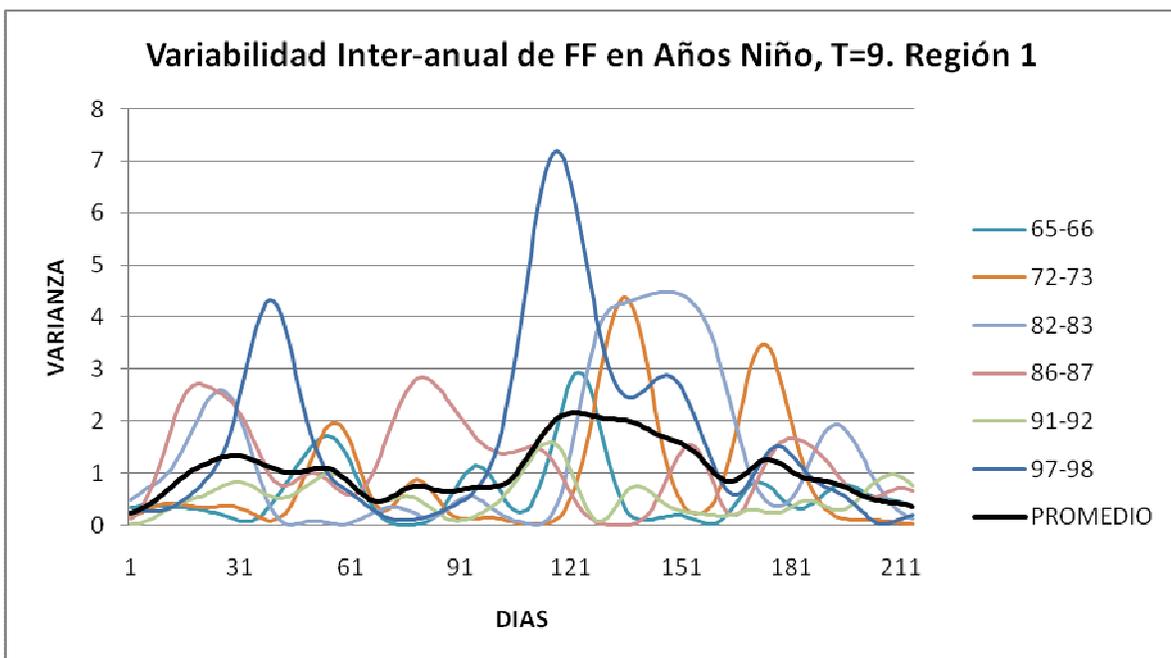


Figura 5.45 Varianza en años Niño para perturbaciones de 9 días de período en la Región 1 (ver mapa **Figura 5.1**).

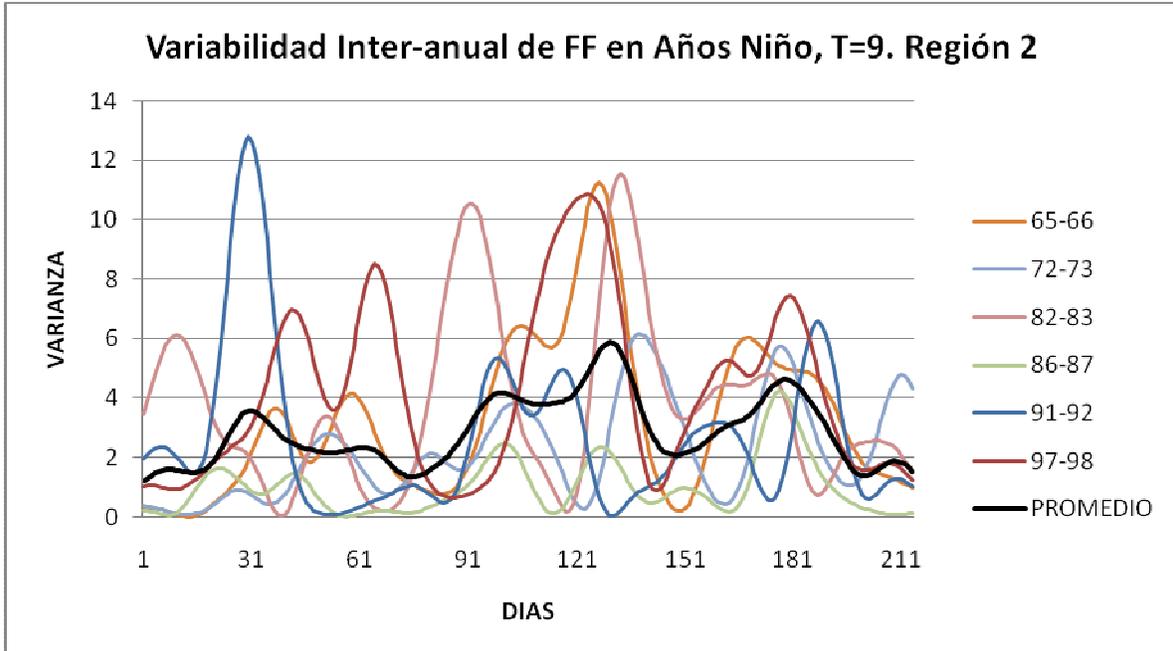


Figura 5.46 Varianza en años Niño para perturbaciones de 9 días de período en la Región 2 (ver mapa **Figura 5.1**).

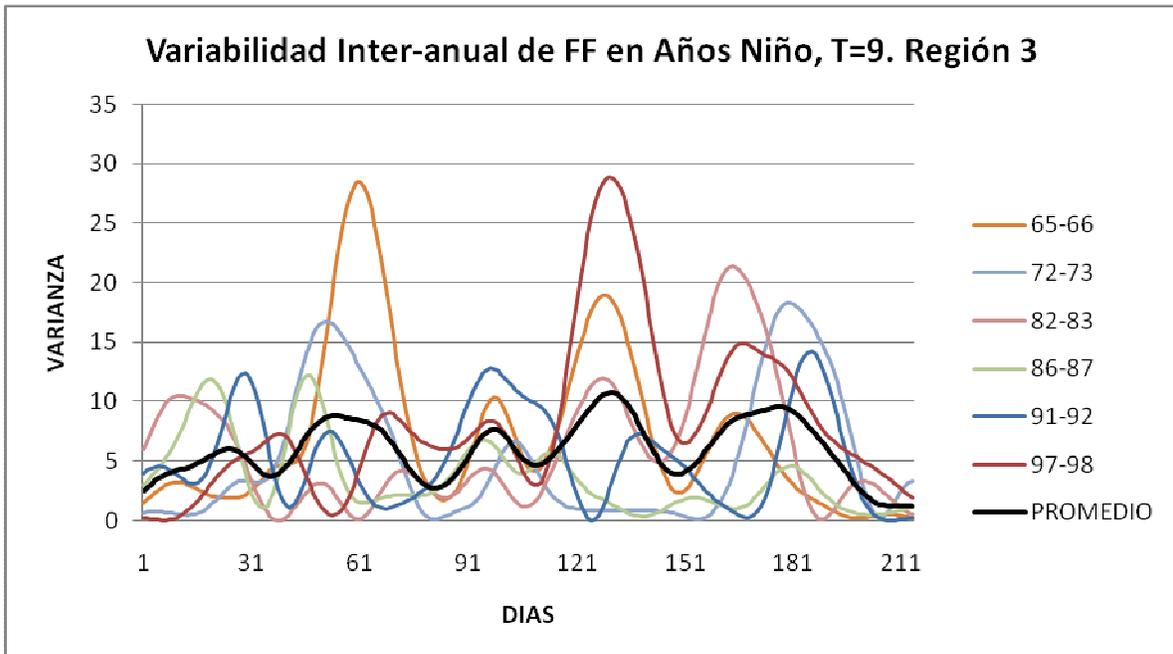


Figura 5.47 Varianza en años Niño para perturbaciones de 9 días de período en la Región 3 (ver mapa **Figura 5.1**).

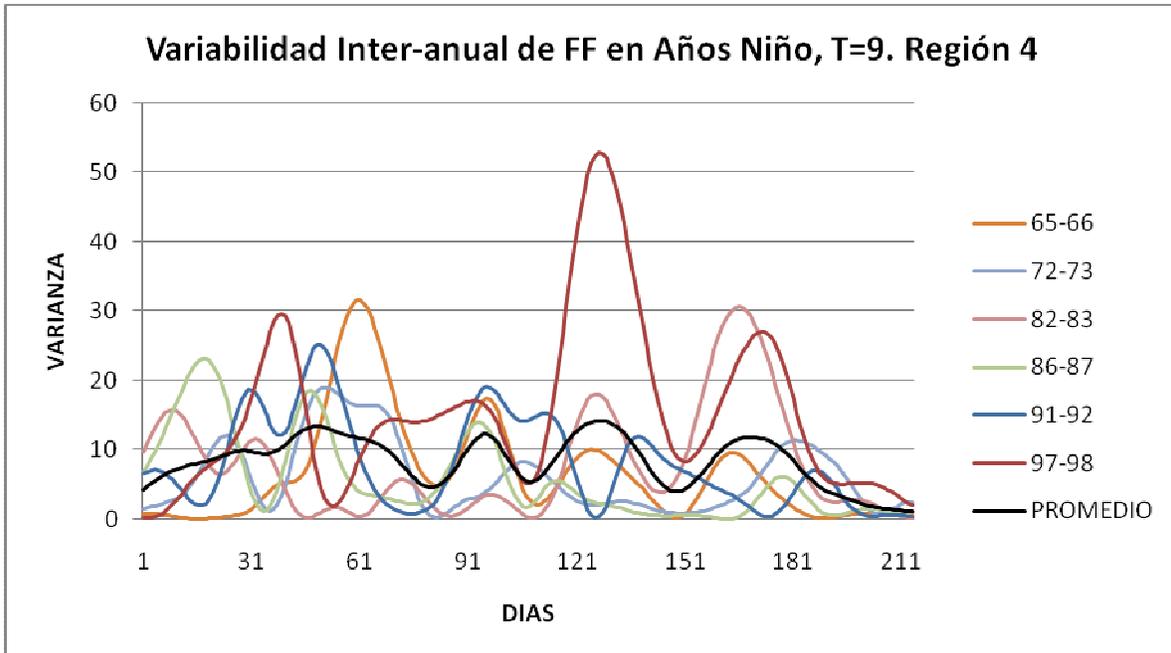


Figura 5.48 Varianza en años Niño para perturbaciones de 9 días de período en la Región 4 (ver mapa **Figura 5.1**).

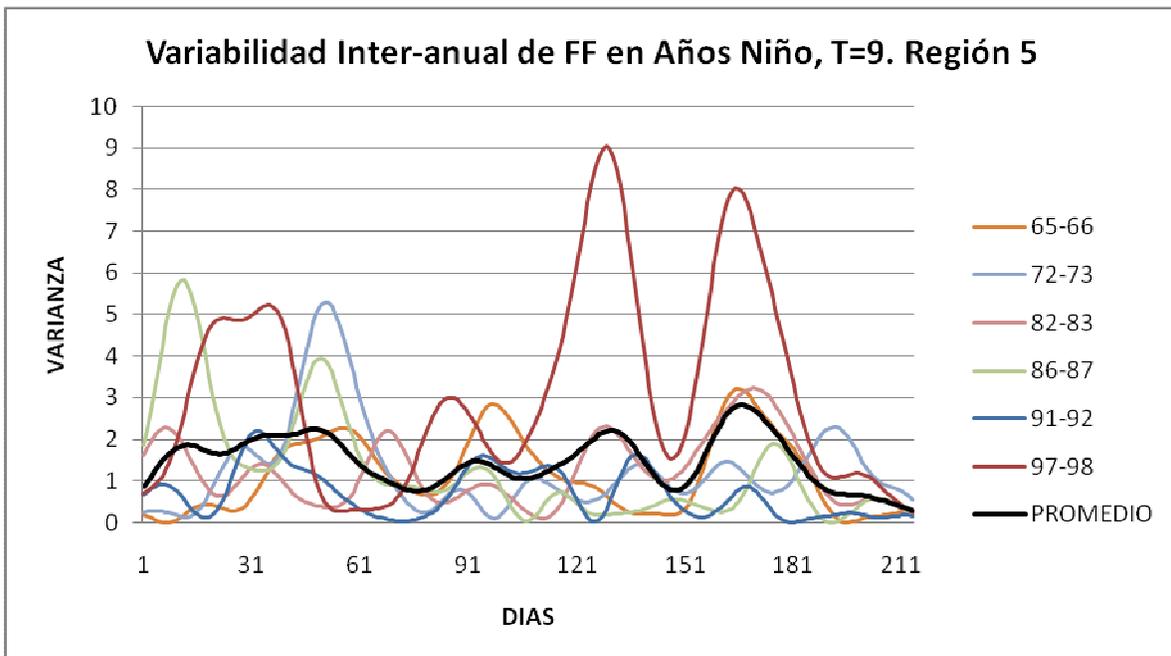


Figura 5.49 Varianza en años Niño para perturbaciones de 9 días de período en la Región 5 (ver mapa **Figura 5.1**).

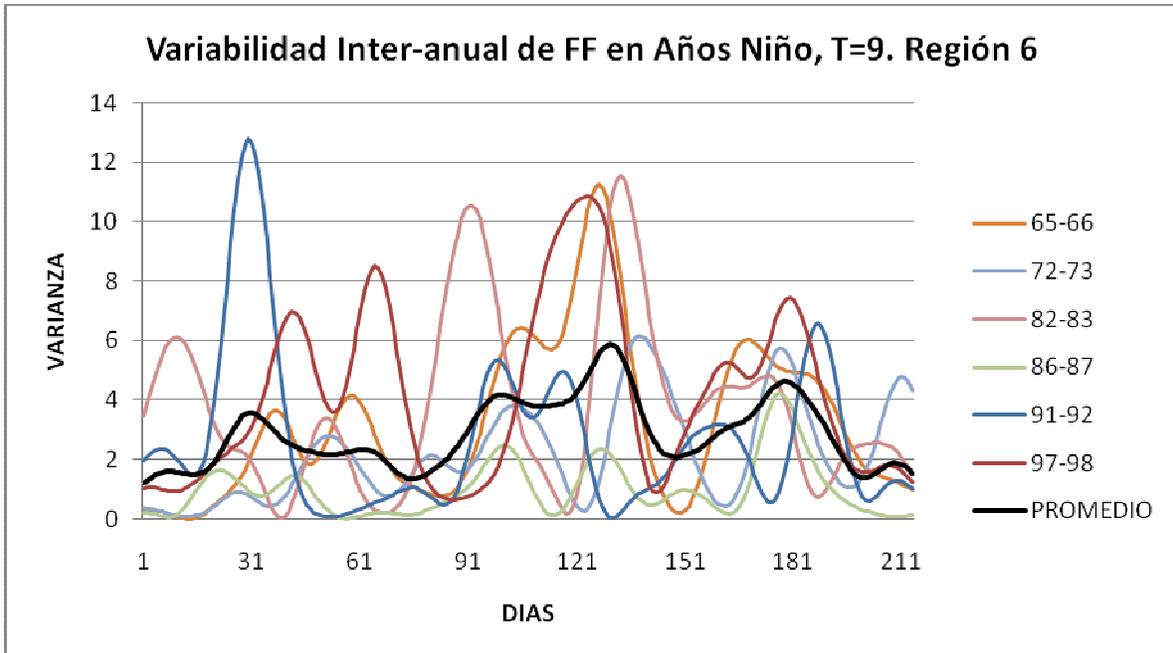


Figura 5.50 Varianza en años Niño para perturbaciones de 9 días de período en la Región 6 (ver mapa **Figura 5.1**).

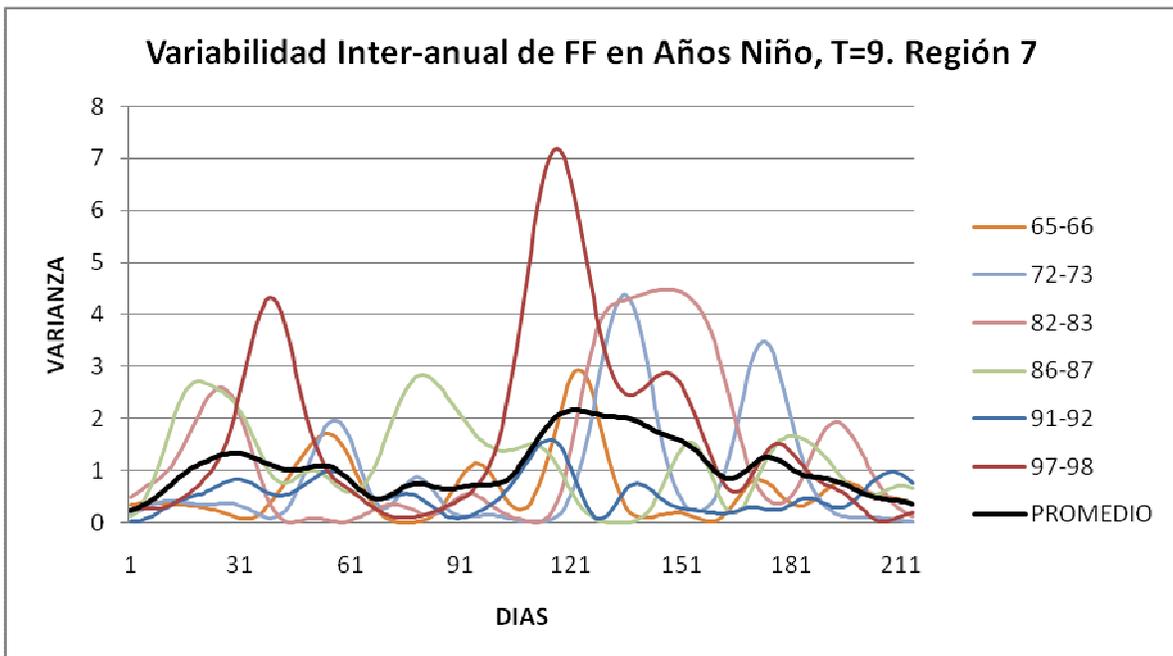


Figura 5.51 Varianza en años Niño para perturbaciones de 9 días de período en la Región 7 (ver mapa **Figura 5.1**).

El promedio de todos los años Niño en la s siete regiones de estudio muestran que la varianza se mantiene entre noviembre y mayo con 4 máximos relativos en las Regiones 3 y 4, las de mayor varianza (Fig. 52), la intensidad total en años Niño es mayor a años Niña y se distribuye a lo largo de la temporada de invierno y primavera.

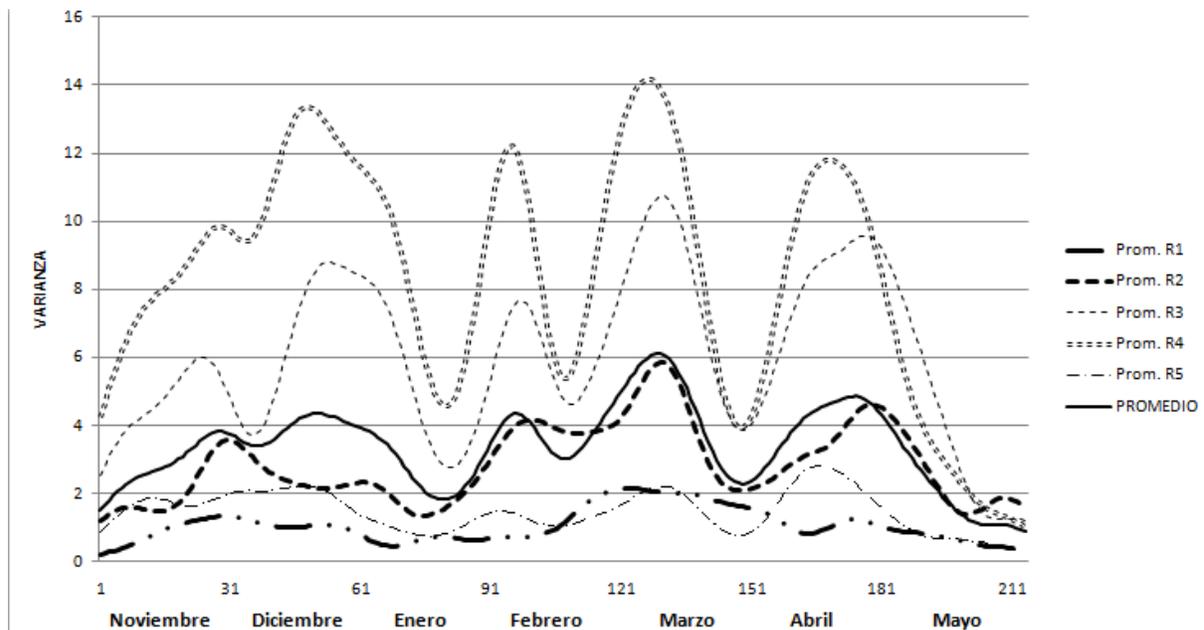


Figura 5.52 Varianza en años Niño para perturbaciones de 9 días de período en todas las Regiones en año Niño(ver mapa **Figura 5.1**).

5.6 Conclusiones.

En la Región 1 no existe una relación clara entre el incremento en la variabilidad del viento con la variabilidad de la temperatura en años tanto Niño como Niña, en cambio para la región 2 cuando el viento varió 4m/s la temperatura varió aproximadamente 7°C entre los meses de febrero a marzo en un periodo espectral de aproximadamente 3 a 9 días. Para la región 3 la cual se localiza al Sureste de los Estados Unidos el viento tuvo un valor de 8m/s para el mes de enero y la temperatura se presentó de aproximadamente 4°C en el periodo espectral de 3 a 6 días.

En la Región 4 el incremento de viento sucede en enero, ello en el periodo espectral de 3 a 6 días, con vientos medios de 12m/s, comparándolo con la temperatura promedio (1 °C), se concluye que en esta región no existe un cambio significativo en la temperatura debido a las propiedades del térmicas del océano (Golfo de México). En la región r ubicada al Sur de México los pulsos en el mes de enero con periodo espectral de 3 a 6 días el viento varió 2m/s y la temperatura aproximadamente 1.1 °C.

El análisis comparativo de años Niño y Niña muestra que se registraron mayor número de FF en años Niño que Niña, ello dada la dinámica que existe entre la corriente en chorro

como fuente energética de FF, no obstante respecto a la variabilidad energética en años Niño es menor y está distribuida homogéneamente entre noviembre y mayo, contrastando con años Niña, que es mayor y se concentra entre noviembre y diciembre de cada año.

5.7 Referencias.

Kalnay, E. *et al.* (1996). "The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77.437-471.

Magaña V. Editor. 1999. Los impactos de El Niño en México. 229 pp. Secretaría de Gobernación, UNAM, IAI.

Magaña V, and A. Quintanar, 1997: On the use of a general circulation model to study regional climate. 2nd. UNAM-CRAY Supercomputing Conference on Earth Sciences. Mexico City. June 1997. Ed. Cambridge University Press. 39-48

Reding, P.J., (1992): "The Central American cold surge: An observational Analysis of the deep south-ward penetration of North American cold front". *M.S. Thesis, Dept. of Meteorology, Texas A&M University*, 177.

Shultz, D.M., W.D. Bracken, L.F. Bosart, (1998). "Planetary-and Synoptic-Scale Signatures Associated with Central American Cold Surges". *American Meteorological Society*, 27.

Schultz, D. M., W.E. Bracken, L.F. Bosart, G. J. Hakim, M.A. Bedrick, M.J. Dickinson, and K. R. Tyle, (1997): "The 1993 superstorm cold surger: Frontal structure, gap flow, and tropical impact". *Mon. Wea. Rev.*, 125, 5-39; Corrigendum, 125, 662.

Trasviña A. y E.D. Barton, (1997). " Los nortes del Golfo de Tehuantepec: la circulación costera inducida por el viento". *Capítulo 2 de la Monografía de la Unión Geofísica Mexicana 3. "La oceanografía física en México"*, 45.

6 MÓDULO DE TENDENCIAS DE CAUDALES Y SU SIGNIFICANCIA ESTADÍSTICA

6.1 Resumen.

En México se cuenta con una red de estaciones de aforo que monitorea gran cantidad de corrientes distribuidas por todo el territorio nacional. La información de los registros de caudales data desde principios del siglo 20 y se encuentra digitalizada en medios electrónicos como el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. Aunque se han realizado estudios parciales que intentan describir la variabilidad estacional e interanual de caudales regionales en México, todavía el conocimiento es escaso y esto se atribuye a la poca disponibilidad de la información hidrométrica histórica de las corrientes, la alta regulación artificial del caudal y la complejidad de los procesos hidrológicos involucrados. Ya en este siglo 21 se ha argumentado que el paradigma que ha gobernado a los cálculos hidrológicos en el pasado, como es la estacionalidad de las series, es decir, la tesis que considera que las variaciones históricas del caudal fluctúan alrededor de un valor normal que no cambia con el tiempo, está condenada al olvido toda vez que el impacto de un cambio climático sobre los caudales regionales indica variaciones muy amplias y significativas. Aún hoy desconocemos la severidad de esos impactos y cuales regiones se beneficiarán y cuales sufrirán las consecuencias. En este trabajo, cuya finalidad principal fue estudiar las tendencias de los caudales en México y su significancia estadística, se muestran los resultados obtenidos para un total de 130 estaciones hidrométricas con más de 30 años de registros diarios, mostramos que los impactos observados en las fluctuaciones del caudal de diversas corrientes en México se traducen en cambios de diferente signo. Aparentemente, la diversidad de resultados encontrados resalta la singularidad de las cuencas de captación asociadas a las estaciones de aforo que hay en el País. Esta singularidad, permite hacer una selección de cuencas hidrológicas piloto donde los aforos resultaron ser homogéneos y que pueden servir de base para estudiar las fluctuaciones del caudal a mediano y largo plazo. Su protección y monitoreo permanente puede también ayudar a entender los procesos hidrológicos involucrados para un manejo de cuenca apropiado. Esta selección puede ser de gran ayuda para entender los impactos del calentamiento global sobre los caudales a nivel regional en México.

6.2 Antecedentes.

Hace más de una década se concluyó que debido al impacto de un cambio climático, los caudales de los ríos a nivel regional variarán de una manera muy amplia y significativa (Dracup and Kendall 1990, Wagonner, 1990). Pero aún hoy desconocemos la severidad de esos impactos (Matalas, 1990) y cuáles regiones se beneficiarán y cuáles sufrirán las consecuencias (Waggoner, 1990).

Con seguridad sabemos que un incremento en la industrialización y la producción de energía ocasionan un incremento en la acumulación de gases de invernadero, como el

dióxido de carbono (CO₂), óxido nítrico (N₂O, NO), metano (CH₄), Ozono (O₃), los clorofluorocarbonos CF-11 y CFC-12, y otros (Braswell et al., 1997), cuyas consecuencias se traducen en cambios a nivel planetario. Este conocimiento otorgó las bases para que se elaborara el protocolo de Kyoto (Bolin, 1998) en donde se declaró que Estados Unidos es responsable por el 38% de las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Con el derrame petrolero en el Golfo de México, debido a una explosión de una plataforma petrolera de la compañía British Petroleum el 20 de abril de 2010, y que es considerado una de las mayores catástrofes ambientales a nivel mundial (Shenkman, 2010), el gobierno de los Estados Unidos está previendo una reforma energética y de cambio climático.

El incremento de aerosoles en la atmósfera fortalece la dispersión y absorción de radiación solar (Ramanathan et al., 2001), y produce nubes más brillantes que son menos eficientes en liberar precipitación lo que conduce a un debilitamiento del ciclo hidrológico, situación que puede compensarse debido a los cambios en los patrones estacionales y el incremento en la probabilidad de eventos extremos (Taikan and Kanae, 2006). Los cambios también afectarán a los flujos de agua subterránea (Alley et al., 2002) de los cuales dependen 1.5 billones de personas alrededor del mundo como su fuente primaria de abastecimiento de agua potable (Solley et al., 1998).

Si el CO₂ se duplica en México y Centro América se esperan incrementos de 3.3 a 4.5°C, incrementos en la evaporación, decrementos de los patrones de lluvia y decrementos entre 10 y 20% de la humedad disponible en el suelo, lo que ocasionará reducciones entre 5 y 25% en la producción de maíz (Liverman and O'Brien, 1991).

6.3 Justificación del estudio de tendencias.

Existen dos enfoques para abordar los efectos de un cambio climático sobre los recursos hídricos: a) mediante el uso de modelos de balance hídrico y b) a partir del estudio de tendencias de largo periodo. Ambos enfoques son complejos y difíciles de llevar a la práctica debido a la insuficiente información disponible. En los modelos de balance hídrico las variaciones del relieve en un sitio introducen resultados difíciles de evaluar y con un alto grado de incertidumbre (Schaake, 1990).

El segundo enfoque implica la búsqueda de evidencias directas en los registros históricos que son considerados una característica integral del sistema hidrológico. Su objetivo es estimar la sensibilidad de los procesos hidrológicos a la variabilidad climática y al cambio. Las dificultades de aplicar este enfoque en la práctica se sustentan en la escasez de registros suficientemente largos, particularmente en las regiones áridas donde la variabilidad de los escurrimientos superficiales es mayor que en las lluvias. Por lo tanto, resulta necesario hacer una selección de series con la mayor cantidad de registros disponibles e intentar estimar los datos faltantes en su interior a fin de mantener la continuidad de las series. Este trabajo resulta arduo si tomamos en cuenta que en los datos digitalizados disponibles (por ejemplo BANDAS, 2000 y ERIC 1996) se pueden encontrar una gran cantidad de errores. En particular, se han encontrado errores o datos faltantes en la información asociada a cada estación de aforo, por ejemplo en su ubicación geográfica. En estudios hidrológicos, el área de la cuenca de captación de la

estación de aforo es un dato importante, pues es empleado para hacer generalizaciones, por ejemplo, al estimar el gasto unitario. Al no aparecer información de la ubicación geográfica de la estación de aforo, no es posible conocer con certeza la configuración geométrica el tamaño ni de su cuenca de captación. Aún más grave es el caso en el que la ubicación de la estación de aforo es incorrecta, por ejemplo, cuando sus coordenadas geográficas la posicionan fuera de la corriente que está aforando o en sitios donde no se ignora la existencia de tributarios. En estos casos, resulta necesario realizar un trabajo previo, detallado, haciendo uso de toda la información disponible, por ejemplo, localizando el nombre de la corriente, los lugares geográficos asociados con el nombre de la estación de aforo y hasta las posibles distancias que la ubican desde algún lugar en particular. Esta información se corrobora en las cartas topográficas a escala 1:250,000 de INEGI. Una vez localizado el sitio aproximado de la estación de aforo, se procede a digitalizar el polígono de su cuenca de captación.

En cuanto a los registros de caudales de las series hidrométricas, el análisis de calidad consiste, en primer lugar, en la selección de las series más largas, enseguida, en verificar si ha habido cambios estadísticamente significativos al interior de las series, provocados por causas antropogénicas o naturales, por ejemplo, mediante el análisis de prueba de hipótesis por los criterios de Student (comparación de medias) y de Fisher (comparación de varianzas). Aunque el interés se centra en las series que resultan ser homogéneas por ambos criterios, el análisis de aquellas series que resultaron no homogéneas por alguno de los criterios mencionados o por ambos resulta también de sumo interés, puesto que para alcanzar el objetivo de analizar las tendencias de largo plazo, es necesario entender las causas de los cambios en la variabilidad al interior de las series que resultaron no homogéneas.

Un último paso, consiste en utilizar el método de analogías, cuyas bases se sustentan en la posible existencia de una corriente aforada con suficientes registros, cuyas condiciones fisiográficas, de humedad, tipo de vegetación y red de drenaje en la cuenca son similares a las encontradas en una corriente donde no existen aforos o sus registros son insuficientes. Si este es el caso, se procede a utilizar la información de la corriente aforada (corriente análoga) para “reconstruir” los aforos de la corriente problema. En hidrología este método permite estimar los datos faltantes de las series seleccionadas haciendo uso de series más cortas pero que cuentan con información disponible en los años correspondientes.

Antes de analizar los caudales máximos, todo este proceso de selección se realiza con los datos de caudales medios, por la razón de que los primeros son mucho más difíciles de estudiar, ya que las leyes que gobiernan su origen y ocurrencia son muy complejos. Resulta más natural, analizar la variabilidad de los gastos máximos de aquellas series que son seleccionadas en todo el proceso de “filtración” del análisis mencionado anteriormente.

Otro problema relacionado con el segundo enfoque surge cuando intentamos detectar una tendencia porque resulta complicado definir qué es una tendencia (Matalas, 1990). Por lo regular se considera que una tendencia es un movimiento persistente suavizado y

extenso en un periodo de tiempo largo. Las series geofísicas largas, por ejemplo, las secuencias de anillos arbóreos exhiben un movimiento oscilatorio muy irregular. Empleando una ventana de tiempo angosta, este movimiento sería visto como de tipo más o menos monótono, en efecto, como una tendencia. De este modo, una tendencia en una corrida corta puede ser parte de una oscilatoria en la corrida larga. Las tendencias en los parámetros pueden introducirse por cambios en factores diferentes al clima. Por ejemplo, las prácticas de uso del suelo cambian con el tiempo y esos cambios pueden y afectan la hidrología de una región (Matalas, 1990). Por lo tanto, si hay tendencias en los parámetros, resulta difícil indicar si las tendencias han sido inducidas por un cambio en el clima o por cambios en los factores antropogénicos o por ambos. Los diferentes comportamientos observados en la variabilidad de las series pueden indicar tanto variabilidad climática como cambio climático (ver por ejemplo Burroughs, 2007). Las dificultades de estudiar el problema se fundamentan en que las tendencias en los parámetros no necesariamente son evidencias de cambio climático. Por lo tanto, una manera de abordar el problema es evaluando la significancia estadística de las tendencias y buscando mecanismos de correlación entre estas y posibles factores causantes. De esta manera es posible inferir parte de la varianza que es debida esos factores. Partiendo de este conocimiento se proponen tres objetivos particulares como contribución a este proyecto:

- (1) Evaluar por décadas los cambios en la variabilidad de caudales medios y máximos (Q_{med} y Q_{max}), lluvias (X) y Temperaturas del aire en superficie (T_a)
- (2) Estimar el valor de la tendencia y su significancia estadística en Q_{med} ; Q_{max} , X , y T_a
- (3) Buscar mecanismos de correlación para explicar si dichos cambios son consecuencia del cambio climático en el mismo sentido en que se ha reportado en otras partes del mundo o son consecuencia de la variabilidad natural del clima.

6.4 Metodología.

Se llevó a cabo una revisión cuidadosa y detallada de los registros hidrométricos y climatológicos contenidos en el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS, 2000) y Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC, 1996).

En el caso de los datos hidrométricos, la revisión consistió en verificar que la ubicación de las estaciones de aforo enlistadas en BANDAS (2000) estuviera libre de errores. La corroboración de la ubicación de las estaciones de aforo consistió en verificar el nombre de la corriente o de la estación de aforo con su correspondiente ubicación en las cartas hidrológicas de aguas superficiales del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) a escala 1:250,000. Es sabido que la información que publicó INEGI fue proporcionada por la Comisión Nacional del Agua, pero la fuente original ya no existe, por lo tanto suponemos que los errores encontrados en BANDAS fueron errores de transcripción. Una vez verificada y en su caso, corregida la ubicación de cada estación se procedió a digitalizar el contorno de la cuenca de captación de cada estación de aforo, tomando en cuenta los datos vectoriales proporcionados por Cottler et al. (2007).

En relación con los registros hidrométricos de caudales, todos los registros diarios de cada serie fueron transferidos a formato ASCII con objeto de hacer más amigable su procesamiento en un ambiente ajeno al BANDAS (2000). Se transfirieron un total de 11,388 archivos de registros diarios de caudal, de los cuales 3,069 corresponden a datos hidrométricos en canales; 5,184 corresponden a datos hidrométricos de corrientes con datos de su ubicación; 2,063 corresponden a datos hidrométricos de corrientes cuyos datos de ubicación no aparece indicada; 561 corresponden a datos hidrométricos de corrientes cuya ubicación es incorrecta y 511 corresponden a datos hidrométricos de presas.

6.4.1 Análisis de homogeneidad al interior de las series.

Los cambios en la media y varianza de cada serie se evaluaron por medio de los criterios de Student (comparación de medias) y de Fisher (comparación de varianzas). En cada caso, la serie original se divide en dos periodos indicándose el año en que se dividió la serie. Por lo regular se procura que el número de años en cada periodo sea el mismo. Si esto no es posible, se admite que el período más reciente tenga un año más que el período más antiguo. Por ejemplo, si la serie tiene registros entre 1940 y 2002 (63 años), esta se divide en dos períodos de 1940-1970 (31 años) y de 1971-2002 (32 años), considerándose a 1970 como el año de división. Una vez establecidos los dos períodos en que se divide la serie se estiman las medias y varianzas de cada período y se comparan según los criterios mencionados. En el proceso se considera que la desviación estándar de la serie es conocida y es la misma en los dos períodos, y se admite un nivel de significancia de 0.05. Por los criterios de Student y de Fisher se estiman los valores empíricos de cada criterio por medio de las fórmulas:

$$t_x = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{n_1\sigma_1^2 + n_2\sigma_2^2}} \sqrt{\frac{n_1n_2(n_1 + n_2 - 2)}{n_1 + n_2}} \quad (1)$$

$$F_x = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \quad (2)$$

donde,

t_x , F_x , son los valores empíricos de los criterios de Student y de Fisher, respectivamente
 \bar{x}_1 , \bar{x}_2 , son las medias del primero y segundo períodos después de dividir la serie en dos partes iguales.

n_1 , n_2 , σ_1 , σ_2 , son las longitudes (en años) y las desviaciones estándar del primero y segundo períodos, respectivamente

En (2), se coloca en el numerador la desviación estándar que es mayor entre las dos.

Los valores empíricos de los criterios de Student y de Fisher se comparan con los valores tabulares correspondientes al 95% de significancia estadística y, con $n-2$ grados de libertad.

6.4.2 Evaluación por décadas los cambios en la variabilidad de caudales medios (Qmed), la lluvia(X) y temperatura del aire en superficie (Ta).

En esta parte del estudio se pretende evaluar la correlación en las fluctuaciones de Qmx y X asociadas a una variabilidad de alta (interanual) y baja (interdecadal) frecuencias. Para lo cual, el primer paso será realizar un análisis de homogeneidad de las series aplicando técnicas estadísticas básicas (ejemplo las pruebas de Student y Fisher) e identificando cambios permanentes o temporales producidos por efectos externos (en el caso de las series de caudal estos efectos pueden deberse a la construcción de presas), con objeto de seleccionar las series que son homogéneas. El siguiente paso, es seleccionar un período común a las series, denominado “período de cálculo”, tal como se describe en Brito-Castillo et al. (1999), y que consiste en seleccionar aquel período durante el cual es posible observar al interior de las series de caudal, al menos, un ciclo completo compuesto por un período de abundancia (es decir valores por encima del normal) y un período de escasez (valores por debajo del normal). La identificación del ciclo completo al interior de las series se realiza mediante la construcción de la curva de valores acumulados de anomalías estandarizadas o curva IDC (Brito-Castillo et al., 1999). Debido a la presencia de huecos al interior de las series de caudal, será necesario, antes, realizar una estimación de los valores faltantes mediante el método de analogías y análisis de regresión simple y múltiple. Una vez establecido el período de cálculo, será necesario aplicar métodos de reducción a fin de agrupar las series en regiones homogéneas. Esta parte del análisis involucra el uso de técnicas de estadística multivariada como la aplicación del método de componentes principales. De esta manera, se trabajará con las series regionales representativas de un modo de variación determinado en lugar de emplear las series individuales. El número de componentes o modos de variación que se retengan dependerá de las condiciones climatológicas e hidrológicas de los sitios, de su posición geográfica, de las características del suelo y vegetación, entre otros. Una vez establecido el número de regiones, se realizará un análisis de correlación, entre las series regionales de caudal (derivadas a partir del análisis de componentes principales) y de lluvia (derivadas a partir del promedio de series de lluvia de aquellas estaciones climatológicas localizadas al interior de cada región hidrológica, ver Brito-Castillo et al., 2003a y 2003b). Este análisis permitirá establecer si las correlaciones son estadísticamente significativas. En esta etapa, será posible también realizar un análisis de la densidad espectral de las series regionales a fin de establecer las periodicidades que son más comunes entre las series.

6.4.3 Estimando el valor de la tendencia y su significancia estadística en X, Ta y Qmed.

Una vez que han sido establecidos los modos de variación, se realiza una inspección visual a las series regionales con el objeto de decidir si el modelo de tendencia lineal es el

apropiado. Hecho esto, para el cálculo de la línea de tendencia que mejor se ajusta a los datos se aplica el análisis de regresión por el método de mínimos cuadrados. La cuantificación de la incertidumbre estadística en la línea de tendencia se realiza a partir del cálculo del error estandar, intervalos de confianza y pruebas de significancia.

En el análisis de tendencias lineales de series de caudales (Q_{med} y Q_{max}), lluvias (X) y temperaturas (T) hay un solo predictor, el tiempo (t ; $t=1,2,3,\dots$) donde, casi siempre, los puntos del tiempo se encuentran igualmente espaciados, día por día, mes por mes, año por año, etc, aunque esto no constituya una restricción necesaria. De este modo, el modelo de regresión es $T=a + bt$, donde “ b ” es la pendiente de la línea de tendencia y su cálculo se realiza como $b=[\sum((t-t_{avg})T_t)]/[\sum((t-t_{avg})^2)]$, donde t_{avg} es el valor medio; la sumatoria es para $t=1,2,3,\dots,n$ (n es el tamaño de la muestra). T_t es el valor de la variable (en este caso de temperatura) en el tiempo “ t ”.

Para evaluar qué tan bien se ajusta la línea de tendencia a los datos (es decir, la bondad de ajuste) se emplea como medida el promedio del cuadrado de los residuales. Entre más pequeño es ese valor, mejor es el ajuste. En este caso en lugar de simplemente dividir la suma de los residuales al cuadrado por “ n ” el tamaño de la muestra, es más correcto dividir a esta suma por “ $n-2$ ” con el objeto de producir un estimador insesgado, esto es, un estimador tal que, si repitiéramos el experimento infinidad de veces, el promedio de ese estimador sería idéntico al parámetro de la población.

Un aspecto que se tomó en cuenta es la existencia de ruido al interior de las series. Diferentes procesos físicos causan patrones de cambio diferentes tanto en el espacio como en el tiempo. Resulta necesario, entonces, identificar aquellos cambios asociados a procesos físicos específicos (factores causantes). A dichos cambios se les conoce como indicadores y en climatología, su identificación es conocida como el problema de “detección y asignación” (Wigley, 2006). Esta consiste en identificar cambios inusuales (detección) mediante pruebas de significancia y su asociación con una o mas causas específicas (asignación). Sin embargo, hay que reconocer que los indicadores climáticos no ocurren aisladamente existen fluctuaciones internas en ausencia o presencia de forzamientos externos. Estas fluctuaciones internas representan el “ruido” contra el cual se intenta identificar a los indicadores de forzamientos externos. Por lo tanto, todos los registros climáticos contienen “ruido” el cual tiende a obscurecer los cambios impulsados externamente. Ejemplos de “ruidos” son la variabilidad asociada al ENSO, las erupciones volcánicas, los terremotos, etc. Por tal motivo, será necesario establecer si el valor de la pendiente es estadísticamente significativo, si es posible determinar patrones de variación regionales relacionados con las tendencias e intentar explicar sus causas.

6.4.4 Buscando mecanismos de correlación para explicar si dichos cambios son o no consecuencia del cambio climático.

El problema de detección y asignación consiste en identificar cambios inusuales y la búsqueda del efecto causante. En este sentido, la búsqueda de mecanismos de correlación entre la variabilidad de Q_{mx} , T_a y X y diferentes agentes forzantes (ENSO, PDO, NATO, SST, series de anomalías de alturas geopotenciales), permitirá establecer

hasta donde es posible explicar estos cambios en base a la fluctuación de dichos agentes forzantes y establecer los mecanismos de correlación implicados.

6.5 Resultados.

En la **Figura 6.1** se muestra la distribución de los polígonos de las cuencas de captación asociadas a las estaciones de aforo, cuyos nombres, posición geográfica, clave, área de captación, nombre de la corriente y cuenca hidrológica se enlistan en la **Tabla 6.1**. La longitud de las series de caudales en cada caso supera los 30 años de registros diarios entre 1920 y 2002; aunque se observan muchos datos faltantes al interior de las series (**Figura 6.2**). El período de 30 años con la mayor cantidad de registros es de 1961 a 1990 (**Figura 3a**); alrededor de 200 series llegan a tener más de 500 meses completos entre 1920 y 2002 (**Figura 6.3b**). La **Tabla 6.2** resume los resultados de las principales características de las series de caudal seleccionadas para el análisis. Las áreas de captación de las cuencas seleccionadas varían desde un par de decenas de km² hasta cientos de miles de km², con una media de 9,300 km² y gastos medios de agua de menos de 1m³×s⁻¹ hasta cerca de 2000m³×s⁻¹, con una media de 64.6m³×s⁻¹. Estos resultados indican la enorme variabilidad espacial y temporal de los registros existentes reportados en BANDAS (2000), con coeficientes de variación que fluctúan entre 0.14 hasta 4.06, con una media de 0.543 (**Tabla 6.2**). Como se mencionó más arriba, son 2,063 series de caudales cuyos metadatos no están incluidos en BANDAS (2000) y, por lo tanto, fueron eliminados del análisis. El detalle de las características generales de las series de caudales por estación hidrométrica se indica en la **Tabla A.1** del **Anexo A**.

En relación con los resultados del análisis de homogeneidad por los criterios de Student y de Fisher (alfa = 0.05), y del análisis de tendencias que resulta después de ajustar una línea de regresión a cada serie por el método de mínimos cuadrados, fueron 41 series cuya pendiente ajustada resultó ser estadísticamente significativa (**Tabla 6.3**). Según los resultados de la **Tabla 6.3**, las series fueron agrupadas en las siguientes categorías (1) series homogéneas por ambos criterios; (2) Series homogéneas solo por el criterio de Student; (3) Series homogéneas solo por el criterio de Fisher y (4) Series no homogéneas por ambos criterios. Nótese que según la **Tabla 6.3**, fueron solo 7 las series cuya pendiente resultó estadísticamente significativa, esto es, que el signo de la pendiente apunta a una sola dirección y este comportamiento no puede explicarse en función de variaciones aleatorias, además de ser homogéneas por ambos criterios. En los demás casos en que la pendiente resultó ser estadísticamente significativa, la hipótesis de homogeneidad fue rechazada en al menos un criterio o por ambos.

Hubo otros casos en que las series resultaron ser homogéneas por ambos criterios, pero con tendencia igual o muy cercana a cero. El detalle de estos resultados para cada una de las series hidrométricas se encuentra en el **Anexo A** y están organizados de la siguiente manera: criterio de homogeneidad de Student (**Tabla A.2**) y Criterio de homogeneidad de Fisher (**Tabla A.3**); Adicionalmente, se realizó un análisis de aleatoriedad de las series con objeto de identificar aquellas series cuyas variaciones son reguladas artificialmente, esto es, cuando el criterio de aleatoriedad empleado se rechaza lo que implica que no hay suficiente evidencia para suponer que los registros de caudal

son totalmente aleatorios. Los resultados del análisis detallado se encuentran organizados de la siguiente manera: criterio de aleatoriedad al interior de las series por incremento y decremento (**Tabla A.4**) y Por el criterio de extremos (**Tabla A.5**); De estos resultados se obtiene que un total de 65 series resultaron ser homogéneas por ambos criterios (**Tablas A.2 y A.3**); 28 series resultaron ser homogéneas solo por el criterio de Student; 13 series resultaron ser homogéneas solo por el criterio de Fisher y 14 series fueron no homogéneas por ambos criterios. Hubo 10 series cuyos resultados fueron eliminados del análisis por incongruencias en la información.

De un modo similar, en forma detallada se muestran los resultados del análisis de tendencias para cada una de las series hidrométricas (**Tabla A.6**).

En la **Figura 6.4**, se muestra la distribución espacial de los polígonos de las cuencas cuyas series de caudal medio anual (esto es, gastos medios anuales) resultaron en alguna de las cuatro categorías de homogeneidad indicados, esto es, homogéneas por ambos criterios; homogéneas solo por el criterio de Student; homogéneas solo por el criterio de Fisher y no homogéneas por ambos criterios. Según la **Figura 6.4**, no resulta obvio identificar algún patrón zonal o meridional que pueda ayudar a identificar las causas de la no homogeneidad de las series debido a su distribución aleatoria.

6.5.1 Tendencias de caudales medios.

En la **Figura 6.5**, se muestra la distribución de los polígonos de cuencas cuyas series de caudal medio anual mostraron tendencia al decremento (o negativa, mapa superior), y tendencia al incremento (o positiva, mapa inferior). Según la **Figura 6.5**, se observa que las cuencas de drenaje de los tributarios del río Lerma y Santiago muestran dominancia por un incremento en los caudales medios anuales mientras que, por el contrario, las cuencas de drenaje localizadas en los extremos noroeste y sureste muestran dominancia por un decremento.

6.5.2 Tendencias de caudales máximos.

En la **Figura 6.6**, se muestra la distribución de los polígonos de cuencas cuyas series de caudal máximo anual mostraron tendencia al decremento (mapa superior), y tendencia al incremento (mapa inferior). Según esta figura, algunas cuencas de captación localizadas en el noroeste de México y en la cuenca del río Lerma muestran decrementos en sus caudales máximos, mientras que solo muy pocas cuencas de captación localizadas en el centro y sureste de México muestran incrementos. Estos resultados difieren de los obtenidos en los caudales medios lo que se explica por las diferencias en los factores climáticos y de la corteza terrestre que los originan. Hay que recordar que la génesis de caudal máximo depende mucho de eventos extremos de lluvia, como la ocurrencia de tormentas tropicales, sistemas convectivos de mesoscala y tormentas intensas muy localizadas, como las que ocurren en latitudes de Nayarit (Brito-Castillo, et al., 2010) y difieren de la génesis del caudal medio anual.

6.5.3 Variabilidad interanual e interdecadal.

En la **Figura 6.7**, se muestran las series de gastos medios anuales que resultaron homogéneas en su interior por los criterios de Fisher y Student, y cuyas variaciones interanuales muestran una tendencia monótona y de largo plazo en ambos sentidos: hacia el decremento (**Figuras 6.7a-e**), y hacia el incremento (**Figura 6.7f,g**).

En la **Figura 6.8**, se muestran las series de gastos medios anuales que resultaron homogéneas en su interior solo por el criterio de Student, mientras que en la **Figura 6.9**, se muestran aquellas series que resultaron homogéneas en su interior solo por el criterio de Fisher. Obsérvese que en todos los casos es notable la ocurrencia de eventos extremos en años particulares que inciden en el signo de la tendencia general y que probablemente tuvieron influencia en la estimación de los estadísticos de las series que afectaron su homogeneidad interior. Tanto en la **Figura 6.8** como en la **Figura 6.9**, se aprecian ejemplos donde la tendencia de caudales es hacia el incremento como hacia el decremento.

Los casos más difíciles de evaluar en términos de cálculos hidrológicos corresponden a las series que resultaron ser no homogéneas por ambos criterios (**Figura 6.10**). Obsérvese que en estos casos tanto las variaciones interanuales como las interdecadales fluctúan en un rango de variación muy amplio (**Tabla 6.2** y **Tabla A.1**) y es posible observar tanto tendencias hacia el decrementos (**Figura 6.10b, d y f**) como hacia el incremento (**Figura 6.10g-l, n**). Los ejemplos más extraños ocurren en los casos en que el régimen de la corriente cambia considerablemente, esto es, la media histórica se reduce al secarse la corriente (**Figura 6.10c**) o bien se incrementa, dando origen a un régimen de mayor escurrimiento superficial (**Figura 6.10o**). En ambos casos, es posible que este cambio de régimen en la corriente haya sido influenciado por cambios en la ubicación de la estación hidrométrica, ya sea aguas arriba o aguas abajo del sitio original; modificaciones en los instrumentos que modifican el error de estimación; o bien son producto de modificaciones al medio por deforestación, sobre-explotación de acuíferos o regulación artificial del caudal.

6.6 Discusión.

6.6.1 Evaluación por décadas.

Diversos estudios realizados en México han mostrado que en las últimas 6 décadas varias regiones del país se están calentando (Englehart y Douglas, 2004 y 2005; Weiss y Overpeck, 2005; Brito-Castillo et al., 2009; Pavía et al., 2009), pero estos calentamientos son en parte asociados a las variaciones interdecadales o de baja frecuencia de las temperaturas del aire en superficie causados por la lenta evolución de los modos climáticos de la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés) y del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés). Englehart y Douglas (2005) argumentan que los calentamientos en las temperaturas máximas y mínimas observadas en México tienen un origen parcial en el cambio de uso de suelo, mientras que Brito-Castillo et al. (2009) muestran que parte de ese calentamiento está relacionado con las variaciones en la configuración del patrón de flujo atmosférico a 700 hPa; y que las variaciones

interdecadales de las temperaturas son consistentes con las fluctuaciones del PDO (Pavía et al., 2009). En particular, el comportamiento de las temperaturas del aire en superficie en las regiones del noroeste y centro de México contrastan con el resto del país (Pavía et al., 2009; Brito-Castillo et al., 2009) observándose incluso una tendencia hacia el enfriamiento en el extremo suroriental del desierto de Sonora (Weiss y Overpeck) y el centro de México (Brito-Castillo et al., 2009). Estudios más detallados indican que el Noroeste de México está gobernado por variaciones estacionales muy fuertes donde es posible encontrar tendencias de diferente signo en lluvias y temperaturas extremas (Gutiérrez-Ruacho et al. (2010) que dificultan la conclusión de un calentamiento generalizado como ocurriría bajo condiciones de calentamiento global. Sin embargo, los modelos de cambio climático de manera recurrente muestran que las condiciones de aridez tanto en el noroeste de México, como en el suroeste de Norte América se van a intensificar (Seager et al., 2007), aunque localmente algunos sitios muestren cambios opuestos, como se espera que ocurra en el extremo sur de la Península de Baja California debidos a la mayor incidencia de ciclones tropicales (Diaz et al., 2008). Un caso muy peculiar ocurre en Sonora, en donde tanto los caudales medios anuales registrados en la estación hidrométrica El Orégano (ver **Figura 6.10i**), como las observaciones de lluvia (Domínguez-Duarte, 2010), muestran tendencias hacia el incremento. Pero este no es el único caso, los ríos Nacimiento (**Figura 6.7f**); Cobianes (**Figura 6.7g**); Hondo (**Figura 6.9g**); Tula (**Figura 6.9i**); Fuerte (**Figura 6.9k**); Apatlaco (**Figura 6.10g**); Duero (**Figura 6.10h**); Coyuquilla (**Figura 6.10j**); Badiraguato (**Figura 6.10k**); El Salado (**Figura 6.10l**); y Cotaxtla (**Figura 6.10n**) también muestran incrementos monótonos en los últimos 40 años, donde la variabilidad interanual aparece sobre puesta. Estos incrementos no encuentran una explicación lógica inmediata. Por el contrario, los ríos Lerma (**Figura 6.7b**); Teapa (**Figura 6.7c**); Sabinos (**Figura 6.7d**); Tlautla (**Figura 6.7e**); Santo Domingo (**Figura 6.9c**); Ahuehuepan (**Figura 6.9d**); Humaya (**Figura 6.10b**) y Huicicila (**Figura 6.10f**) muestran decrementos en el mismo período. Estos comportamientos difieren de lo proyectado para México, donde los modelos climático indican una disminución generalizada de los escurrimientos superficiales para el país (Milly et al., 2005) que es debida, básicamente a la baja resolución de los modelos y a la escasez de información utilizada en los análisis. Los cambios observados en las fluctuaciones de los escurrimientos superficiales en los últimos 40 años son característicos de procesos no estacionarios que se van haciendo cada vez más evidentes en las fluctuaciones del caudal en México y en otras regiones, por lo que resulta necesario desarrollar nuevas técnicas de análisis donde el paradigma de la estacionalidad de las series quede relevado por una propuesta que involucre la no linealidad de los procesos (Milly et al., 2008). Las tendencias observadas en los caudales medios (**Figura 6.5**) y máximos (**Figura 6.6**) de las corrientes en México indican que se han producido cambios al interior de las series, atribuidos principalmente a causas antropogénicas, como la regulación del caudal mediante su almacenamiento y control en las presas, obras hidráulicas y extracción de agua de los acuíferos (Guerrero-Coronado, 2010). Otras causas indirectas son la deforestación, el sobrepastoreo y el cambio de uso del suelo. Pero también existen causas naturales que no son tan obvias y que requieren de un análisis mucho más robusto.

6.6.2 Estimando el valor de la tendencia y su significancia estadística.

De todas las variables meteorológicas e hidrológicas que se monitorean, quizás la más difícil de estudiar sea la lluvia por sus características de intermitencia, distribución que no es normal y su alta variabilidad estacional e interanual, particularmente en las zonas áridas y semiáridas, y las zonas montañosas donde se han observado desfases en el inicio y conclusión de la temporada de lluvias (García-Paez, 2009), y tendencias de diferente signo tanto en lluvias como en temperaturas extremas (Gutiérrez-Ruacho, 2010, Domínguez-Duarte, 2010), que tienen correspondencia con lo observado en los escurrimientos superficiales (**Figuras 6.7-6.10**). De las 130 series analizadas, solo 7 resultaron ser homogéneas por los criterios de Fisher y Student (**Tabla 6.3**), y además con tendencias que son estadísticamente significativas, tanto al decremento (**Figuras 6.7a-e**), como al incremento (**Figuras 6.7f,g**). Los decrementos de los caudales van desde 0.2 a $0.7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \times \text{año}$, mientras que los incrementos fluctúan entre 0.01 y $0.05 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \times \text{año}$ (**Tabla 6.3**). Los detalles del valor de las tendencias en temperaturas y lluvia se pueden consultar en Brito-Castillo et al. (2009); Gutiérrez-Ruacho et al. (2010), Domínguez-Duarte (2010) y Guerrero-Coronado (2010), resultados de este proyecto.

6.6.3 Explicación de los ambios.

Finalmente, unas cuantas palabras en cuanto a las causas de las tendencias observadas en caudales, temperaturas y lluvia. No es obvia la señal de un calentamiento generalizado en estas variables y se ha encontrado que además de las causas no naturales (como el cambio de uso del suelo Englehart y Douglas, 2004 y 2005), hay otras causas que están asociadas con la penetración de masas de aire templadas y cálidas (Brito-Castillo et al., 2009), la configuración del patrón de flujo atmosférico a 500 hPa (Englehart y Douglas, 2004) y 700 hPa (Brito-Castillo et al., 2009) y las oscilaciones decadales del Atlántico y del Pacífico (Englehart y Douglas, 2005; Pavía et al., 2009). Hay ejemplos también en México que muestran ser regularmente anómalos en sus características de variabilidad estacional (i.e. en latitudes de Nayarit, Brito-Castillo et al., 2010), traducida en un desfase tanto temporal como espacial de las lluvias y los escurrimientos superficiales con respecto al patrón regional. Estas anomalías son producto de modos de variación internamente generados dentro del sistema de circulación monzónica de verano y se están haciendo diferentes esfuerzos por intentar explicar sus causas, efectos y teleconexiones (Zaragoza-Cortés, 2010). Por lo tanto, nos es simple la respuesta de una única causa en el signo de las tendencias. Lo que queda claro es que los procesos geofísicos son complejos, pero con la información vertida en el presente reporte es posible ir más allá, por ejemplo, seleccionando cuencas de captación en calidad de “cuencas piloto”, particularmente entre aquellas que resultaron homogéneas por los dos criterios utilizados (**Figura 6.7**). Esta selección podría ayudar a proteger dichas cuencas y mantener un monitoreo permanente, con vías a elucidar los mecanismos de generación de escurrimiento superficial y sus variaciones que no necesariamente son debidas al cambio climático. Esta tarea debería de tomarse en serio en investigaciones futuras.

6.7 Referencias.

Alley W.M., R.W. Healy, J.W. LaBaugh, Th.E. Reilly, 2002. Flow and Storage in Groundwater Systems. *Science*, Vol 296: 1985-1990.

BANDAS, 2000. Banco Nacional de Datos de Aguas superficiales, Comisión Nacional del Agua (CNA) Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos, CD-ROM.

Bolin B., 1998. The Kyoto Negotiations on Climate Change: A Science Perspective. *Science*, 279: 330-331.

Braswell B. H., Schimel D. H., Linder E., Moore III B., 1997. The Response of Global Terrestrial Ecosystems to Interannual Temperature Variability. *Science*, 278: 870-872.

Brito-Castillo, L., Leyva-Contreras A., and Shelutko V. A., 1999. Determination of decadal climatic cycles in runoff fluctuation of a hydrologic unit. *Atmosfera*, 12(1): 27-42.

Brito-Castillo, L., Díaz-Castro S. C., Salinas-Zavala C.A., and Douglas A. V., 2003a. Reconstruction of long-term winter streamflow in the Gulf of California continental watershed. *Journal of Hydrology*,

Brito-Castillo, L., A.V. Douglas, A. Leyva-Contreras, and D.B. Lluch-Belda, 2003b. The Effect of Large-Scale Circulation on Precipitation and Streamflow in the Gulf of California Continental Watershed. *Int. J. Climatol.*, 23: 751-768.

Brito-Castillo L., S.C. Díaz C., R.S. Ulloa-Herrera, 2009. Observed tendencies in maximum and minimum temperatures in Zacatecas, Mexico and possible causes. *International Journal of Climatology*, 29(2): 211-221.

Brito-Castillo L., E.R. Vivoni, D.J. Gochis, A. Filonov, I. Tereschenko, C. Monzon, 2010. An anomaly in the occurrence of the month of maximum precipitation distribution in northwest Mexico. *Journal of Arid Environments*, 74: 531-539.

Burroughs W.J., 2007. Climate Change. A multidisciplinary approach. Cambridge University Press, UK, pp 378.

Cottler H., Garrido A., Mondragón R., Díaz A., 2007. Delimitación de cuencas hidrográficas de México, a escala 1:250,000, INEGI-INE-CONAGUA. Documento técnico. México. 35 pp.

Dracup J. A. and Kendall D. R., 1990. Floods and Droughts. Chapter 11. In: Climate change and U.S. Water Resources. P.E. Waggoner (Ed.). John Wiley & Sons, 496 pp.

Díaz S.C., C.A. Salinas-Zavala, S. Hernández-Vázquez, 2008. Variability of rainfall from tropical cyclones in Northwestern Mexico and its relation to SOI and PDO. *Atmósfera* 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, México, 82p.

ERIC, 1996. Extractor Rápido de Información Climatológica, ERIC. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Morelos, Mexico. CD-ROM.

<http://www.imta.gob.mx/productos/software/meteorologia.html> (2008)

Englehart P.J., A.V. Douglas, 2004. Characterizing regional-scale variation in monthly and seasonal surface air temperatures over Mexico. *International Journal of Climatology* 24(15): 1897-1909.

Englehart P.J., A.V. Douglas, 2005. Changing behavior in the diurnal range of surface air temperature over Mexico. *Geophysical Research Letters* 32: L01701, Doi: 10.1029/2004GL021139.

García-Paez F., 2009. Variabilidad de la precipitación y pronóstico de escurrimientos en la región Pacífico Norte y cuenca del río Yaqui. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias (especialidad en hidrología y conservación de los recursos hídricos). Instituto Tecnológico de Sonora. Dirección de Recursos Naturales. Ciudad Obregón, Sonora, México, 111 p.

Guerrero-Coronado Z., 2010. Análisis de tendencias en los caudales medios anuales de México durante los últimos cuarenta años. Memoria profesional para obtener el título de Licenciado en Biología. Universidad de la Sierra. División de Ciencias Biológicas, Moctezuma, Sonora, México, 46p.

Gutiérrez-Ruacho O.G., L. Brito-Castillo, S.C. Díaz C., Ch.J. Watts, 2010. Trends in rainfall and extreme temperatures in northwestern Mexico. *Climate Research* (doi: 10.3354/cr00874, en prensa)

Liverman D.M., and K. O'Brien, 1991. Global warming and climate change in Mexico. *Global Environmental Change*, December, 351-364.

Matalas N. C., 1990. What Statistics Can Tell Us. Chapter 6. In: *Climate change and U.S. Water Resources*. P.E. Waggoner (Ed.). John Wiley & Sons, 496 pp.

Mitchell D., and Brown T., 2003. Timing, Intensity and Extent of North American/Mexico Monsoon Linked to Sea Surface Temperature in the Gulf of California. In: <http://news.dri.edu/nr1999/monsoon.html> (2003)

Milly P.C.D., Betancourt J., Falkenmark M., Hirsch R.M., y otros, 2008. Stationarity is dead: Whither water management?. *Science*, 319:573-574

Milly P.C.D., Dunne K.A., Vecchia A.V., 2005. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438(17): 347-350. doi:10.1038/nature04312.

Pavia E.G., F. Graef, S. Reyes, 2009. Annual and seasonal surface air temperature trends in Mexico. *International Journal of Climatology*, 29(9): 1324-1329.

Ramanathan V., P.J. Crutzen, J.T. Kiehl, D. Rosenfeld, 2001. Aerosols, Climate, and the Hydrological Cycle. *Science*, Vol 294: 2119-2124.

Seager R., Ting M., Held I., Kushnir Y., y otros, 2007. Model projections of an imminent transition to a more arid climate in Southwestern North America. *Science*, 316: 1181-1184, doi: 10.1126/Science.1139601.

Schaake J. C., 1990. From Climate to flow. Chapter 8. In: Climate change and U.S. Water Resources. P.E. Waggoner (Ed.). John Wiley & Sons, 496 pp.

Shenkman L., 2010. Gulf of Disaster. Louisiana Begins Controversial Engineering to Ward off Oil Spill. *Science*, 328: 1214-1215.

Solley W.B., R.R., Pierce, H.A. Perlman, 1998. U.S. Geological Survey Circular 1200. Taikan Oki, and Shinjiro Kanae, 2006. Global Hydrological Cycles and World Water Resources. *Science*, Vol 313: 1068-1072.

Waggoner P. E., 1990. The Issues. Chapter 1. In: Climate change and U.S. Water Resources. P.E. Waggoner (Ed.). John Wiley & Sons, 496 pp.

Weiss J.L., Overpeck J.T., 2005. Is the sonoran desert losing its cool?. *Global Change Biology* 11: 2065-2077.

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

Zaragoza-Cortés José Ignacio, 2010. Génesis del régimen pluvial en la cuenca hidrológica de la cuenca del río San Pedro-Mezquital. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias en hidrometeorología, con orientación en oceanografía y meteorología física. Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería. Departamento de Física, Guadalajara, Jalisco, México.

Tabla 6.1 Lista de estaciones hidrométricas con registros de caudal de más de 40 años en México.

No	Longitud	Latitud	Clave	Área, km ²	Nombre-Corriente	Cuenca
1	-109.08389	29.41922	9003	21864	Paso Nacori-Río Yaqui	Río Yaqui
2	-109.23521	29.22534	9004	46990	El Cubil-Río Papigochic	Río Aros
3	-107.98333	28.75833	9011	8713	La Junta-Río Papigochic	Río Yaqui
4	-110.70408	29.23326	9017	11699	El Orégano-Río Sonora	Río Sonora
5	-108.88950	27.41219	9067	7510	San Bernardo-Río Mayo	Río Mayo
6	-108.30130	29.13944	9080	10598	Guapoca-Río Papigochic	Río Aros
7	-107.40417	24.80556	10018	15731	Puente Sudpacífico-Río Culiacán	Río Culiacán
8	-107.14583	24.80417	10027	371	El Bledal-Arroyo El Bledal	Río Culiacán
9	-107.38472	24.92500	10033	11409	Palos Blancos-Río Humaya	Río Culiacán
10	-108.00000	25.90000	10036	8179	Jaina-Río Sinaloa	Río Sinaloa
11	-108.36667	26.88333	10037	26057	Huites-Río Fuerte	Río Fuerte
12	-106.95278	24.48472	10040	8919	Santa Cruz-Río San Lorenzo	Río San Lorenzo
13	-108.54167	27.41667	10064	5098	Chinipas-Río Oteros	Río Fuerte
14	-106.59583	23.95556	10065	6120	Ixpalino-Río Piaxtla	Río Piaxtla
15	-106.65417	24.04722	10070	1884	Acatitán-Río Elota	Río Elota
16	-107.53742	25.33326	10079	981	Badiraguato-Río Badiraguato	Río Culiacán
17	-104.59889	24.00000	11008	2008	San Felipe-Río El Tunal	Río Mezquital
18	-105.15000	21.96667	11012	25800	San Pedro-Río San Pedro	Río San Pedro
19	-105.34167	22.48333	11014	5092	Acaponeta-Río Acaponeta	Río Acaponeta
20	-105.84167	22.98333	11016	4653	Baluartes II-Río Baluarte	Río Baluarte
21	-106.24398	23.34953	11058	5614	Siqueros-Río Presidio	Río Presidio
22	-100.73333	20.05000	12104	8665	Acámbaro-Río Lerma	Río Lerma
23	-103.08333	20.40417	12128	47386	Corona-Río Santiago	Río Santiago
24	-100.23750	19.99444	12209	5645	El Tambor-Río Lerma	Río Lerma
25	-101.17639	19.72500	12221	912	Atapaneto-Río Grande de Morelia	Lago Cuitzeo
26	-101.80417	20.19583	12233	1264	Corrales-Río Lerma	Río Lerma
27	-102.37083	20.11667	12310	2198	La Estanzuela-Río Duero	Río Lerma
28	-101.28806	19.60139	12347	388	Santiago Undameo-Río Grande de Morelia	Lago de Cuitzeo
29	-101.20000	20.56667	12352	22033	Salamanca II-Río Lerma	Río Lerma
30	-99.58944	19.40611	12374	1582	La Y-Río Lerma	Río Lerma
31	-100.15000	20.05833	12375	5275	Temascales-Río Lerma	Río Lerma
32	-102.30417	19.98333	12379	126	Jacona-Río Celio	Río Lerma
33	-102.21250	19.91667	12396	1221	Camécuaro-Río Duero	Río Lerma

No	Longitud	Latitud	Clave	Área, km ²	Nombre-Corriente	Cuenca
34	-103.78333	21.82500	12428	11900	Bolaños-Río Bolaños	Río Santiago
35	-104.09028	21.19306	12438	84559	La Yesca-Río Santiago	Río Santiago
36	-103.39700	21.05833	12441	8455	La Boquilla-Río Juchipila	Río Santiago
37	-101.91389	21.36250	12454	2397	Lagos-Río de Lagos	Río Santiago
38	-103.44167	21.05139	12469	854	Cuixtla-Río Cuixtla	Río Santiago
39	-104.06306	22.56806	12484	5796	El Platanito-Río San Juan Capistrano	Río Santiago
40	-105.11806	21.82500	12496	123630	Capomal-Río Santiago	Río Santiago
41	-102.83306	21.00000	12504	19097	La Cuña-Río Verde	Río Santiago
42	-104.08056	21.20139	12514	14755	El Caiman-Río Bolaños	Río Santiago
43	-103.34861	21.66111	12663	749	Excame II y III-río Tlaltenango	Río Santiago
44	-105.07500	21.28333	13001	522	Paso de Arocha-Río Huicicila	Río Huicicila
45	-105.15833	20.73333	14008	1407	La Desembocadura-Río Mascota	Río Ameca
46	-103.41667	19.52500	16014	2442	Quito II-Río Tuxpan	Río Coahuayana
47	-103.80000	19.89167	16020	187	El Nogal-Río Tapalpa	Río Armería
48	-103.35000	19.83333	16021	6835	San Gregorio-Río Cobianes	Río Coahuayana
49	-100.18750	19.24167	18001	7523	San José Malatepec-Río San José Malatepec	Río Balsas
50	-102.87917	19.93000	18129	546	Los Granjeros-Río Quitupan	Río Balsas
51	-99.37083	18.60000	18232	2371	Amacuzac-Río Amacuzac	Río Balsas
52	-99.64583	18.33750	18236	417	Ahuehuepan-Río Ahuehuepan	Río Balsas
53	-99.66667	18.30000	18245	610	Los Sabinos-Río Sabinos	Río Balsas
54	-99.22083	18.85417	18271	331	Temixco-Río Apatlaco	Río Balsas
55	-100.46389	19.57778	18459	944	Río Grande-Río Grande	Río Balsas
56	-101.05833	17.37500	19003	564	Coyuquilla II-Río Coyuquilla	Río Coyuquilla
57	-95.92917	16.64722	22008	4487	Boquilla No. 1-Río Tehuantepec	Río Tehuantepec
58	-95.09167	16.55417	22017	1014	Ixtepec-Río de los Perros	De los Perros
59	-100.13333	27.23333	24038	47450	Rodríguez-Río Salado	Río Bravo
60	-100.17361	25.95417	24087	18740	Ciénega de Flores-Río Salinas	Río Bravo
61	-99.25833	25.71944	24088	8520	El Cuchillo-Río San Juan	Río Bravo
62	-105.77778	27.98611	24181	9405	Villalba-Río San Pedro	Río Conchos
63	-99.83333	25.17917	24192	1691	Montemorelos-Río Pilón	Río Bravo
64	-105.35000	26.43333	24195	2734	San Antonio-Río Florido	Río Conchos.
65	-100.36667	25.67083	24198	1333	Monterrey-Río Santa Catarina	Río Bravo
66	-105.42222	28.54583	24226	51297	Las Burras-Río Conchos	Río Conchos

Tabla 6.1 Continuación

No	Longitud	Latitud	Clave	Área, km ²	Nombre-Corriente	Cuenca
67	-98.15833	24.84389	25009	14798	San Fernando-Río San Fernando	Río San Fernando
68	-99.57500	24.87778	25027	428	Camacho-Río Camacho	Río San Fernando
69	-99.74167	24.99028	25030	1166	Cabezones-Río Potosí	Río San Fernando
70	-99.12222	22.95733	26023	25	Ahualulco-Río Nacimiento	Río Pánuco
71	-99.21994	19.47829	26032	231	Molino Blanco-Río de los Remedios	Emisor Ponte.
72	-99.32686	19.99275	26034	523	Tlautla-Río Tlautla	Río Pánuco
73	-98.91432	20.72367	26040	2876	Almolón-Río Almolón	Río Moctezuma
74	-98.67312	20.46863	26042	1951	Venados-Río Meztitlán	Río Moctezuma
75	-99.23556	19.45361	26053	143	El Molinito-Río Hondo	Río de los Remedios
76	-99.33889	19.90000	26070	693	Tepeji-Río Tepeji	Río Pánuco
77	-99.17222	19.95000	26118	320	La Mora-Río Salado	Río Pánuco
78	-99.37997	19.83822	26133	358	Calabozo-Río San Luis	Río Pánuco
79	-98.79110	23.05841	26149	4937	San Gabriel II-Río Guayalejo	Río Pánuco
80	-99.33458	19.89723	26191	3686	Boquilla Tecolote-Río Tula	Río Pánuco
81	-99.07774	23.38365	26218	3725	La Encantada-Río Guayalejo	Río Pánuco
82	-98.95636	21.74796	26241	194	Ballesmi-Río Coy	Río Pánuco
83	-98.87867	21.41911	26243	661	Requetemu-Río Axtla	Río Pánuco
84	-98.40765	21.52130	26248	5275	Tempoal-Río Tempoal	Río Pánuco
85	-98.71438	22.79728	26249	10968	Magiscatzin II-Río Guayalejo	Río Pánuco
86	-98.56022	21.96566	26255	61063	Las Adjuntas-Río Pánuco	Río Pánuco
87	-99.05373	22.01715	26263	3535	Santa Rosa-Río Valles	Río Pánuco
88	-99.25034	21.90347	26267	789	Gallinas-Río Gallinas	Río Pánuco
89	-99.21797	21.66167	26268	17532	Tansabaca-Río Tampaón	Río Pánuco
90	-98.88472	21.21806	26270	18169	Tierra Blanca-Río Moctezuma	Río Pánuco
91	-98.93768	21.84525	26272	23373	El Pujal-Río Tampaón	Río Pánuco
92	-98.26681	21.16667	26277	1269	Los Hules-Río Los Hules	Río Pánuco
93	-98.62500	20.51250	26282	231	El Álamo-Río Santa María	Río Moctezuma
94	-99.16667	22.11681	26285	1978	Micos-Río El Salto	Río Pánuco
95	-98.46806	21.38472	26286	609	El Cardón-Río Calabozo	Río Pánuco
96	-98.13347	21.03347	26289	1493	Terrerillos-Río Calabozo	Río Pánuco
97	-98.75014	21.23347	26293	6884	Tematla-Río Amajac	Río Amajac
98	-99.01806	22.83472	26296	2785	Río Frío-Río Frío	Río Pánuco
99	-99.08472	23.03472	26388	497	Sabinos-Río Sabinas	Río Pánuco

Tabla 6.1 Continuación

No	Longitud	Latitud	Clave	Área, km ²	Nombre-Corriente	Cuenca
100	-99.85000	21.78472	26389	3571	Viga-Río Verde	Río Pánuco
101	-97.05127	20.06168	27001	1467	Martínez de la Torre-Río Bobos	Río Nautla
102	-97.47447	20.54242	27002	1600	Poza Rica-Río Cazones	Río Cazones
103	-96.96167	20.05167	27005	173	Libertad-Río Quilate	Río Nautla
104	-96.37304	19.36242	28003	2234	Cardel-Río La Antigua	Río La Antigua
105	-95.70251	18.07106	28013	4655	Azueta-Río Tesechoacan	Río Papaloapan
106	-95.26667	18.01167	28016	14037	Cantón-Río Santo Domingo	Río Papaloapan
107	-96.57880	19.49365	28030	844	Actopan II-Río Actopan	Río Actopan
108	-96.16019	19.06734	28040	1924	El Tejar-Río Jamapa	Río Jamapa
109	-96.30574	18.87245	28069	1411	Capulines-Río Cotaxtla	Río Jamapa
110	-96.38167	19.42222	28108	1933	El Naranjillo-Río Actopan	Río Actopan
111	-96.55333	19.40333	28111	455	Ídolos-Río Ídolos	Río Actopan
112	-94.86667	17.43806	29005	9224	Las Perlas-Río Coatzacoalcos	Río coatzacoalcos
113	-93.28344	17.97250	30005	48558	Samaria-Río Samaria	Río Mezcalapa
114	-93.44355	17.41993	30015	36362	Las Peñitas-Río Mezcalapa	Río Grijalva
115	-92.87368	17.85307	30016	4779	Pueblo Nuevo-Río de la Sierra	Río Grijalva
116	-91.48326	17.43326	30019	47697	Boca del Cerro-Río Usumacinta	Río Usumacinta
117	-92.99684	16.63189	30020	1870	El Boquerón II-Río Suchiapa	Río Grijalva
118	-92.93750	17.56667	30031	169	Puyacatengo-Río Puyacatengo	Río Mezcalapa
119	-92.95381	17.57039	30032	476	Teapa-Río Teapa	Río Grijalva
120	-92.96921	16.51955	30041	1808	La Escalera-Río Santo Domingo	Río Grijalva
121	-92.35000	17.56667	30042	2876	Salto de Agua-Río Tulija	Río Grijalva
122	-93.00000	17.97500	30062	53792	González-Río Carrizal	Río Grijalva
123	-91.15833	17.79167	30088	10138	San Pedro Tabasco-Río San Pedro	Río Grijalva
124	-92.02000	16.68333	30138	257	Yalchipic-Río Yalchipic	Río Usumacinta
125	-107.07623	29.73336	34008	4154	La Trasquila-Río del Carmen	Laguna San Jose
126	-103.32500	25.09167	36039	19365	La Flor-Río Aguanaval	Río Aguanaval
127	-105.02436	25.59942	36044	18321	El Palmito II-Río Nazas	Laguna de Mayrán
128	-103.22500	23.16667	36049	1242	El Sauz II-Río de los Lazos	Río Aguanaval
129	-103.09892	23.70208	36056	4876	Cazadero II-Río Aguanaval	Río Aguanaval
130	-99.71250	23.00139	37012	80	Tula-Río Tula	Cuenca endorreica

Tabla 6.2 Resumen de las características generales de las series de caudales (gastos medios anuales), según el método de los Momentos.

Resumen	Área, km ²	Parámetros			Error de estimación		
		Media	Cv	Cs	Media	Cv	Cs
Max	124,000	1,880	4.06	7.18	114	0.740	1.16
Min	25.0	0.540	0.140	-0.530	0.041	0.020	0.220
Med	9,300	64.6	0.524	1.12	5.16	0.073	0.426

Tabla 6.3 Resumen del análisis de homogeneidad por los criterios de Student y de Fisher (alfa = 0.05), y del análisis de tendencias después de ajustar una línea de regresión a la serie por el método de mínimos cuadrados. Aquí se muestran solo 41 series cuya pendiente ajustada es estadísticamente significativa ($P \leq 95\%$). La clave de cada estación es la misma de la **Tabla 6.1** y **Figura 6.1**.

Clave	Periodo	n	Yr	Criterio de Student, P=95%					Criterio de Fisher, P=95%					Pendiente ajustada		
				Xavg1	Xavg2	tx	ta	Decisión	STD1	STD2	Fx	Fa	Decisión	a	std a	p-level a
12128	1940-1995	56	1968	24.3	19.6	0.69	2.01	NSR	23.9	27.4	1.31	1.92	NSR	-0.70	0.19	0.00
12233	1940-1991	52	1966	35.5	33.4	0.26	2.01	NSR	27.6	30	1.18	1.96	NSR	-0.46	0.20	0.02
30032	1951-1995	45	1973	43.4	39.4	1.57	2.02	NSR	7.96	9.07	1.3	2.08	NSR	-0.31	0.08	0.00
18245	1959-2001	43	1980	6.07	5.32	1.51	2.02	NSR	1.55	1.71	1.22	2.12	NSR	-0.04	0.02	0.03
26034	1940-1995	56	1968	1.5	1.26	0.79	2.01	NSR	1.19	1.09	1.18	1.92	NSR	-0.02	0.01	0.01
16021	1945-1998	54	1972	1.69	1.83	0.76	2.01	NSR	0.66	0.7	1.15	1.94	NSR	0.01	0.01	0.02
26023	1946-2001	56	1974	12.3	13.1	0.94	2.01	NSR	3.2	3.33	1.08	1.92	NSR	0.05	0.03	0.04
9011	1940-1994	55	1967	15.9	13.9	1.06	2.01	NSR	8.65	5.16	2.81	1.94	SR	-0.11	0.05	0.04
26040	1940-1983	44	1962	6.29	4.85	1.23	2.02	NSR	4.66	2.96	2.48	2.1	SR	-0.07	0.04	0.05
10027	1940-1989	50	1965	1.19	1.64	1.6	2.01	NSR	0.73	1.21	2.75	1.98	SR	0.02	0.01	0.05
24181	1940-1986	47	1963	8.77	12.5	1.77	2.01	NSR	5.63	8.4	2.22	2.04	SR	0.15	0.07	0.04
9080	1958-1991	34	1975	19.5	25.9	1.78	2.04	NSR	5.38	13.8	6.53	2.36	SR	0.34	0.16	0.04
10064	1953-1997	45	1975	45.2	59	1.88	2.02	NSR	18.3	29.5	2.61	2.08	SR	0.93	0.24	0.00
25009	1940-1975	36	1958	21.4	13	6.35	2.03	SR	11.8	12	1.05	2.3	NSR	-0.37	0.15	0.02
12352	1940-1995	56	1968	22.9	14.2	2.05	2.01	SR	17.4	14	1.53	1.92	NSR	-0.32	0.13	0.02
30041	1954-1997	44	1976	19	14.4	2.19	2.02	SR	7.71	5.92	1.69	2.1	NSR	-0.25	0.07	0.00
18236	1954-2000	47	1977	5.22	3.67	2.77	2.01	SR	2.21	1.6	1.92	2.04	NSR	-0.07	0.02	0.00
12663	1950-1998	49	1974	3.66	1.81	12	2.01	SR	2.05	1.7	1.45	2.01	NSR	-0.04	0.02	0.02
12347	1940-1985	46	1963	2.03	2.56	2.62	2.02	SR	0.76	0.59	1.65	2.06	NSR	0.02	0.01	0.03
26053	1953-1993	41	1973	0.8	1.5	6.03	2.02	SR	0.31	0.42	1.82	2.16	NSR	0.03	0.00	0.00
26032	1943-1981	39	1962	2.47	4.85	18	2.03	SR	1.02	1.52	2.21	2.21	NSR	0.08	0.01	0.00
26191	1945-1993	49	1969	10.8	21.5	4.44	2.01	SR	8.04	8.88	1.22	2	NSR	0.39	0.08	0.00

11012	1944-1986	43	1965	77.7	104	2.77	2.02	SR	28.8	32.7	1.29	2.12	NSR	0.66	0.32	0.04
10037	1942-1992	51	1967	115	156	2.97	2.01	SR	51.8	48.7	1.13	1.98	NSR	1.53	0.47	0.00
30019	1949-1994	46	1972	1772	1987	2.13	2.02	SR	370	312	1.41	2.06	NSR	9.60	3.26	0.00
12496	1956-2001	46	1979	279	162	4.51	2.02	SR	106	66.4	2.52	2.06	SR	-3.21	1.07	0.00
10033	1940-1987	48	1964	54.5	28	4.31	2.01	SR	25.1	16.4	2.34	2.02	SR	-1.03	0.20	0.00
12375	1943-1986	44	1965	16	0.48	6.65	2.02	SR	10.9	0.18	3743	2.1	SR	-0.46	0.08	0.00
18001	1941-1977	37	1959	4.91	2.66	17.3	2.03	SR	1.66	0.28	34.6	2.29	SR	-0.11	0.01	0.00
26389	1958-1999	42	1979	7.71	4.5	3.13	2.02	SR	4.15	2.21	3.54	2.15	SR	-0.11	0.04	0.02
13001	1950-1997	48	1974	6	3.68	4.12	2.01	SR	2.42	1.34	3.27	2.02	SR	-0.09	0.02	0.00
18271	1957-2001	45	1979	2.09	2.67	3.67	2.02	SR	0.43	0.62	2.09	2.08	SR	0.03	0.01	0.00
12396	1944-1987	44	1966	6.93	8.5	4.38	2.02	SR	1.51	0.73	4.3	2.1	SR	0.05	0.01	0.00
9017	1942-1992	51	1967	3.17	3.77	3.15	2.01	SR	1.8	2.94	2.68	1.96	SR	0.08	0.03	0.02
19003	1956-1998	43	1977	10.6	14.1	2.62	2.02	SR	3.3	5.05	2.35	2.12	SR	0.12	0.05	0.02
10079	1960-1999	40	1980	6.02	9.92	8.68	2.02	SR	3.29	5.45	2.74	2.19	SR	0.15	0.07	0.03
26118	1940-1985	46	1963	12.5	20.2	8.56	2.02	SR	3.83	1.89	4.12	2.06	SR	0.31	0.02	0.00
28069	1955-1997	43	1976	36.6	55.7	8.68	2.02	SR	6.43	33.3	26.8	2.12	SR	0.58	0.27	0.04
30016	1948-2000	53	1974	184	213	3.05	2.01	SR	27.8	41.4	2.22	1.94	SR	0.92	0.30	0.00
10065	1953-1997	45	1975	45.2	59	6.38	2.02	SR	18.3	29.5	2.61	2.08	SR	0.93	0.24	0.00
10018	1940-1989	50	1965	160	371	6.49	2.01	SR	146	71.2	4.19	1.98	SR	5.90	0.57	0.00

Nota: n= longitud de la serie en años; Yr= año en que se dividió la serie en dos periodos; Xavg1 y Xavg2 =medias del primero y segundo período respectivamente; tx y ta=valor empírico y tabular del estadístico de Student, respectivamente; STD1 y STD2=desviación estándar del primero y segundo período respectivamente; Fx y Fa=valor empírico y tabular del estadístico de Fisher, respectivamente; a= pendiente, el signo indica incremento del caudal si es positivo o decremento si es negativo; std = error estándar; p-level= nivel de significancia estadística; NSR= No se rechaza la hipótesis de homogeneidad; SR= Se rechaza la hipótesis de homogeneidad.

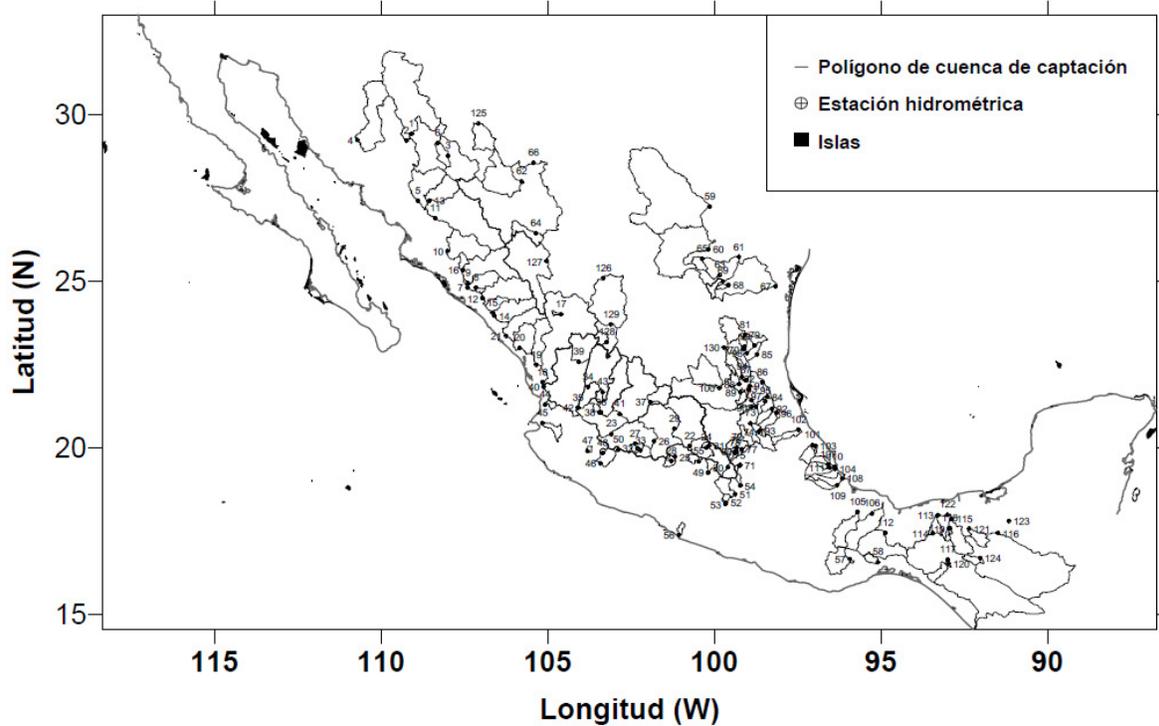


Figura 6.1 Localización de polígonos de las cuencas de drenaje asociadas a las estaciones hidrométricas que fueron seleccionadas para el análisis de tendencias y significancia estadística. Los números corresponden a cada estación hidrométrica posicionada a la salida de la cuenca y cuyas referencias se muestran en la **Tabla 6.1**.

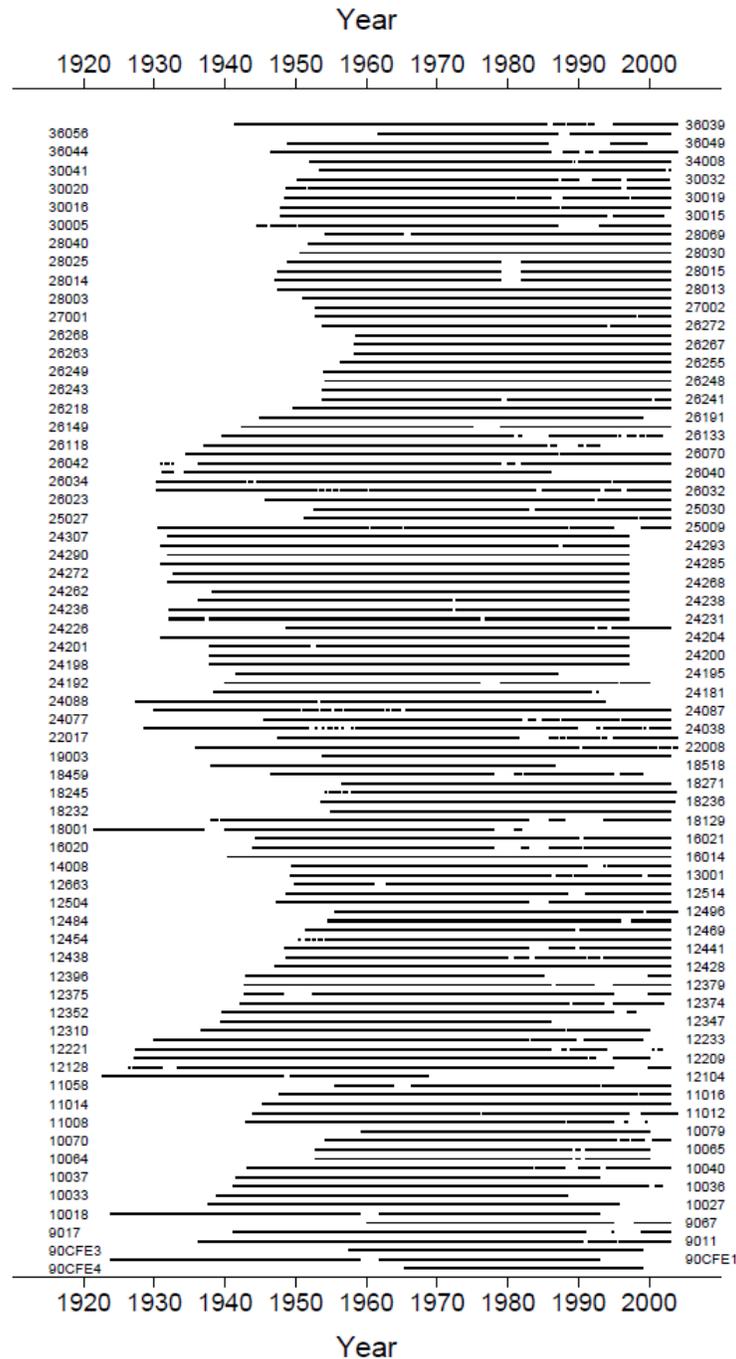


Figura 6.2 Representación gráfica de gastos medios mensuales registrados en las estaciones hidrométricas entre 1920 y 2004. Cada dato aparece representado por un punto. Los espacios en blanco indican datos faltantes al interior de la serie. Los números indican la clave de cada estación (ver **Tabla 6.1** y **Figura 6.1**).

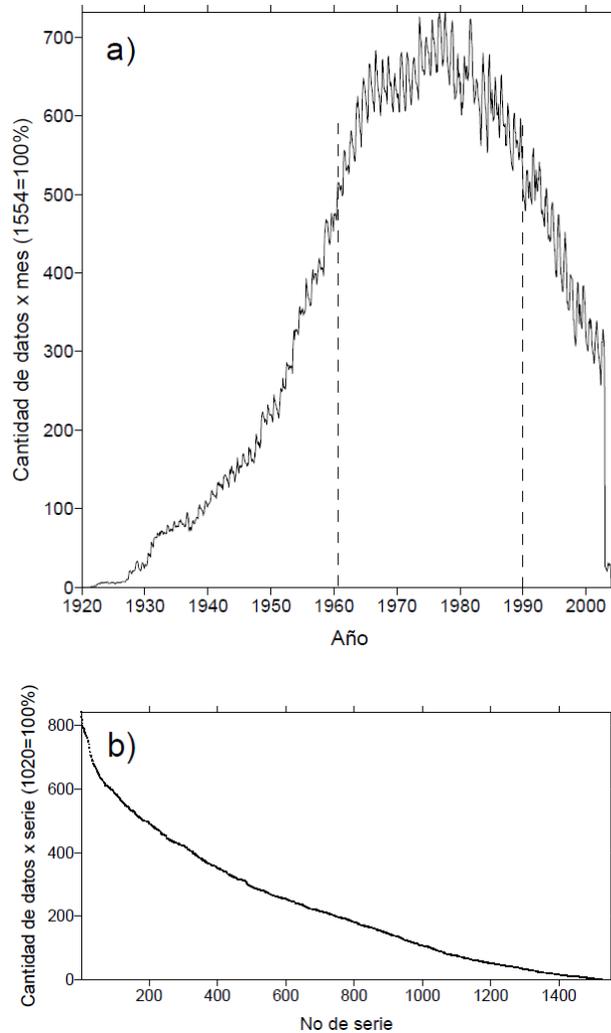


Figura 6.3 Cantidad de registros por mes (a) y por cada serie (b) de gastos medios mensuales. En el gráfico superior, cada vez que una serie muestra un registro en un mes en particular este se acumula con el total de registros para dicho mes. El total de series es de 1554. En el gráfico inferior, los datos se muestran en orden decreciente correspondiendo al primer dato a la serie con la mayor cantidad entre 1920 y 2004 (1020 meses).

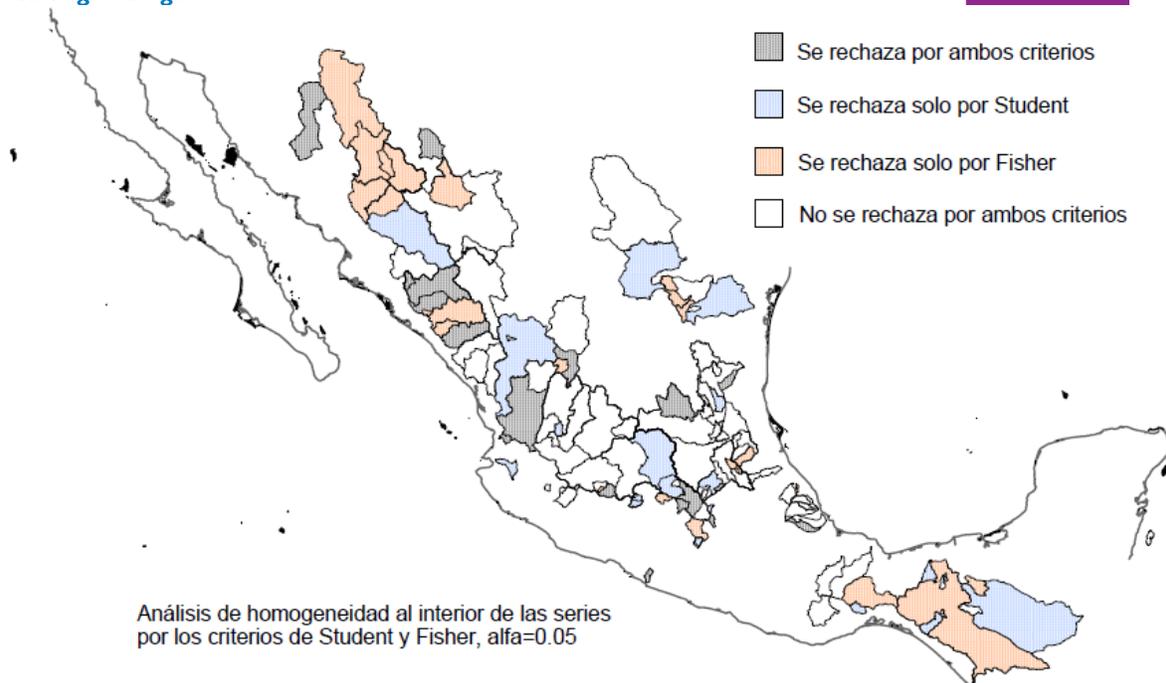


Figura 6.4 Resultados del análisis de homogeneidad al interior de las series, considerando un nivel de significancia de 0.05, por los criterios de Student y Fisher. Los diferentes colores muestran los casos en que la hipótesis de homogeneidad se rechaza por ambos criterios (negro), se rechaza por alguno de los dos (azul y naranja) y cuando no se rechaza por ambos criterios (blanco).

Gastos medios anuales

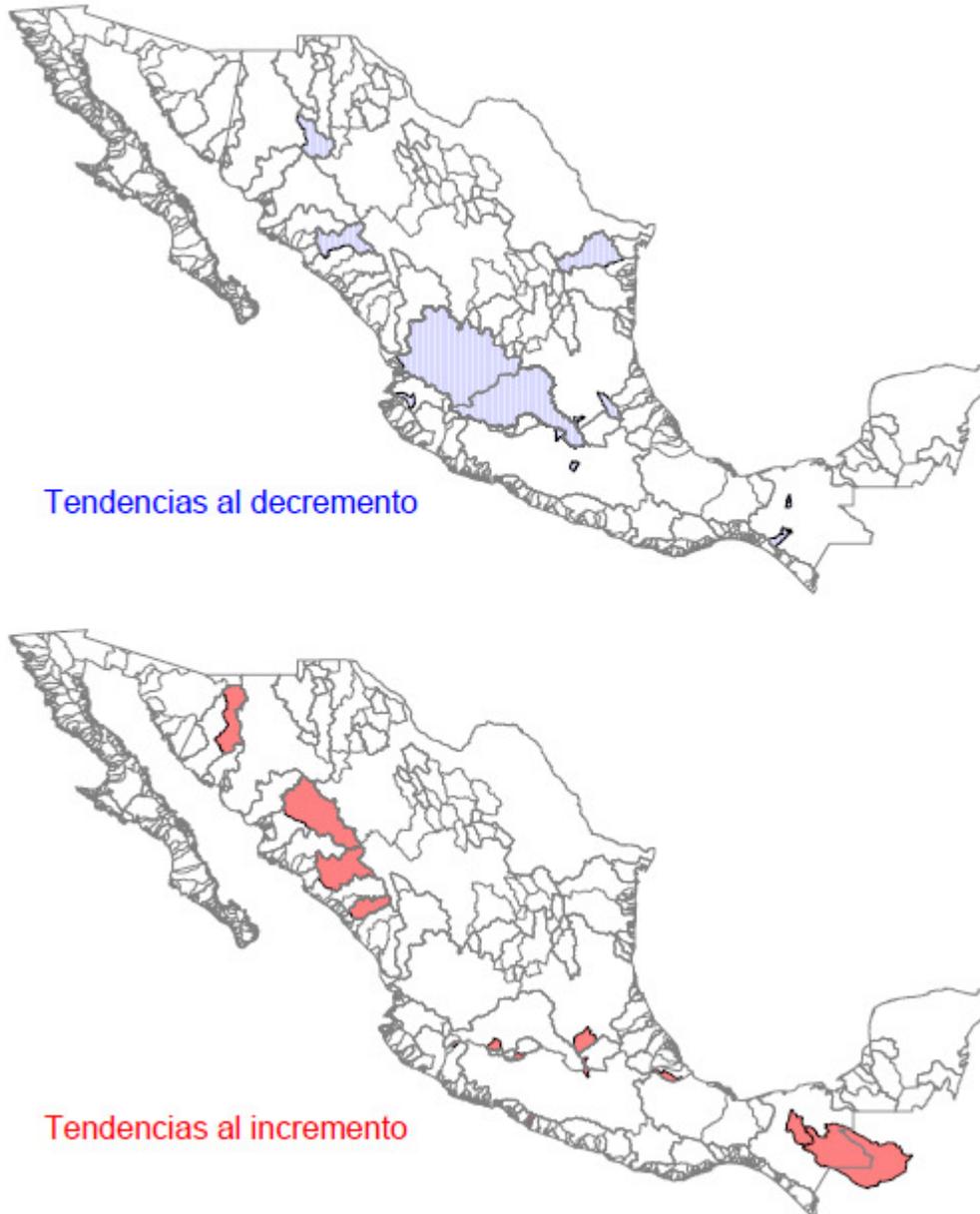


Figura 6.5 Distribución de polígonos de cuencas de captación cuyos datos de caudal medio anual resultaron con tendencias hacia el decremento (mapa superior) y hacia el incremento (mapa inferior).

Gasto máximo anual

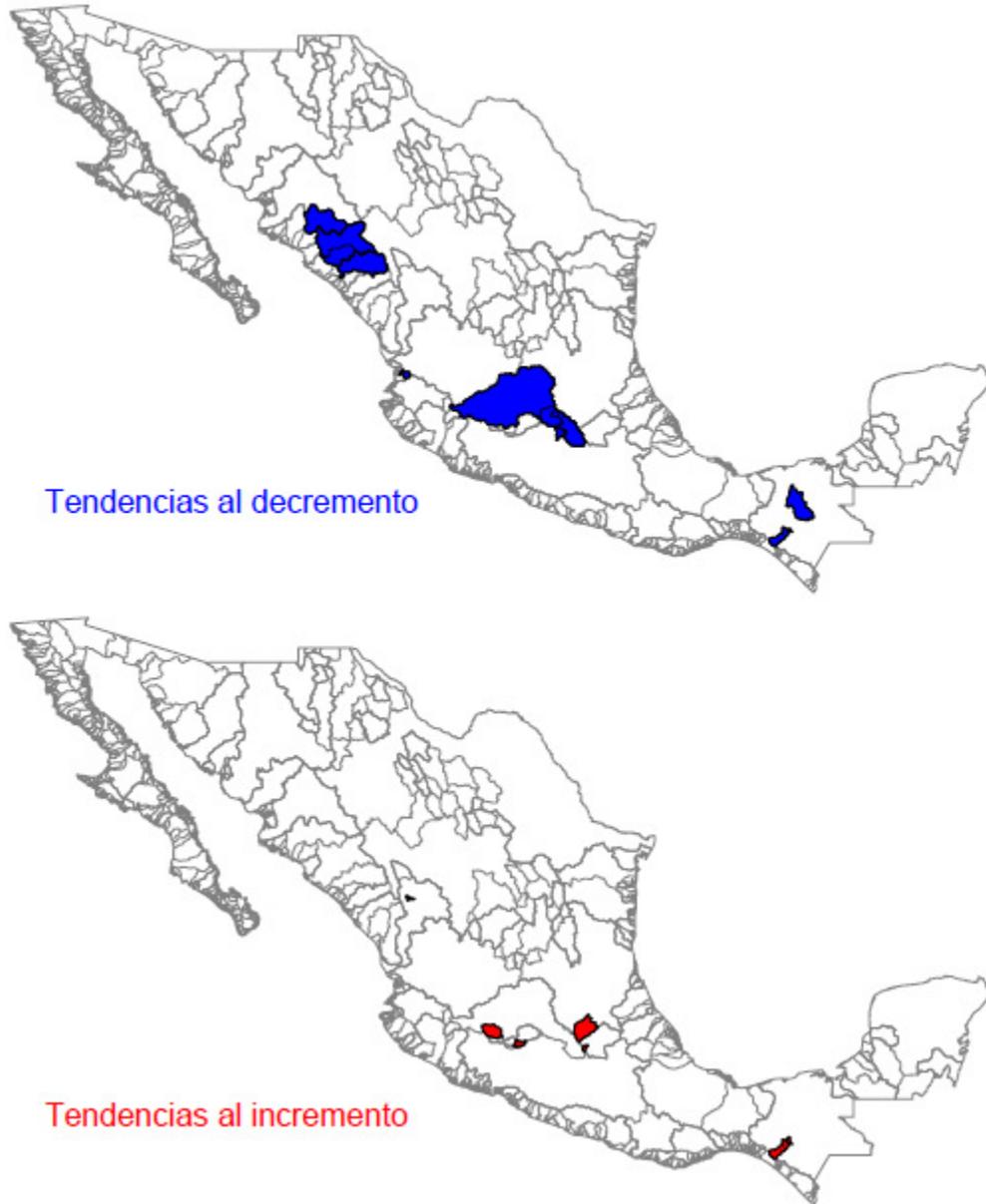


Figura 6.6 Mismo que **Figura 6.5**, solo que en este caso de caudal máximo anual.

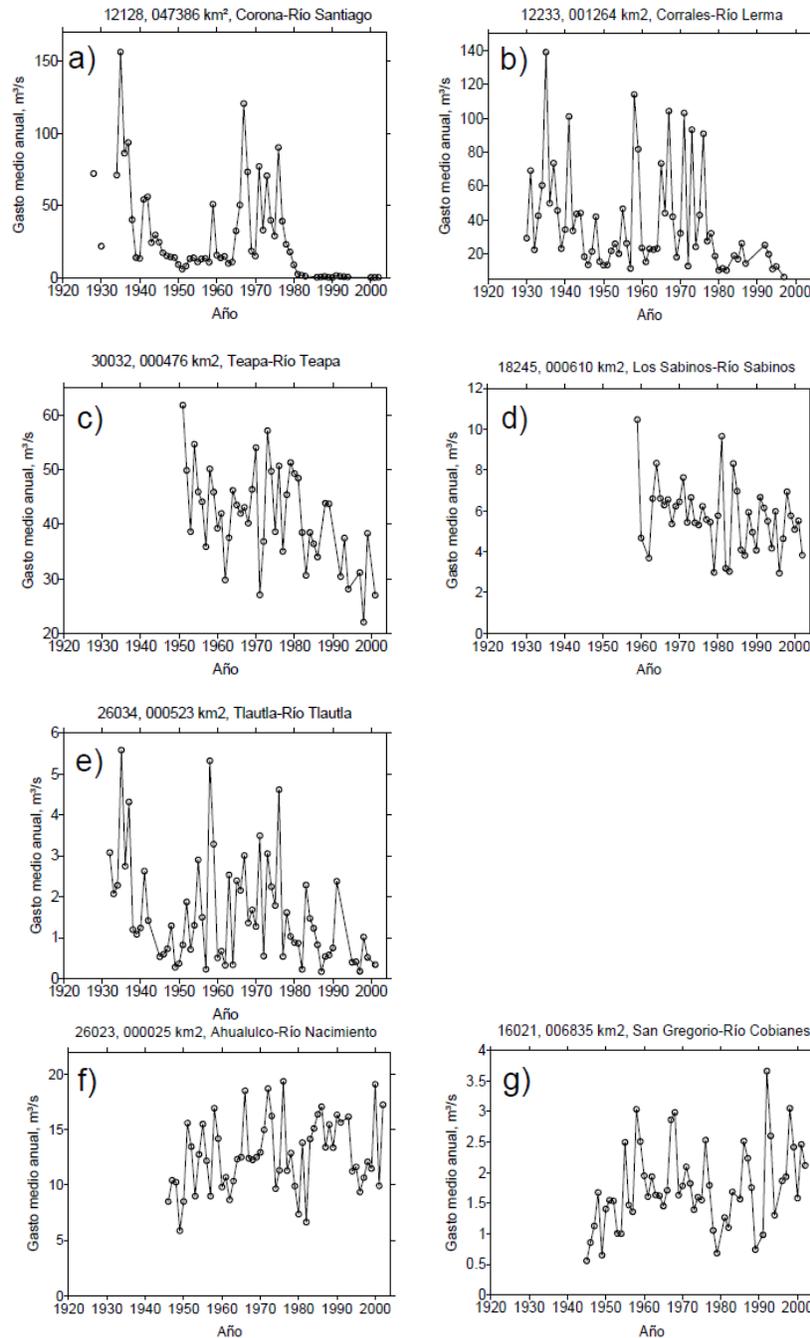


Figura 6.7 Series de gastos medios anuales que resultaron homogéneas en su interior por los criterios de Student y de Fisher con pendiente negativa y estadísticamente significativa ($P=95\%$).

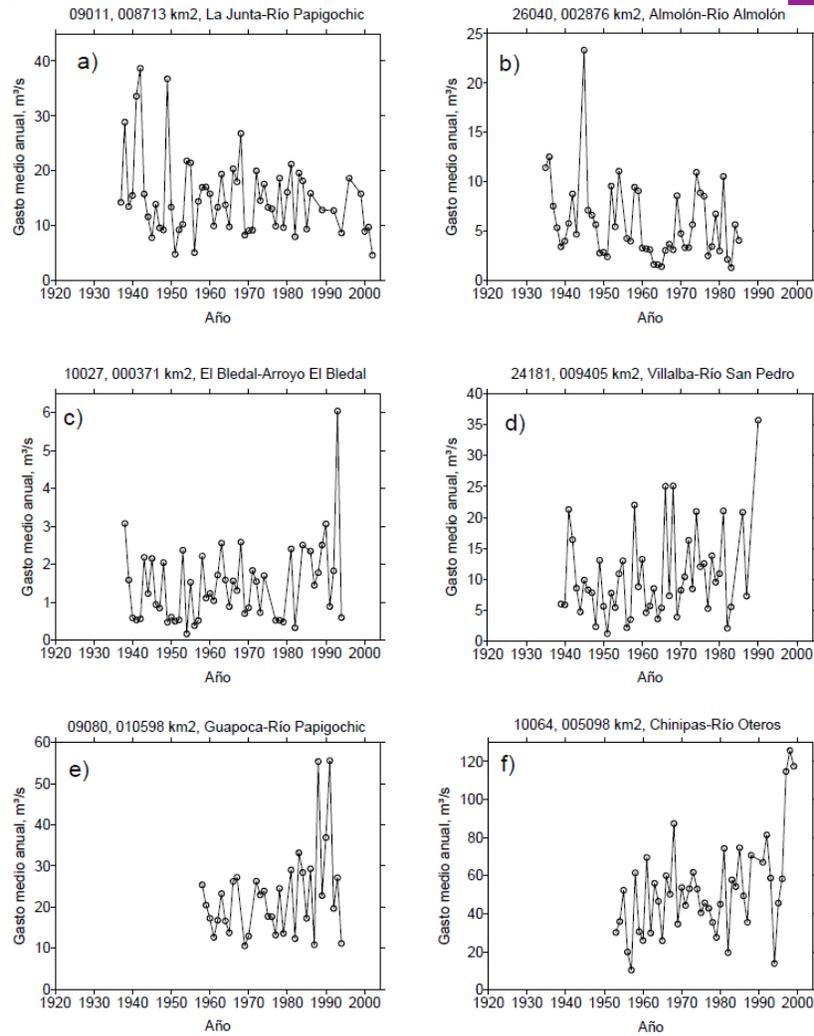


Figura 6.8 Series de gastos medios anuales que resultaron homogéneas en su interior por el criterio de Student, y no homogéneas por el criterio de Fisher.

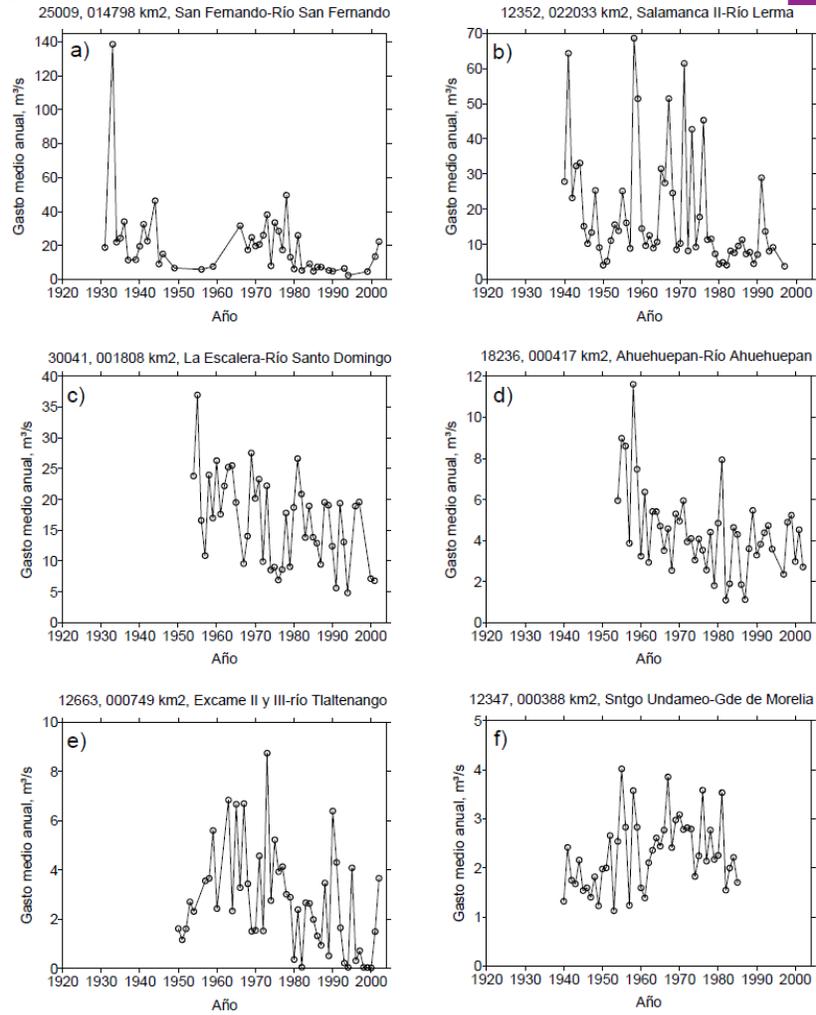


Figura 6.9 Series de gastos medios anuales que resultaron homogéneas en su interior por el criterio de Fisher, y no homogéneas por el criterio de Student.

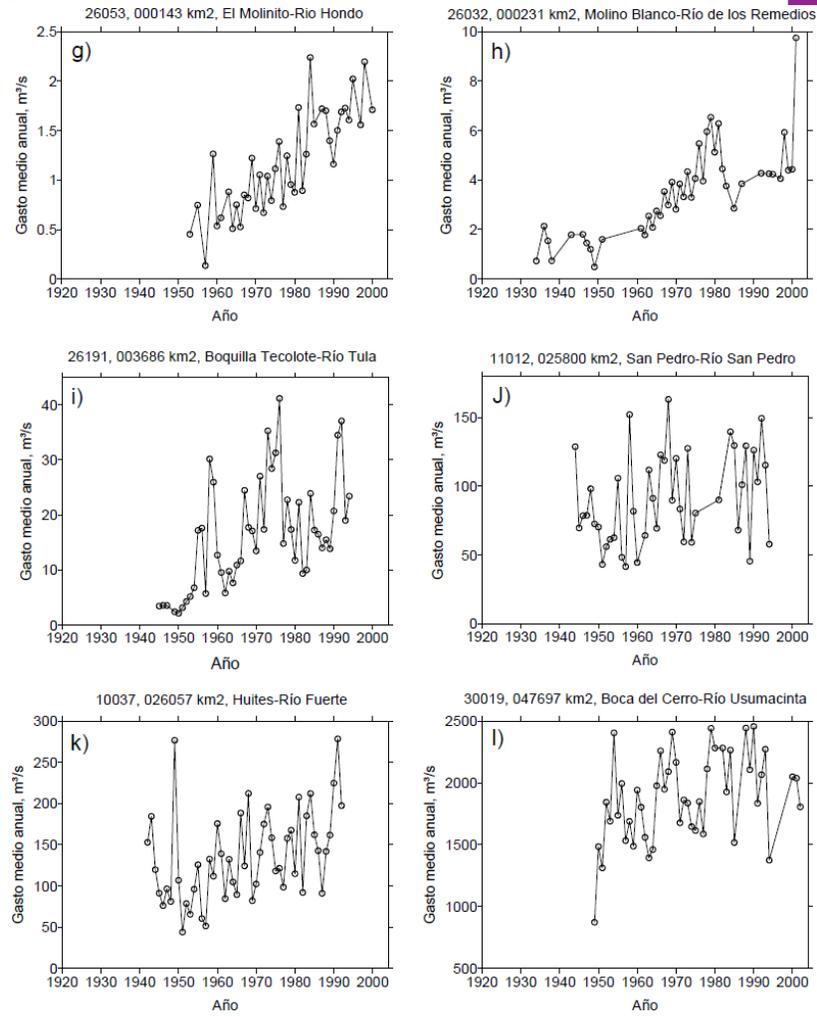


Figura 6.9 Continuación.

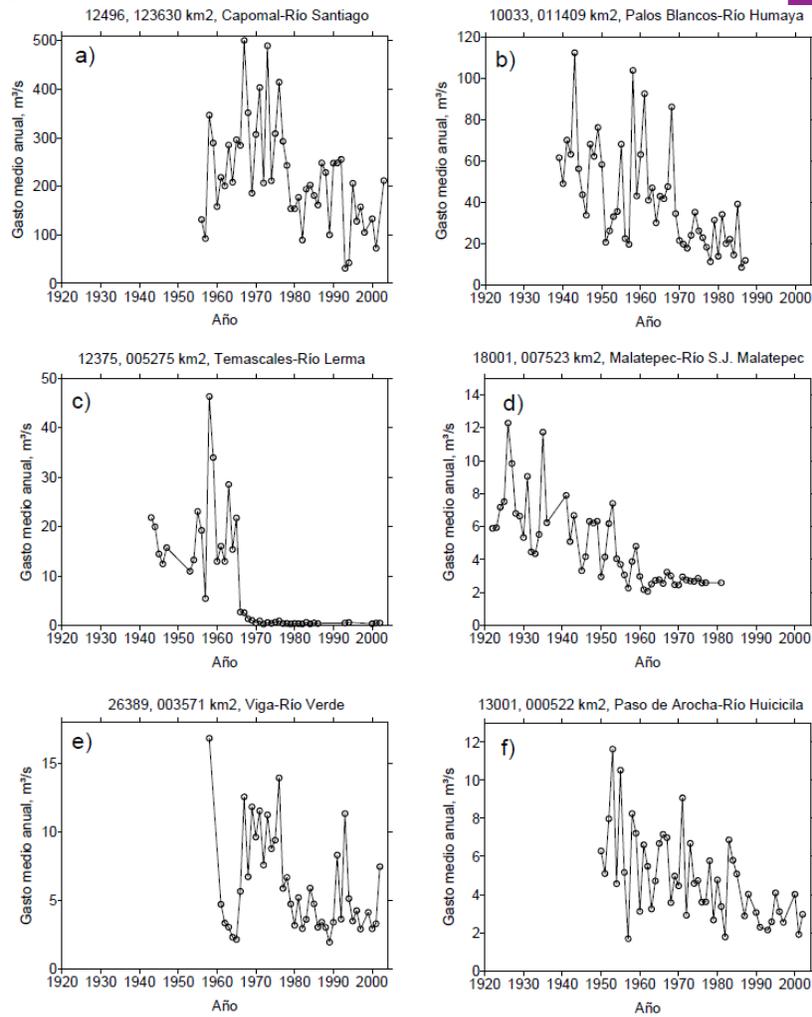


Figura 6.10 Series de gastos medios anuales que resultaron no homogéneas en su interior por los criterios de Fisher y de Student.

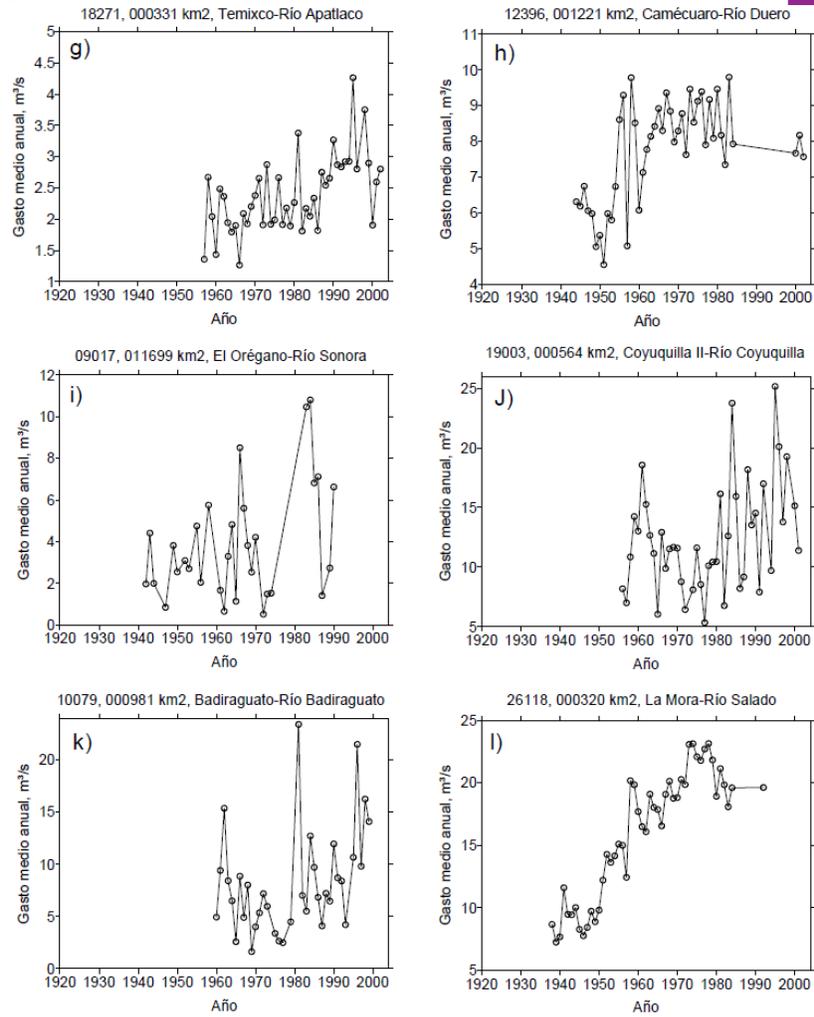


Figura 6.10 Continuación.

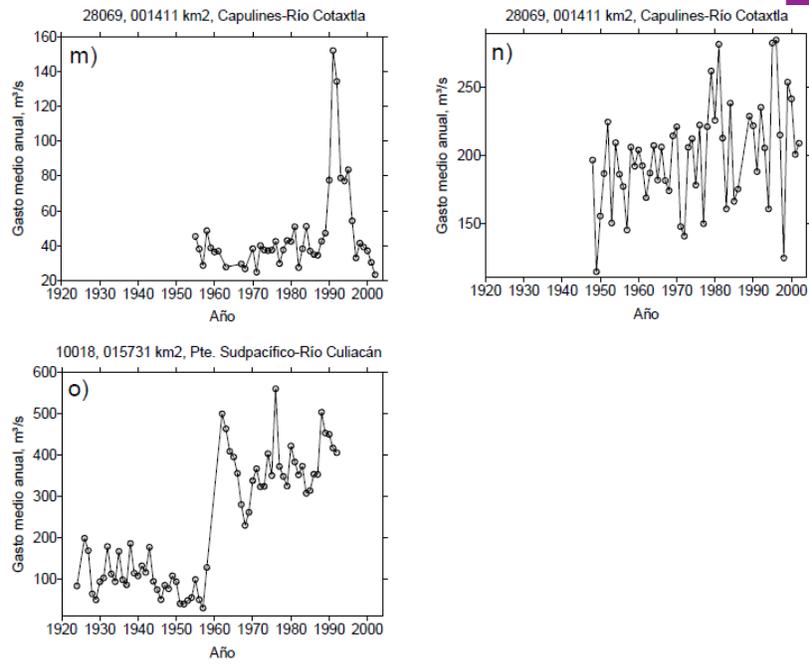


Figura 6.10 Continuación.

Tabla A.1 Características generales de las series de caudales (gratos medios anuales), según el método de los Momentos. Las series corresponden a estaciones de aforo con más de 40 años de registros.

Clave	Parámetros			Error de estimación			Clave	Parámetros			Error de estimación		
	Media	Cv	Cs	Media	Cv	Cs		Media	Cv	Cs	Media	Cv	Cs
9003	63.8	0.4	0.77	4.32	0.05	0.39	12504	19.4	0.76	1.48	2.13	0.09	0.51
9004	81.6	0.4	0.73	7.64	0.06	0.39	12514	25.6	0.55	0.73	2.29	0.05	0.27
9011	14.9	0.48	1.47	1.11	0.05	0.42	12663	2.72	0.77	0.83	0.35	0.11	0.38
9017	3.47	0.7	1.25	0.44	0.09	0.41	13001	4.84	0.47	0.96	0.37	0.05	0.41
9067	30.9	0.42	1.03	2.69	0.05	0.39	14008	16.1	0.37	0.82	0.83	0.04	0.38
9080	22.7	0.47	1.65	1.83	0.06	0.48	16014	14.3	0.36	1.33	0.88	0.04	0.41
10018	266	0.59	-0.16	114	0.1	0.39	16020	0.86	0.47	1.11	0.08	0.06	0.42
10027	1.41	0.72	2.02	0.14	0.09	0.63	16021	1.76	0.39	0.56	0.12	0.03	0.25
10033	41.3	0.6	1.06	5.38	0.08	0.46	18001	3.76	0.43	1.21	0.59	0.07	0.46
10036	45	0.4	1.02	3.02	0.03	0.37	18129	0.4	0.62	1.31	0.048	0.08	0.46
10037	136	0.4	0.66	10	0.04	0.3	18232	24.5	0.38	1.66	1.14	0.05	0.51
10040	50.8	0.41	1.29	3.48	0.04	0.38	18236	4.43	0.46	1.21	0.37	0.05	0.49
10064	52.2	0.49	1.06	5.71	0.06	0.42	18245	5.69	0.29	0.61	0.24	0.03	0.35
10065	52.2	0.49	1.06	5.71	0.06	0.42	18271	2.39	0.25	0.73	0.12	0.03	0.38
10070	12.4	0.62	1.44	1	0.08	0.46	18459	6.57	0.3	0.79	0.34	0.03	0.4
10079	7.97	0.61	1.49	0.97	0.08	0.45	19003	12.4	0.37	0.88	0.9	0.04	0.38
11008	3.25	0.64	0.71	0.34	0.08	0.36	22008	11.8	0.61	1.15	1.25	0.07	0.37
11012	91	0.36	0.36	5.24	0.04	0.34	22017	3.8	0.83	1.89	0.68	0.13	0.53
11014	42.3	0.38	1.36	2.31	0.04	0.43	24038	7.07	1.75	3.47	1.84	0.3	0.75
11016	53.3	0.47	0.52	4.63	0.05	0.26	24087	2.25	0.72	2.06	0.24	0.1	0.63
11058	31.6	0.54	1.31	2.46	0.07	0.43	24088	21.1	0.55	1.19	2.12	0.08	0.43
12104	30	0.41	0.97	3.63	0.07	0.4	24181	10.7	0.69	1.31	0.92	0.09	0.48
12128	21.9	1.17	1.87	6.34	0.26	0.7	24192	3.79	0.58	1.75	0.34	0.07	0.47
12209	20	0.39	1.44	1.51	0.05	0.45	24195	5.19	0.79	1.69	0.51	0.11	0.52
12221	4.84	0.29	0.39	0.33	0.04	0.35	24198	35.9	2.03	7.18	10.4	0.35	1.16
12233	34.5	0.83	1.6	4.39	0.1	0.46	24226	19.4	0.66	1.22	2.38	0.09	0.47
12310	10.3	0.22	0.16	0.34	0.02	0.23	25009	17.2	0.72	0.94	2.21	0.1	0.37
12347	2.3	0.32	0.48	0.13	0.03	0.36	25027	2.56	0.71	0.9	0.33	0.09	0.37
12352	18.6	0.88	1.65	2.72	0.12	0.48	25030	7.74	4.06	6.66	4.51	0.74	0.76
12374	4.24	0.3	0.26	0.21	0.03	0.33	26023	12.7	0.26	0.14	0.5	0.02	0.24
12375	8.23	1.33	1.52	3.62	0.54	0.5	26032	3.69	0.48	0.99	0.64	0.08	0.42
12379	1.46	0.14	0.47	0.065	0.02	0.32	26034	1.38	0.83	1.42	0.16	0.1	0.46



Instituto Mexicano de
Tecnología del Agua
Tabla A.1 Continuación

Tendencias climáticas de fenómenos
hidrometeorológicos extremos en México
durante los últimos 40 años



SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES

Clave	Parámetros			Error de estimación			Clave	Parámetros			Error de estimación		
	Media	Cv	Cs	Media	Cv	Cs		Media	Cv	Cs	Media	Cv	Cs
12396	7.71	0.18	-0.53	0.37	0.02	0.34	26040	5.57	0.7	2.34	0.74	0.1	0.62
12428	19.7	0.65	1.19	1.91	0.07	0.38	26042	5.45	0.72	2.11	0.65	0.07	0.57
12438	96.7	0.59	1.83	10.8	0.08	0.56	26053	1.16	0.44	0.27	0.14	0.07	0.39
12441	9.63	0.6	1.17	0.99	0.07	0.45	26070	3.75	0.41	0.87	0.24	0.04	0.3
12454	2.72	1.36	2.11	0.58	0.21	0.76	26118	16.3	0.3	-0.44	3.79	0.04	0.38
12469	4.13	0.41	0.98	0.21	0.05	0.39	26133	2.38	0.43	0.47	0.22	0.06	0.36
12484	11.4	0.63	0.65	1.46	0.08	0.36	26149	12.7	0.73	3.08	1.22	0.09	0.66
12496	221	0.48	0.69	22.1	0.07	0.36	26191	16.3	0.62	0.59	2.7	0.11	0.4
26218	12.2	0.4	0.55	1.03	0.04	0.26	28016	195	0.25	0.73	6.69	0.03	0.37
26241	29.3	0.2	0.47	1.03	0.02	0.34	28030	17.5	0.21	0.94	0.74	0.03	0.33
26243	42.1	0.38	0.53	2.42	0.04	0.34	28040	18	0.34	1.03	0.84	0.04	0.42
26248	86.5	0.48	1.04	6.54	0.05	0.41	28069	46.4	0.56	2.78	10.5	0.12	0.6
26249	70.1	0.47	1.14	6.27	0.06	0.41	28108	15.1	0.39	0.83	1.05	0.05	0.39
26255	391	0.44	0.45	30.0	0.05	0.34	28111	4.61	0.39	0.52	0.28	0.04	0.33
26263	35.8	0.5	1.1	3.59	0.06	0.42	29005	444	0.27	1.13	28.7	0.04	0.43
26267	35.7	0.43	0.67	3.27	0.05	0.41	30005	530	0.19	-0.23	19.8	0.02	0.32
26268	41.0	0.56	0.91	4.82	0.08	0.45	30015	671	0.23	0.46	34.5	0.03	0.37
26270	51.4	0.39	0.39	4.38	0.06	0.36	30016	199	0.19	0.18	5.88	0.02	0.23
26272	166	0.49	1.28	15.9	0.06	0.5	30019	1879	0.19	-0.31	74.6	0.02	0.34
26277	30.8	0.43	1.02	2.28	0.05	0.4	30020	16.3	0.36	0.59	0.89	0.04	0.38
26282	0.92	0.64	2.33	0.11	0.11	0.68	30031	17.5	0.21	-0.24	0.62	0.02	0.32
26285	26.2	0.42	1.19	2.42	0.06	0.47	30032	41.3	0.21	0.01	1.67	0.02	0.32
26286	12.1	0.48	0.54	1.15	0.06	0.35	30041	16.7	0.43	0.35	1.46	0.05	0.34
26289	35.2	0.44	0.89	3.17	0.06	0.4	30042	203	0.16	0.47	5.36	0.02	0.34
26293	50.8	0.42	0.86	3.67	0.05	0.39	30062	203	0.5	1.43	38.3	0.08	0.49
26296	31.8	0.35	0.6	2.18	0.04	0.37	30088	75.7	0.46	0.59	8.75	0.07	0.36
26388	16.2	0.38	1.02	1.06	0.04	0.44	30138	15.0	0.26	0.53	1.18	0.05	0.44
26389	6.11	0.6	1.14	0.95	0.09	0.46	34008	3.68	0.85	2.61	0.56	0.13	0.69
27001	54.5	0.17	0.96	1.14	0.02	0.37	36039	4.00	1.04	1.62	0.43	0.17	0.66
27002	45.6	0.29	0.53	1.51	0.03	0.36	36044	31	0.55	1.86	3.82	0.06	0.48
27005	10.9	0.44	4.53	0.79	0.07	0.55	36049	0.82		2.76	0.18	0	0
28003	56.3	0.25	0.45	2.00	0.03	0.26	36056	2.2	1.15	3.05	0.38	0.28	0.9
28013	192	0.18	-0.08	4.45	0.02	0.22	37012	52.2	0.49	1.06	5.71	0.06	0.42

Tabla A.2 Resultados del análisis de homogeneidad al interior de las series de caudales (gastos medios anuales), según el criterio de Student (comparación de medias) al 95% de significancia estadística, partiendo la serie por la mitad y considerando conocida la desviación estándar de la serie.

Clave	Periodo	n	Yr	Xavg1	Xavg2	tx	ta	Decisión
9003	1958-1996	39	1977	59.6	67.7	1	2.03	No se rechaza
9004	1966-1998	33	1982	73.9	88.8	1.31	2.04	No se rechaza
9011	1940-1994	55	1967	15.9	13.9	1.06	2.01	No se rechaza
9017	1942-1992	51	1967	3.17	3.77	3.15	2.01	Se rechaza
9067	1961-1996	36	1979	27.4	34.4	1.68	2.03	No se rechaza
9080	1958-1991	34	1975	19.5	25.9	1.78	2.04	No se rechaza
10018	1940-1989	50	1965	160	371	6.49	2.01	Se rechaza
10027	1940-1989	50	1965	1.19	1.64	1.6	2.01	No se rechaza
10033	1940-1987	48	1964	54.5	28	4.31	2.01	Se rechaza
10036	1942-1993	52	1968	44	45.9	0.38	2.01	No se rechaza
10037	1942-1992	51	1967	115	156	2.97	2.01	Se rechaza
10040	1944-1995	52	1970	49.9	51.7	0.3	2.01	No se rechaza
10064	1953-1997	45	1975	45.2	59	1.88	2.02	No se rechaza
10065	1953-1997	45	1975	45.2	59	6.38	2.02	Se rechaza
10070	1955-1997	43	1976	12.7	12.1	0.26	2.02	No se rechaza
10079	1960-1999	40	1980	6.02	9.92	8.68	2.02	Se rechaza
11008	1943-1987	45	1965	3.45	3.06	0.61	2.02	No se rechaza
11012	1944-1986	43	1965	77.7	104	2.77	2.02	Se rechaza
11014	1946-2002	57	1974	42.4	42.1	0.054	2	No se rechaza
11016	1948-1998	51	1973	52.8	53.8	0.14	2.01	No se rechaza
11058	1956-1997	42	1977	31.9	31.2	0.13	2.02	No se rechaza
12104	1940-1965	26	1953	26.4	33.6	3.91	2.06	Se rechaza
12128	1940-1995	56	1968	24.3	19.6	0.69	2.01	No se rechaza
12209	1940-1992	53	1966	21.4	18.6	1.31	2.01	No se rechaza
12221	1940-1985	46	1963	4.12	5.57	4.06	2.02	Se rechaza
12233	1940-1991	52	1966	35.5	33.4	0.26	2.01	No se rechaza
12310	1940-1996	57	1968	10.5	10.1	0.64	2	No se rechaza
12347	1940-1985	46	1963	2.03	2.56	2.62	2.02	Se rechaza
12352	1940-1995	56	1968	22.9	14.2	2.05	2.01	Se rechaza
12374	1943-1991	49	1967	4.04	4.44	1.11	2.01	No se rechaza
12375	1943-1986	44	1965	16	0.48	6.65	2.02	Se rechaza
12379	1943-1996	54	1970	1.43	1.48	0.79	2.01	No se rechaza
12396	1944-1987	44	1966	6.93	8.5	4.38	2.02	Se rechaza
12428	1948-2002	55	1975	19.6	19.9	0.093	2.01	No se rechaza
12438	1949-1994	46	1972	105	88.6	0.96	2.02	No se rechaza

Tabla A.2 Continuación

Clave	Periodo	n	Yr	Xavg1	Xavg2	tx	ta	Decisión
12441	1949-1996	48	1973	10.9	8.35	1.56	2.01	No se rechaza
12454	1955-2002	48	1979	3.32	2.12	1.13	2.01	No se rechaza
12469	1952-1998	47	1975	4.06	4.19	0.26	2.01	No se rechaza
12484	1955-1997	43	1976	13.2	9.6	1.69	2.02	No se rechaza
12496	1956-2001	46	1979	279	162	4.51	2.02	Se rechaza
12504	1948-1997	50	1973	20.9	17.9	0.72	2.01	No se rechaza
12514	1949-1999	51	1974	25.9	25.3	0.15	2.01	No se rechaza
12663	1950-1998	49	1974	3.66	1.81	12	2.01	Se rechaza
13001	1950-1997	48	1974	6	3.68	4.12	2.01	Se rechaza
14008	1950-1996	47	1973	18.1	14.2	8.08	2.01	Se rechaza
16014	1941-1998	58	1970	15.4	13.1	1.75	2	No se rechaza
16020	1944-1990	47	1967	0.83	0.89	1.69	2.01	No se rechaza
16021	1945-1998	54	1972	1.69	1.83	0.76	2.01	No se rechaza
18001	1941-1977	37	1959	4.91	2.66	17.3	2.03	Se rechaza
18129	1940-1987	48	1964	0.33	0.48	7.22	2.01	Se rechaza
18232	1955-2000	46	1978	26	23	1.1	2.02	No se rechaza
18236	1954-2000	47	1977	5.22	3.67	2.77	2.01	Se rechaza
18245	1959-2001	43	1980	6.07	5.32	1.51	2.02	No se rechaza
18271	1957-2001	45	1979	2.09	2.67	3.67	2.02	Se rechaza
18459	1947-1992	46	1970	6.49	6.65	0.27	2.02	No se rechaza
19003	1956-1998	43	1977	10.6	14.1	2.62	2.02	Se rechaza
22008	1940-1996	57	1968	11.5	12.2	0.35	2	No se rechaza
22017	1948-1992	45	1970	3.21	4.37	4.13	2.02	Se rechaza
24038	1940-1980	41	1960	6.35	7.76	0.36	2.02	No se rechaza
24087	1941-1976	36	1959	2.48	2.02	2.54	2.03	Se rechaza
24088	1940-1971	32	1956	21.5	20.7	0.52	2.04	No se rechaza
24181	1940-1986	47	1963	8.77	12.5	1.77	2.01	No se rechaza
24192	1941-1992	52	1967	3.21	4.37	1.96	2.01	No se rechaza
24195	1942-1986	45	1964	4.78	5.58	0.65	2.02	No se rechaza
24198	1940-1994	55	1967	25.4	46.1	1.05	2.01	No se rechaza
24226	1949-1996	48	1973	19.9	18.9	0.28	2.01	No se rechaza
25009	1940-1975	36	1958	21.4	13	6.35	2.03	Se rechaza
25027	1952-1996	45	1974	2.6	2.53	0.12	2.02	No se rechaza
25030	1953-1997	45	1975	2.74	12.5	1.04	2.02	No se rechaza
26023	1946-2001	56	1974	12.3	13.1	0.94	2.01	No se rechaza
26032	1943-1981	39	1962	2.47	4.85	18	2.03	Se rechaza

Tabla A.2 Continuación

Clave	Periodo	n	Yr	Xavg1	Xavg2	tx	ta	Decisión
26034	1940-1995	56	1968	1.5	1.26	0.79	2.01	No se rechaza
26040	1940-1983	44	1962	6.29	4.85	1.23	2.02	No se rechaza
26042	1940-1997	58	1969	5.63	5.27	0.35	2	No se rechaza
26053	1953-1993	41	1973	0.8	1.5	6.03	2.02	Se rechaza
26070	1940-1998	59	1969	3.8	3.7	0.23	2	No se rechaza
26118	1940-1985	46	1963	12.5	20.2	8.56	2.02	Se rechaza
26133	1940-1989	50	1965	2.1	2.66	1.96	2.01	No se rechaza
26149	1943-1995	53	1969	11.5	13.9	0.93	2.01	No se rechaza
26191	1945-1993	49	1969	10.8	21.5	4.44	2.01	Se rechaza
26218	1950-2000	51	1975	11.5	12.9	1.07	2.01	No se rechaza
26241	1954-1998	45	1976	30.1	28.5	0.92	2.02	No se rechaza
26243	1954-2001	48	1978	45	39.2	1.25	2.01	No se rechaza
26248	1955-2001	47	1978	95.6	77.7	1.5	2.01	No se rechaza
26249	1955-2002	48	1979	81	59.1	2.4	2.01	Se rechaza
26255	1957-2000	44	1979	436	345	1.82	2.02	No se rechaza
26263	1959-2002	44	1981	38.3	33.2	3.12	2.02	Se rechaza
26267	1959-2002	44	1981	35.8	35.5	0.068	2.02	No se rechaza
26268	1959-2002	44	1981	46	36	1.47	2.02	No se rechaza
26270	1960-2002	43	1981	51	51.8	0.12	2.02	No se rechaza
26272	1954-2000	47	1977	188	146	1.8	2.01	No se rechaza
26277	1960-2000	41	1980	30.6	31	0.079	2.02	No se rechaza
26282	1961-2000	40	1981	0.83	1.01	1.01	2.02	No se rechaza
26285	1961-2001	41	1981	27.9	24.6	0.94	2.02	No se rechaza
26286	1961-1998	38	1980	12.5	11.7	0.42	2.03	No se rechaza
26289	1961-2001	41	1981	32.4	38	1.16	2.02	No se rechaza
26293	1961-2001	41	1981	47.8	53.6	0.87	2.02	No se rechaza
26296	1961-2002	42	1982	32	31.6	0.13	2.02	No se rechaza
26388	1961-1999	39	1980	17	15.4	0.83	2.03	No se rechaza
26389	1958-1999	42	1979	7.71	4.5	3.13	2.02	Se rechaza
27001	1953-2001	49	1977	54.7	54.4	0.1	2.01	No se rechaza
27002	1953-2002	50	1978	43.3	47.8	1.2	2.01	No se rechaza
27005	1960-1999	40	1980	11.5	10.3	0.79	2.02	No se rechaza
28003	1951-2002	52	1977	58.8	53.7	1.3	2.01	No se rechaza
28013	1948-2002	55	1975	183	201	1.97	2.01	No se rechaza
28016	1948-1987	40	1968	181	208	1.84	2.02	No se rechaza
28030	1951-2002	52	1977	16.8	18.2	1.38	2.01	No se rechaza

Tabla A.2 Continuación

Clave	Periodo	n	Yr	Xavg1	Xavg2	tx	ta	Decisión
28040	1952-2001	50	1977	18.4	17.6	0.43	2.01	No se rechaza
28069	1955-1997	43	1976	36.6	55.7	8.68	2.02	Se rechaza
28108	1962-2002	41	1982	15.8	14.4	0.74	2.02	No se rechaza
28111	1964-2002	39	1983	4.36	4.85	0.84	2.03	No se rechaza
29005	1954-1992	39	1973	420	467	1.24	2.03	No se rechaza
30005	1947-1991	45	1969	510	549	4.54	2.02	Se rechaza
30015	1948-1994	47	1971	705	639	1.46	2.01	No se rechaza
30016	1948-2000	53	1974	184	213	3.05	2.01	Se rechaza
30019	1949-1994	46	1972	1772	1987	2.13	2.02	Se rechaza
30020	1952-1999	48	1976	17.6	15.1	1.48	2.01	No se rechaza
30031	1951-1990	40	1971	17.6	17.3	0.23	2.02	No se rechaza
30032	1951-1995	45	1973	43.4	39.4	1.57	2.02	No se rechaza
30041	1954-1997	44	1976	19	14.4	2.19	2.02	Se rechaza
30042	1954-1995	42	1975	202	204	0.13	2.02	No se rechaza
30062	1958-1998	41	1978	205	200	0.16	2.02	No se rechaza
30088	1953-1994	42	1974	72.9	78.6	0.53	2.02	No se rechaza
30138	1970-1981	12	1976	13.9	16.1	1.64	2.23	No se rechaza
34008	1952-1998	47	1975	2.73	4.59	2.1	2.01	Se rechaza
36039	1942-1996	55	1969	3.73	4.27	1.78	2.01	No se rechaza
36044	1947-1999	53	1973	29.3	32.6	0.7	2.01	No se rechaza
36049	1949-1988	40	1969	0.76	0.87	1.18	2.02	No se rechaza
36056	1962-2000	39	1981	2.79	1.63	4.49	2.03	Se rechaza
37012	1953-1997	45	1975	45.2	59	6.38	2.02	Se rechaza

Nota: n=número de años de registros, Yr=año en que se divide la serie; Xavg1=media del primer periodo; Xavg2=media del segundo periodo; tx=estadístico empírico de Student; ta= valor tabular al 95% de significancia estadística.

Tabla A.3 Mismo que **Tabla A.2**, solo que aquí según el criterio de homogeneidad de Fisher (comparación de varianzas).

Clave	Periodo	n	Yr	STD1	STD2	Fx	Fa	Decisión
9003	1958-1996	39	1977	18.6	30.2	2.62	2.21	Se rechaza
9004	1966-1998	33	1982	24.8	38.6	2.42	2.38	Se rechaza
9011	1940-1994	55	1967	8.65	5.16	2.81	1.94	Se rechaza
9017	1942-1992	51	1967	1.8	2.94	2.68	1.96	Se rechaza
9067	1961-1996	36	1979	7.86	15.9	4.09	2.3	Se rechaza
9080	1958-1991	34	1975	5.38	13.8	6.53	2.36	Se rechaza
10018	1940-1989	50	1965	146	71.2	4.19	1.98	Se rechaza
10027	1940-1989	50	1965	0.73	1.21	2.75	1.98	Se rechaza
10033	1940-1987	48	1964	25.1	16.4	2.34	2.02	Se rechaza
10036	1942-1993	52	1968	19.9	16	1.55	1.96	No se rechaza
10037	1942-1992	51	1967	51.8	48.7	1.13	1.98	No se rechaza
10040	1944-1995	52	1970	24.9	16.7	2.23	1.96	Se rechaza
10064	1953-1997	45	1975	18.3	29.5	2.61	2.08	Se rechaza
10065	1953-1997	45	1975	18.3	29.5	2.61	2.08	Se rechaza
10070	1955-1997	43	1976	5.17	9.61	3.45	2.12	Se rechaza
10079	1960-1999	40	1980	3.29	5.45	2.74	2.19	Se rechaza
11008	1943-1987	45	1965	1.91	2.27	1.42	2.08	No se rechaza
11012	1944-1986	43	1965	28.8	32.7	1.29	2.12	No se rechaza
11014	1946-2002	57	1974	15.8	16.7	1.12	1.91	No se rechaza
11016	1948-1998	51	1973	25.2	25.8	1.05	1.96	No se rechaza
11058	1956-1997	42	1977	15	19.3	1.64	2.15	No se rechaza
12104	1940-1965	26	1953	12.2	11.5	1.14	2.69	No se rechaza
12128	1940-1995	56	1968	23.9	27.4	1.31	1.92	No se rechaza
12209	1940-1992	53	1966	8.88	6.58	1.82	1.96	No se rechaza
12221	1940-1985	46	1963	1.41	0.98	2.05	2.06	No se rechaza
12233	1940-1991	52	1966	27.6	30	1.18	1.96	No se rechaza
12310	1940-1996	57	1968	2.55	2.04	1.57	1.92	No se rechaza
12347	1940-1985	46	1963	0.76	0.59	1.65	2.06	No se rechaza
12352	1940-1995	56	1968	17.4	14	1.53	1.92	No se rechaza
12374	1943-1991	49	1967	1.39	1.17	1.42	2.01	No se rechaza
12375	1943-1986	44	1965	10.9	0.18	3743	2.1	Se rechaza
12379	1943-1996	54	1970	0.16	0.24	2.15	1.94	Se rechaza
12396	1944-1987	44	1966	1.51	0.73	4.3	2.1	Se rechaza
12428	1948-2002	55	1975	12.3	13.7	1.23	1.93	No se rechaza
12438	1949-1994	46	1972	60.6	53.9	1.26	2.06	No se rechaza
12441	1949-1996	48	1973	6.02	5.36	1.26	2.02	No se rechaza

Tabla A.3 Continuación

Clave	Periodo	n	Yr	STD1	STD2	Fx	Fa	Decisión
12454	1955-2002	48	1979	4.23	3.06	1.91	2.02	No se rechaza
12469	1952-1998	47	1975	1.95	1.47	1.77	2.04	No se rechaza
12484	1955-1997	43	1976	7.57	6.32	1.43	2.13	No se rechaza
12496	1956-2001	46	1979	106	66.4	2.52	2.06	Se rechaza
12504	1948-1997	50	1973	14	15.4	1.21	1.98	No se rechaza
12514	1949-1999	51	1974	14.8	13.8	1.14	1.98	No se rechaza
12663	1950-1998	49	1974	2.05	1.7	1.45	2.01	No se rechaza
13001	1950-1997	48	1974	2.42	1.34	3.27	2.02	Se rechaza
14008	1950-1996	47	1973	5.67	5.73	1.02	2.04	No se rechaza
16014	1941-1998	58	1970	5.58	4.47	1.56	1.91	No se rechaza
16020	1944-1990	47	1967	0.39	0.43	1.22	2.04	No se rechaza
16021	1945-1998	54	1972	0.66	0.7	1.15	1.94	No se rechaza
18001	1941-1977	37	1959	1.66	0.28	34.6	2.29	Se rechaza
18129	1940-1987	48	1964	0.26	0.23	1.25	2.02	No se rechaza
18232	1955-2000	46	1978	7.09	11.1	2.43	2.06	Se rechaza
18236	1954-2000	47	1977	2.21	1.6	1.92	2.04	No se rechaza
18245	1959-2001	43	1980	1.55	1.71	1.22	2.12	No se rechaza
18271	1957-2001	45	1979	0.43	0.62	2.09	2.08	Se rechaza
18459	1947-1992	46	1970	2.29	1.57	2.13	2.06	Se rechaza
19003	1956-1998	43	1977	3.3	5.05	2.35	2.12	Se rechaza
22008	1940-1996	57	1968	6.18	8.22	1.77	1.91	No se rechaza
22017	1948-1992	45	1970	3.43	2.82	1.48	2.09	No se rechaza
24038	1940-1980	41	1960	14.2	10.6	1.81	2.18	No se rechaza
24087	1941-1976	36	1959	1.8	1.44	1.56	2.3	No se rechaza
24088	1940-1971	32	1956	10.2	13	1.63	2.43	No se rechaza
24181	1940-1986	47	1963	5.63	8.4	2.22	2.04	Se rechaza
24192	1941-1992	52	1967	1.65	2.54	2.35	1.96	Se rechaza
24195	1942-1986	45	1964	3.85	4.38	1.29	2.08	No se rechaza
24198	1940-1994	55	1967	12.5	102	66.3	1.93	Se rechaza
24226	1949-1996	48	1973	13.2	12.6	1.1	2.02	No se rechaza
25009	1940-1975	36	1958	11.8	12	1.05	2.3	No se rechaza
25027	1952-1996	45	1974	2.06	1.62	1.6	2.09	No se rechaza
25030	1953-1997	45	1975	1.94	43.9	512	2.08	Se rechaza
26023	1946-2001	56	1974	3.2	3.33	1.08	1.92	No se rechaza
26032	1943-1981	39	1962	1.02	1.52	2.21	2.21	No se rechaza
26034	1940-1995	56	1968	1.19	1.09	1.18	1.92	No se rechaza

Tabla A.3 Continuación

Clave	Periodo	n	Yr	STD1	STD2	Fx	Fa	Decisión
26040	1940-1983	44	1962	4.66	2.96	2.48	2.1	Se rechaza
26042	1940-1997	58	1969	4.39	3.42	1.65	1.91	No se rechaza
26053	1953-1993	41	1973	0.31	0.42	1.82	2.16	No se rechaza
26070	1940-1998	59	1969	1.76	1.36	1.68	1.9	No se rechaza
26118	1940-1985	46	1963	3.83	1.89	4.12	2.06	Se rechaza
26133	1940-1989	50	1965	0.97	1.02	1.1	1.98	No se rechaza
26149	1943-1995	53	1969	8.75	9.83	1.26	1.94	No se rechaza
26191	1945-1993	49	1969	8.04	8.88	1.22	2	No se rechaza
26218	1950-2000	51	1975	5.18	4.49	1.33	1.98	No se rechaza
26241	1954-1998	45	1976	5.46	6.02	1.21	2.08	No se rechaza
26243	1954-2001	48	1978	17	14.8	1.31	2.02	No se rechaza
26248	1955-2001	47	1978	45.6	35.8	1.62	2.04	No se rechaza
26249	1955-2002	48	1979	36.5	25.6	2.03	2.02	Se rechaza
26255	1957-2000	44	1979	166	167	1.02	2.1	No se rechaza
26263	1959-2002	44	1981	19	17	1.24	2.1	No se rechaza
26267	1959-2002	44	1981	14.5	16.6	1.31	2.1	No se rechaza
26268	1959-2002	44	1981	24.5	20.6	1.4	2.1	No se rechaza
26270	1960-2002	43	1981	21.9	18.9	1.34	2.13	No se rechaza
26272	1954-2000	47	1977	80.2	79.6	1.01	2.04	No se rechaza
26277	1960-2000	41	1980	10.7	15.4	2.07	2.16	No se rechaza
26282	1961-2000	40	1981	0.31	0.78	6.22	2.19	Se rechaza
26285	1961-2001	41	1981	10.3	11.8	1.32	2.16	No se rechaza
26286	1961-1998	38	1980	5.3	6.5	1.5	2.25	No se rechaza
26289	1961-2001	41	1981	11.7	18.1	2.41	2.16	Se rechaza
26293	1961-2001	41	1981	18.9	23.1	1.5	2.16	No se rechaza
26296	1961-2002	42	1982	12.7	9.88	1.64	2.15	No se rechaza
26388	1961-1999	39	1980	6.84	5.57	1.51	2.23	No se rechaza
26389	1958-1999	42	1979	4.15	2.21	3.54	2.15	Se rechaza
27001	1953-2001	49	1977	8.11	10.4	1.65	2	No se rechaza
27002	1953-2002	50	1978	13.8	12.9	1.14	1.98	No se rechaza
27005	1960-1999	40	1980	6.44	2.13	9.19	2.19	Se rechaza
28003	1951-2002	52	1977	15.1	12.8	1.38	1.96	No se rechaza
28013	1948-2002	55	1975	35.6	31.2	1.3	1.94	No se rechaza
28016	1948-1987	40	1968	44.7	49.1	1.21	2.19	No se rechaza
28030	1951-2002	52	1977	3.94	3.38	1.36	1.96	No se rechaza
28040	1952-2001	50	1977	6.44	5.94	1.17	1.98	No se rechaza

Tabla A.3 Continuación

Clave	Periodo	n	Yr	STD1	STD2	Fx	Fa	Decisión
28069	1955-1997	43	1976	6.43	33.3	26.8	2.12	Se rechaza
28108	1962-2002	41	1982	6.12	5.74	1.14	2.18	No se rechaza
28111	1964-2002	39	1983	1.79	1.8	1.01	2.21	No se rechaza
29005	1954-1992	39	1973	69.8	150	4.6	2.21	Se rechaza
30005	1947-1991	45	1969	99.4	95.9	1.07	2.09	No se rechaza
30015	1948-1994	47	1971	175	131	1.77	2.04	No se rechaza
30016	1948-2000	53	1974	27.8	41.4	2.22	1.94	Se rechaza
30019	1949-1994	46	1972	370	312	1.41	2.06	No se rechaza
30020	1952-1999	48	1976	6.38	5.12	1.55	2.02	No se rechaza
30031	1951-1990	40	1971	3.78	3.47	1.19	2.19	No se rechaza
30032	1951-1995	45	1973	7.96	9.07	1.3	2.08	No se rechaza
30041	1954-1997	44	1976	7.71	5.92	1.69	2.1	No se rechaza
30042	1954-1995	42	1975	24	38.3	2.54	2.15	Se rechaza
30062	1958-1998	41	1978	69.2	128	3.41	2.16	Se rechaza
30088	1953-1994	42	1974	30.7	38.8	1.6	2.15	No se rechaza
30138	1970-1981	12	1976	2.84	4.87	2.95	5.05	No se rechaza
34008	1952-1998	47	1975	1.75	3.88	4.92	2.04	Se rechaza
36039	1942-1996	55	1969	3.81	4.52	1.41	1.93	No se rechaza
36044	1947-1999	53	1973	16.7	17.7	1.13	1.94	No se rechaza
36049	1949-1988	40	1969	0.5	1.26	6.38	2.19	Se rechaza
36056	1962-2000	39	1981	3.24	1.41	5.27	2.23	Se rechaza
37012	1953-1997	45	1975	18.3	29.5	2.61	2.08	Se rechaza

Nota: n=número de años de registros, Yr=año en que se divide la serie; STD1=desviación estándar del primer periodo; STD2=desviación estándar del segundo periodo; Fx=estadístico empírico de Fisher; Fa= valor tabular al 95% de significancia estadística.

Tabla A.4 Criterio de aleatoriedad al interior de las series de caudal (gastos medios anuales), por incremento y decremento y al 95% de significancia estadística.

Clave	Periodo	n	N-	N+	Mx	Dx	t-	t+	ta	Decisión
9003	1958-1996	39	19	23	22	4	-1.31	0.78	1.96	NO se rechaza
9004	1966-1998	33	17	17	18	3	-0.29	-0.29	1.96	NO se rechaza
9011	1940-1994	55	30	30	31	5	-0.22	-0.22	1.96	NO se rechaza
9017	1942-1992	51	27	27	28	5	-0.23	-0.23	1.96	No se rechaza
9067	1961-1996	36	22	18	21	4	0.8	-1.34	1.96	NO se rechaza
9080	1958-1991	34	19	19	20	3	-0.27	-0.27	1.96	NO se rechaza
10018	1940-1989	50	30	21	26	4	1.9	-2.38	1.96	Se rechaza
10027	1940-1989	50	24	30	28	5	-1.62	1.16	1.96	NO se rechaza
10033	1940-1987	48	25	23	25	4	0.24	-0.73	1.96	NO se rechaza
10036	1942-1993	52	24	33	29	5	-2.25	1.8	1.96	Se rechaza
10037	1942-1992	51	26	26	27	5	-0.24	-0.24	1.96	NO se rechaza
10040	1944-1995	52	25	32	29	5	-1.8	1.35	1.96	NO se rechaza
10064	1953-1997	45	25	22	24	4	0.49	-0.99	1.96	NO se rechaza
10065	1953-1997	45	25	22	24	4	0.49	-0.99	1.96	No se rechaza
10070	1955-1997	43	23	23	24	4	-0.25	-0.25	1.96	NO se rechaza
10079	1960-1999	40	22	19	21	4	0.53	-1.06	1.96	No se rechaza
11008	1943-1987	45	28	19	24	4	1.98	-2.47	1.96	Se rechaza
11012	1944-1986	43	23	24	24	4	-0.49	0	1.96	NO se rechaza
11014	1946-2002	57	30	27	29	5	0.45	-0.9	1.96	NO se rechaza
11016	1948-1998	51	30	25	28	5	0.92	-1.38	1.96	NO se rechaza
11058	1956-1997	42	25	20	23	4	1.01	-1.52	1.96	NO se rechaza
12104	1940-1965	26	11	16	14	2	-1.93	1.29	1.96	No se rechaza
12128	1940-1995	56	33	25	30	5	1.57	-2.01	1.96	Se rechaza
12209	1940-1992	53	29	28	29	5	0	-0.45	1.96	NO se rechaza
12221	1940-1985	46	23	25	25	4	-0.73	0.24	1.96	NO se rechaza
12233	1940-1991	52	28	27	28	5	0	-0.46	1.96	NO se rechaza
12310	1940-1996	57	33	25	30	5	1.57	-2.01	1.96	Se rechaza
12347	1940-1985	46	20	26	24	4	-1.75	1.25	1.96	NO se rechaza
12352	1940-1995	56	27	30	29	5	-0.9	0.45	1.96	NO se rechaza
12374	1943-1991	49	25	29	28	5	-1.16	0.69	1.96	NO se rechaza
12375	1943-1986	44	26	22	25	4	0.73	-1.22	1.96	NO se rechaza
12379	1943-1996	54	29	29	30	5	-0.22	-0.22	1.96	NO se rechaza
12396	1944-1987	44	23	23	24	4	-0.25	-0.25	1.96	NO se rechaza
12428	1948-2002	55	29	27	29	5	0.23	-0.68	1.96	NO se rechaza
12438	1949-1994	46	28	22	26	4	1.2	-1.68	1.96	NO se rechaza



Instituto Mexicano de
Tecnología del Agua

Tendencias climáticas de fenómenos
hidrometeorológicos extremos en México
durante los últimos 40 años



SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES

Tabla A.4 Continuación

Clave	Periodo	n	N-	N+	Mx	Dx	t-	t+	ta	Decisión
12441	1949-1996	48	28	24	27	5	0.71	-1.18	1.96	NO se rechaza
12454	1955-2002	48	24	25	25	4	-0.49	0	1.96	NO se rechaza
12469	1952-1998	47	31	19	26	4	2.64	-3.12	1.96	Se rechaza
12484	1955-1997	43	26	22	25	4	0.73	-1.22	1.96	NO se rechaza
12496	1956-2001	46	26	23	25	4	0.49	-0.97	1.96	NO se rechaza
12504	1948-1997	50	26	27	27	5	-0.47	0	1.96	NO se rechaza
12514	1949-1999	51	26	27	27	5	-0.47	0	1.96	NO se rechaza
12663	1950-1998	49	29	23	27	5	1.18	-1.65	1.96	No se rechaza
13001	1950-1997	48	28	25	27	5	0.47	-0.93	1.96	NO se rechaza
14008	1950-1996	47	29	22	26	4	1.43	-1.9	1.96	No se rechaza
16014	1941-1998	58	29	33	32	5	-1.08	0.65	1.96	NO se rechaza
16020	1944-1990	47	26	26	27	5	-0.24	-0.24	1.96	No se rechaza
16021	1945-1998	54	33	26	30	5	1.33	-1.77	1.96	NO se rechaza
18001	1941-1977	37	21	19	21	4	0.27	-0.8	1.96	No se rechaza
18129	1940-1987	48	28	25	27	5	0.47	-0.93	1.96	No se rechaza
18232	1955-2000	46	23	26	25	4	-0.97	0.49	1.96	NO se rechaza
18236	1954-2000	47	24	25	25	4	-0.49	0	1.96	NO se rechaza
18245	1959-2001	43	25	20	23	4	1.01	-1.52	1.96	NO se rechaza
18271	1957-2001	45	23	24	24	4	-0.49	0	1.96	NO se rechaza
18459	1947-1992	46	23	27	26	4	-1.2	0.72	1.96	NO se rechaza
19003	1956-1998	43	25	22	24	4	0.49	-0.99	1.96	NO se rechaza
22008	1940-1996	57	32	27	30	5	0.89	-1.33	1.96	NO se rechaza
22017	1948-1992	45	26	24	26	4	0.24	-0.72	1.96	No se rechaza
24038	1940-1980	41	26	19	23	4	1.52	-2.02	1.96	Se rechaza
24087	1941-1976	36	20	24	23	4	-1.28	0.77	1.96	No se rechaza
24088	1940-1971	32	18	21	20	3	-1.08	0.54	1.96	No se rechaza
24181	1940-1986	47	22	27	25	4	-1.46	0.97	1.96	NO se rechaza
24192	1941-1992	52	28	30	30	5	-0.67	0.22	1.96	NO se rechaza
24195	1942-1986	45	21	25	24	4	-1.25	0.75	1.96	NO se rechaza
24198	1940-1994	55	30	27	29	5	0.45	-0.9	1.96	NO se rechaza
24226	1949-1996	48	27	24	26	4	0.48	-0.95	1.96	NO se rechaza
25009	1940-1975	36	24	23	24	4	0	-0.49	1.96	No se rechaza
25027	1952-1996	45	23	24	24	4	-0.49	0	1.96	NO se rechaza
25030	1953-1997	45	22	27	25	4	-1.46	0.97	1.96	NO se rechaza
26023	1946-2001	56	27	31	30	5	-1.12	0.67	1.96	NO se rechaza
26032	1943-1981	39	26	22	25	4	0.73	-1.22	1.96	No se rechaza



Instituto Mexicano de
Tecnología del Agua

Tendencias climáticas de fenómenos
hidrometeorológicos extremos en México
durante los últimos 40 años



SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES

Tabla A.4 Continuación

Clave	Periodo	n	N-	N+	Mx	Dx	t-	t+	ta	Decisión
26034	1940-1995	56	31	28	30	5	0.44	-0.89	1.96	NO se rechaza
26040	1940-1983	44	27	19	24	4	1.75	-2.25	1.96	Se rechaza
26042	1940-1997	58	32	29	31	5	0.44	-0.87	1.96	NO se rechaza
26053	1953-1993	41	24	25	25	4	-0.49	0	1.96	NO se rechaza
26070	1940-1998	59	32	28	31	5	0.66	-1.1	1.96	NO se rechaza
26118	1940-1985	46	25	22	24	4	0.49	-0.99	1.96	NO se rechaza
26133	1940-1989	50	25	27	27	5	-0.71	0.24	1.96	NO se rechaza
26149	1943-1995	53	30	26	29	5	0.68	-1.14	1.96	NO se rechaza
26191	1945-1993	49	25	26	26	4	-0.48	0	1.96	NO se rechaza
26218	1950-2000	51	27	27	28	5	-0.23	-0.23	1.96	NO se rechaza
26241	1954-1998	45	24	26	26	4	-0.72	0.24	1.96	NO se rechaza
26243	1954-2001	48	24	26	26	4	-0.72	0.24	1.96	NO se rechaza
26248	1955-2001	47	25	24	25	4	0	-0.49	1.96	NO se rechaza
26249	1955-2002	48	25	24	25	4	0	-0.49	1.96	NO se rechaza
26255	1957-2000	44	24	23	24	4	0	-0.49	1.96	NO se rechaza
26263	1959-2002	44	22	23	23	4	-0.51	0	1.96	No se rechaza
26267	1959-2002	44	22	23	23	4	-0.51	0	1.96	NO se rechaza
26268	1959-2002	44	24	21	23	4	0.51	-1.01	1.96	NO se rechaza
26270	1960-2002	43	21	23	23	4	-0.77	0.26	1.96	NO se rechaza
26272	1954-2000	47	25	25	26	4	-0.24	-0.24	1.96	NO se rechaza
26277	1960-2000	41	20	23	22	4	-1.03	0.52	1.96	NO se rechaza
26282	1961-2000	40	25	17	22	4	1.83	-2.35	1.96	Se rechaza
26285	1961-2001	41	21	22	22	4	-0.52	0	1.96	NO se rechaza
26286	1961-1998	38	22	19	21	4	0.53	-1.06	1.96	NO se rechaza
26289	1961-2001	41	20	23	22	4	-1.03	0.52	1.96	NO se rechaza
26293	1961-2001	41	20	22	22	4	-0.78	0.26	1.96	NO se rechaza
26296	1961-2002	42	18	25	22	4	-2.07	1.55	1.96	Se rechaza
26388	1961-1999	39	22	20	22	4	0.26	-0.78	1.96	NO se rechaza
26389	1958-1999	42	25	20	23	4	1.01	-1.52	1.96	NO se rechaza
27001	1953-2001	49	25	26	26	4	-0.48	0	1.96	NO se rechaza
27002	1953-2002	50	24	27	26	4	-0.95	0.48	1.96	NO se rechaza
27005	1960-1999	40	21	22	22	4	-0.52	0	1.96	NO se rechaza
28003	1951-2002	52	27	26	27	5	0	-0.47	1.96	NO se rechaza
28013	1948-2002	55	24	32	29	5	-2.05	1.59	1.96	Se rechaza
28016	1948-1987	40	21	20	21	4	0	-0.53	1.96	NO se rechaza
28030	1951-2002	52	27	26	27	5	0	-0.47	1.96	NO se rechaza



Instituto Mexicano de
Tecnología del Agua

Tendencias climáticas de fenómenos
hidrometeorológicos extremos en México
durante los últimos 40 años



SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES

Tabla A.4 Continuación

Clave	Periodo	n	N-	N+	Mx	Dx	t-	t+	ta	Decisión
28040	1952-2001	50	23	29	27	5	-1.65	1.18	1.96	NO se rechaza
28069	1955-1997	43	27	20	24	4	1.48	-1.98	1.96	No se rechaza
28108	1962-2002	41	23	19	22	4	0.78	-1.31	1.96	NO se rechaza
28111	1964-2002	39	20	20	21	4	-0.27	-0.27	1.96	NO se rechaza
29005	1954-1992	39	25	21	24	4	0.75	-1.25	1.96	NO se rechaza
30005	1947-1991	45	21	28	25	4	-1.94	1.46	1.96	No se rechaza
30015	1948-1994	47	26	27	27	5	-0.47	0	1.96	NO se rechaza
30016	1948-2000	53	29	26	28	5	0.46	-0.92	1.96	NO se rechaza
30019	1949-1994	46	25	25	26	4	-0.24	-0.24	1.96	NO se rechaza
30020	1952-1999	48	27	25	27	5	0.24	-0.71	1.96	NO se rechaza
30031	1951-1990	40	18	24	22	4	-1.83	1.31	1.96	NO se rechaza
30032	1951-1995	45	28	22	26	4	1.2	-1.68	1.96	NO se rechaza
30041	1954-1997	44	25	23	25	4	0.24	-0.73	1.96	NO se rechaza
30042	1954-1995	42	26	20	24	4	1.25	-1.75	1.96	NO se rechaza
30062	1958-1998	41	21	24	23	4	-1.01	0.51	1.96	NO se rechaza
30088	1953-1994	42	22	23	23	4	-0.51	0	1.96	NO se rechaza
30138	1970-1981	12	5	8	7	1	-1.79	0.89	1.96	No se rechaza
34008	1952-1998	47	25	27	27	5	-0.71	0.24	1.96	NO se rechaza
36039	1942-1996	55	28	31	30	5	-0.89	0.44	1.96	No se rechaza
36044	1947-1999	53	29	28	29	5	0	-0.45	1.96	NO se rechaza
36049	1949-1988	40	22	17	20	3	1.08	-1.62	1.96	No se rechaza
36056	1962-2000	39	19	22	21	4	-1.06	0.53	1.96	No se rechaza
37012	1953-1997	45	25	22	24	4	0.49	-0.99	1.96	No se rechaza

Tabla A.5 Criterio de aleatoriedad al interior de la serie por extremos, al 95% de significancia estadística.

Clave	Periodo	n	N-	N+	Ni	Mi	Di	ti	ta	Decisión
9003	1958-1996	43	13	13	26	29	7	0.99	1.96	No se rechaza
9004	1966-1998	35	12	12	24	23	6	0.27	1.96	No se rechaza
9011	1940-1994	58	18	18	36	39	10	0.84	1.96	No se rechaza
9017	1942-1992	70	19	22	21	4	-1.06	0.53	1.96	No se rechaza
9067	1961-1996	40	13	14	27	27	7	0.13	1.96	No se rechaza
9080	1958-1991	39	12	12	24	26	7	0.78	1.96	No se rechaza
10018	1940-1989	51	13	12	25	34	9	3.04	1.96	Se rechaza
10027	1940-1989	54	19	20	39	36	9	0.98	1.96	No se rechaza
10033	1940-1987	49	15	15	30	33	8	0.92	1.96	No se rechaza
10036	1942-1993	57	15	15	30	38	10	2.55	1.96	Se rechaza
10037	1942-1992	53	16	15	31	35	9	1.44	1.96	No se rechaza
10040	1944-1995	55	15	15	30	37	9	2.17	1.96	Se rechaza
10064	1953-1997	47	15	14	29	31	8	0.82	1.96	No se rechaza
10065	1953-1997	70	25	22	24	4	0.49	-0.99	1.96	No se rechaza
10070	1955-1997	46	16	17	33	31	8	0.83	1.96	No se rechaza
10079	1960-1999	58	20	20	40	39	10	0.42	1.96	No se rechaza
11008	1943-1987	47	17	15	32	31	8	0.24	1.96	No se rechaza
11012	1944-1986	46	14	15	29	31	8	0.59	1.96	No se rechaza
11014	1946-2002	57	18	19	37	38	10	0.32	1.96	No se rechaza
11016	1948-1998	55	18	19	37	37	9	0.11	1.96	No se rechaza
11058	1956-1997	45	13	14	27	30	8	1.08	1.96	No se rechaza
12104	1940-1965	48	13	14	27	32	8	1.74	1.96	No se rechaza
12128	1940-1995	57	12	14	26	38	10	3.83	1.96	Se rechaza
12209	1940-1992	57	18	19	37	38	10	0.32	1.96	No se rechaza
12221	1940-1985	48	15	14	29	32	8	1.05	1.96	No se rechaza
12233	1940-1991	55	17	18	35	37	9	0.54	1.96	No se rechaza
12310	1940-1996	58	21	21	42	39	10	1.05	1.96	No se rechaza
12347	1940-1985	47	15	15	30	31	8	0.47	1.96	No se rechaza
12352	1940-1995	57	18	19	37	38	10	0.32	1.96	No se rechaza
12374	1943-1991	53	18	18	36	35	9	0.22	1.96	No se rechaza
12375	1943-1986	46	15	16	31	31	8	0.12	1.96	No se rechaza
12379	1943-1996	57	16	18	34	38	10	1.28	1.96	No se rechaza
12396	1944-1987	46	14	15	29	31	8	0.59	1.96	No se rechaza
12428	1948-2002	57	18	17	35	38	10	0.96	1.96	No se rechaza
12438	1949-1994	50	15	16	31	33	9	0.8	1.96	No se rechaza
12441	1949-1996	51	16	16	32	34	9	0.68	1.96	No se rechaza

Tabla A.5 Continuación

Clave	Periodo	n	N-	N+	Ni	Mi	Di	ti	ta	Decisión
12454	1955-2002	50	13	13	26	33	9	2.51	1.96	Se rechaza
12469	1952-1998	50	16	16	32	33	9	0.46	1.96	No se rechaza
12484	1955-1997	48	13	15	28	32	8	1.4	1.96	No se rechaza
12496	1956-2001	50	16	17	33	33	9	0.11	1.96	No se rechaza
12504	1948-1997	52	15	15	30	35	9	1.56	1.96	No se rechaza
12514	1949-1999	53	16	16	32	35	9	1.1	1.96	No se rechaza
12663	1950-1998	47	11	13	24	31	8	2.59	1.96	Se rechaza
13001	1950-1997	53	16	17	33	35	9	0.77	1.96	No se rechaza
14008	1950-1996	46	15	16	31	31	8	0.12	1.96	No se rechaza
16014	1941-1998	62	18	19	37	41	11	1.32	1.96	No se rechaza
16020	1944-1990	46	13	14	27	31	8	1.31	1.96	No se rechaza
16021	1945-1998	60	16	16	32	40	10	2.49	1.96	Se rechaza
18001	1941-1977	42	13	17	30	28	7	0.75	1.96	No se rechaza
18129	1940-1987	41	12	15	27	27	7	0.13	1.96	No se rechaza
18232	1955-2000	50	16	15	31	33	9	0.8	1.96	No se rechaza
18236	1954-2000	49	16	17	33	33	8	0.12	1.96	No se rechaza
18245	1959-2001	46	14	14	28	31	8	0.95	1.96	No se rechaza
18271	1957-2001	48	16	16	32	32	8	0	1.96	No se rechaza
18459	1947-1992	50	16	18	34	33	9	0.23	1.96	No se rechaza
19003	1956-1998	48	14	15	29	32	8	1.05	1.96	No se rechaza
22008	1940-1996	59	16	17	33	39	10	1.99	1.96	Se rechaza
22017	1948-1992	37	10	11	21	25	6	1.47	1.96	No se rechaza
24038	1940-1980	43	12	14	26	29	7	0.99	1.96	No se rechaza
24087	1941-1976	37	9	9	18	25	6	2.67	1.96	Se rechaza
24088	1940-1971	51	17	18	35	34	9	0.34	1.96	No se rechaza
24181	1940-1986	48	17	16	33	32	8	0.35	1.96	No se rechaza
24192	1941-1992	58	18	17	35	39	10	1.16	1.96	No se rechaza
24195	1942-1986	47	16	16	32	31	8	0.24	1.96	No se rechaza
24198	1940-1994	58	18	18	36	39	10	0.84	1.96	No se rechaza
24226	1949-1996	51	15	16	31	34	9	1.01	1.96	No se rechaza
25009	1940-1975	51	17	17	34	34	9	0	1.96	No se rechaza
25027	1952-1996	47	16	17	33	31	8	0.59	1.96	No se rechaza
25030	1953-1997	49	15	17	32	33	8	0.23	1.96	No se rechaza
26023	1946-2001	59	18	18	36	39	10	1.05	1.96	No se rechaza
26032	1943-1981	50	16	15	31	33	9	0.8	1.96	No se rechaza
26034	1940-1995	58	19	19	38	39	10	0.21	1.96	No se rechaza



Instituto Mexicano de
Tecnología del Agua

Tendencias climáticas de fenómenos
hidrometeorológicos extremos en México
durante los últimos 40 años



SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES

Tabla A.5 Continuación

Clave	Periodo	n	N-	N+	Ni	Mi	Di	ti	ta	Decisión
26040	1940-1983	47	12	12	24	31	8	2.59	1.96	Se rechaza
26042	1940-1997	62	17	17	34	41	11	2.24	1.96	Se rechaza
26053	1953-1993	50	18	18	36	33	9	0.91	1.96	No se rechaza
26070	1940-1998	61	20	20	40	41	11	0.21	1.96	No se rechaza
26118	1940-1985	47	14	12	26	31	8	1.88	1.96	No se rechaza
26133	1940-1989	51	14	16	30	34	9	1.35	1.96	No se rechaza
26149	1943-1995	55	17	18	35	37	9	0.54	1.96	No se rechaza
26191	1945-1993	52	15	15	30	35	9	1.56	1.96	No se rechaza
26218	1950-2000	55	16	17	33	37	9	1.19	1.96	No se rechaza
26241	1954-1998	51	15	15	30	34	9	1.35	1.96	No se rechaza
26243	1954-2001	51	15	15	30	34	9	1.35	1.96	No se rechaza
26248	1955-2001	50	14	14	28	33	9	1.82	1.96	No se rechaza
26249	1955-2002	50	12	12	24	33	9	3.19	1.96	Se rechaza
26255	1957-2000	48	15	16	31	32	8	0.35	1.96	No se rechaza
26263	1959-2002	51	16	16	32	34	9	0.68	1.96	No se rechaza
26267	1959-2002	46	14	15	29	31	8	0.59	1.96	No se rechaza
26268	1959-2002	46	15	15	30	31	8	0.24	1.96	No se rechaza
26270	1960-2002	45	14	15	29	30	8	0.36	1.96	No se rechaza
26272	1954-2000	51	16	16	32	34	9	0.68	1.96	No se rechaza
26277	1960-2000	43	12	12	24	29	7	1.72	1.96	No se rechaza
26282	1961-2000	43	12	12	24	29	7	1.72	1.96	No se rechaza
26285	1961-2001	44	12	13	25	29	8	1.58	1.96	No se rechaza
26286	1961-1998	41	12	13	25	27	7	0.88	1.96	No se rechaza
26289	1961-2001	44	13	13	26	29	8	1.22	1.96	No se rechaza
26293	1961-2001	43	11	11	22	29	7	2.46	1.96	Se rechaza
26296	1961-2002	44	11	12	23	29	8	2.31	1.96	Se rechaza
26388	1961-1999	42	13	14	27	28	7	0.37	1.96	No se rechaza
26389	1958-1999	45	15	14	29	30	8	0.36	1.96	No se rechaza
27001	1953-2001	52	16	17	33	35	9	0.56	1.96	No se rechaza
27002	1953-2002	52	18	19	37	35	9	0.78	1.96	No se rechaza
27005	1960-1999	43	12	13	25	29	7	1.36	1.96	No se rechaza
28003	1951-2002	54	16	16	32	36	9	1.31	1.96	No se rechaza
28013	1948-2002	57	19	20	39	38	10	0.32	1.96	No se rechaza
28016	1948-1987	42	12	13	25	28	7	1.12	1.96	No se rechaza
28030	1951-2002	54	14	15	29	36	9	2.3	1.96	Se rechaza
28040	1952-2001	53	16	16	32	35	9	1.1	1.96	No se rechaza



Instituto Mexicano de
Tecnología del Agua

Tendencias climáticas de fenómenos
hidrometeorológicos extremos en México
durante los últimos 40 años



SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES

Tabla A.5 Continuación

Clave	Periodo	n	N-	N+	Ni	Mi	Di	ti	ta	Decisión
28069	1955-1997	53	16	18	34	35	9	0.44	1.96	No se rechaza
28108	1962-2002	43	11	12	23	29	7	2.09	1.96	Se rechaza
28111	1964-2002	41	14	15	29	27	7	0.63	1.96	No se rechaza
29005	1954-1992	45	14	13	27	30	8	1.08	1.96	No se rechaza
30005	1947-1991	47	15	14	29	31	8	0.82	1.96	No se rechaza
30015	1948-1994	53	17	16	33	35	9	0.77	1.96	No se rechaza
30016	1948-2000	55	17	17	34	37	9	0.87	1.96	No se rechaza
30019	1949-1994	49	17	18	35	33	8	0.81	1.96	No se rechaza
30020	1952-1999	53	18	18	36	35	9	0.22	1.96	No se rechaza
30031	1951-1990	42	13	11	24	28	7	1.5	1.96	No se rechaza
30032	1951-1995	49	14	15	29	33	8	1.27	1.96	No se rechaza
30041	1954-1997	48	14	14	28	32	8	1.4	1.96	No se rechaza
30042	1954-1995	47	16	16	32	31	8	0.24	1.96	No se rechaza
30062	1958-1998	46	13	12	25	31	8	2.02	1.96	Se rechaza
30088	1953-1994	45	12	13	25	30	8	1.8	1.96	No se rechaza
30138	1970-1981	14	5	4	9	9	2	0.23	1.96	No se rechaza
34008	1952-1998	53	18	19	37	35	9	0.55	1.96	No se rechaza
36039	1942-1996	42	11	11	22	28	7	2.24	1.96	Se rechaza
36044	1947-1999	57	15	14	29	38	10	2.87	1.96	Se rechaza
36049	1949-1988	48	11	13	24	32	8	2.79	1.96	Se rechaza
36056	1962-2000	40	10	11	21	27	7	2.17	1.96	Se rechaza
37012	1953-1997	27	7	7	14	18	4	1.89	1.96	No se rechaza

Tabla A.6 Valor de la pendiente y su significancia estadística en el análisis de tendencias de las series de caudal medio anual por el método de mínimos cuadrados.

Clave	Periodo	n	a	std a	p-level a	Clave	Periodo	n	a	std a	p-level a
9003	1958-1996	43	0.16	0.35	0.66	12484	1955-1997	48	-0.13	0.08	0.11
9004	1966-1998	35	0.04	0.61	0.95	12496	1956-2001	50	-3.21	1.07	0.00
9011	1940-1994	58	-0.11	0.05	0.04	12504	1948-1997	52	-0.13	0.13	0.33
9017	1942-1992	70	0.08	0.03	0.02	12514	1949-1999	53	0.03	0.13	0.80
9067	1961-1996	40	0.12	0.19	0.55	12663	1950-1998	47	-0.04	0.02	0.02
9080	1958-1991	39	0.34	0.16	0.04	13001	1950-1997	53	-0.09	0.02	0.00
10018	1940-1989	51	5.90	0.57	0.00	14008	1950-1996	46	-0.11	0.06	0.06
10027	1940-1989	54	0.02	0.01	0.05	16014	1941-1998	62	-0.06	0.04	0.11
10033	1940-1987	49	-1.03	0.20	0.00	16020	1944-1990	46	-0.00	0.00	0.29
10036	1942-1993	57	0.02	0.15	0.88	16021	1945-1998	60	0.01	0.01	0.02
10037	1942-1992	53	1.53	0.47	0.00	18001	1941-1977	42	-0.11	0.01	0.00
10040	1944-1995	55	0.08	0.17	0.64	18129	1940-1987	41	0.00	0.00	0.06
10064	1953-1997	47	0.93	0.24	0.00	18232	1955-2000	50	-0.08	0.10	0.44
10065	1953-1997	70	0.93	0.24	0.00	18236	1954-2000	49	-0.07	0.02	0.00
10070	1955-1997	46	-0.04	0.09	0.64	18245	1959-2001	46	-0.04	0.02	0.03
10079	1960-1999	58	0.15	0.07	0.03	18271	1957-2001	48	0.03	0.01	0.00
11008	1943-1987	47	-0.03	0.02	0.26	18459	1947-1992	50	0.01	0.02	0.70
11012	1944-1986	46	0.66	0.32	0.04	19003	1956-1998	48	0.12	0.05	0.02
11014	1946-2002	57	0.10	0.13	0.46	22008	1940-1996	59	0.02	0.05	0.72
11016	1948-1998	55	0.04	0.23	0.87	22017	1948-1992	37	0.04	0.03	0.23
11058	1956-1997	45	-0.15	0.20	0.46	24038	1940-1980	43	0.00	0.09	0.99
12104	1940-1965	48	-0.28	0.18	0.13	24087	1941-1976	37	-0.01	0.01	0.22
12128	1940-1995	57	-0.70	0.19	0.00	24088	1940-1971	51	-0.10	0.11	0.36
12209	1940-1992	57	-0.07	0.05	0.16	24181	1940-1986	48	0.15	0.07	0.04
12221	1940-1985	48	0.01	0.01	0.38	24192	1941-1992	58	0.00	0.02	0.82
12233	1940-1991	55	-0.46	0.20	0.02	24195	1942-1986	47	0.01	0.05	0.84
12310	1940-1996	58	-0.03	0.02	0.11	24198	1940-1994	58	0.62	0.55	0.27
12347	1940-1985	47	0.02	0.01	0.03	24226	1949-1996	51	-0.17	0.12	0.17
12352	1940-1995	57	-0.32	0.13	0.02	25009	1940-1975	51	-0.37	0.15	0.02
12374	1943-1991	53	0.01	0.01	0.23	25027	1952-1996	47	0.01	0.02	0.67
12375	1943-1986	46	-0.46	0.08	0.00	25030	1953-1997	49	0.34	0.33	0.31
12379	1943-1996	57	-0.00	0.00	0.85	26023	1946-2001	59	0.05	0.03	0.04
12396	1944-1987	46	0.05	0.01	0.00	26032	1943-1981	50	0.08	0.01	0.00
12428	1948-2002	57	0.04	0.11	0.73	26034	1940-1995	58	-0.02	0.01	0.01
12438	1949-1994	50	-0.62	0.54	0.26	26040	1940-1983	47	-0.07	0.04	0.05
12441	1949-1996	51	-0.07	0.05	0.22	26042	1940-1997	62	-0.01	0.03	0.71

Tabla A.6 Continuación

Clave	Periodo	n	a	std a	p-level a	Clave	Periodo	n	a	std a	p-level a
12454	1955-2002	50	0.00	0.04	0.95	26053	1953-1993	50	0.03	0.00	0.00
12469	1952-1998	50	-0.01	0.02	0.76	26070	1940-1998	61	-0.01	0.01	0.38
26118	1940-1985	47	0.31	0.02	0.00	28003	1951-2002	54	-0.15	0.13	0.24
26133	1940-1989	51	0.01	0.01	0.54	28013	1948-2002	57	0.51	0.29	0.08
26149	1943-1995	55	0.02	0.07	0.79	28016	1948-1987	42	0.79	0.66	0.24
26191	1945-1993	52	0.39	0.08	0.00	28030	1951-2002	54	0.05	0.03	0.13
26218	1950-2000	55	0.08	0.04	0.09	28040	1952-2001	53	-0.02	0.06	0.68
26241	1954-1998	51	-0.04	0.06	0.51	28069	1955-1997	53	0.58	0.27	0.04
26243	1954-2001	51	-0.24	0.16	0.14	28108	1962-2002	43	-0.01	0.08	0.87
26248	1955-2001	50	-0.79	0.43	0.07	28111	1964-2002	41	0.03	0.03	0.21
26249	1955-2002	50	-0.50	0.34	0.15	29005	1954-1992	45	0.47	1.26	0.71
26255	1957-2000	48	-1.95	1.96	0.33	30005	1947-1991	47	0.27	1.00	0.79
26263	1959-2002	51	-0.10	0.22	0.64	30015	1948-1994	53	-0.46	1.54	0.77
26267	1959-2002	46	0.05	0.19	0.77	30016	1948-2000	55	0.92	0.30	0.00
26268	1959-2002	46	-0.26	0.27	0.34	30019	1949-1994	49	9.60	3.26	0.00
26270	1960-2002	45	0.22	0.25	0.39	30020	1952-1999	53	-0.09	0.06	0.13
26272	1954-2000	51	-0.97	0.84	0.26	30031	1951-1990	42	-0.01	0.04	0.87
26277	1960-2000	43	0.05	0.17	0.78	30032	1951-1995	49	-0.31	0.08	0.00
26282	1961-2000	43	0.01	0.01	0.11	30041	1954-1997	48	-0.25	0.07	0.00
26285	1961-2001	44	-0.12	0.14	0.43	30042	1954-1995	47	-0.32	0.38	0.41
26286	1961-1998	41	-0.01	0.08	0.86	30062	1958-1998	46	0.78	1.29	0.55
26289	1961-2001	44	0.18	0.20	0.38	30088	1953-1994	45	-0.12	0.42	0.78
26293	1961-2001	43	0.24	0.28	0.39	30138	1970-1981	14	0.53	0.30	0.11
26296	1961-2002	44	0.00	0.14	0.99	34008	1952-1998	53	0.06	0.03	0.06
26388	1961-1999	42	-0.01	0.08	0.89	36039	1942-1996	42	0.37	0.26	0.29
26389	1958-1999	45	-0.11	0.04	0.02	36044	1947-1999	57	0.08	0.14	0.60
27001	1953-2001	52	-0.02	0.09	0.86	36049	1949-1988	48	-0.01	0.01	0.46
27002	1953-2002	52	0.17	0.13	0.21	36056	1962-2000	40	0.07	0.14	0.61
27005	1960-1999	43	-0.10	0.06	0.12	37012	1953-1997	27	1.85	0.77	0.07

Nota: a=pendiente; std=error estándar; p-level=nivel de significancia estadística.

Tabla A.7 Resultados del análisis de homogeneidad por los criterios de Student y de Fisher (alfa = 0.05), y del análisis de tendencias después de ajustar una línea de regresión a la serie por el método de mínimos cuadrados. Aquí se muestran solo 41 series cuya pendiente ajustada es estadísticamente significativa ($P \leq 95\%$).

Clave	Periodo	n	Yr	Criterio de Student, P=95%					Criterio de Fisher, P=95%					Pendiente ajustada		
				Xavg1	Xavg2	tx	ta	Decisión	STD1	STD2	Fx	Fa	Decisión	a	std a	p-level a
12128	1940-1995	56	1968	24.3	19.6	0.69	2.01	NSR	23.9	27.4	1.31	1.92	NSR	-0.70	0.19	0.00
12233	1940-1991	52	1966	35.5	33.4	0.26	2.01	NSR	27.6	30	1.18	1.96	NSR	-0.46	0.20	0.02
30032	1951-1995	45	1973	43.4	39.4	1.57	2.02	NSR	7.96	9.07	1.3	2.08	NSR	-0.31	0.08	0.00
18245	1959-2001	43	1980	6.07	5.32	1.51	2.02	NSR	1.55	1.71	1.22	2.12	NSR	-0.04	0.02	0.03
26034	1940-1995	56	1968	1.5	1.26	0.79	2.01	NSR	1.19	1.09	1.18	1.92	NSR	-0.02	0.01	0.01
16021	1945-1998	54	1972	1.69	1.83	0.76	2.01	NSR	0.66	0.7	1.15	1.94	NSR	0.01	0.01	0.02
26023	1946-2001	56	1974	12.3	13.1	0.94	2.01	NSR	3.2	3.33	1.08	1.92	NSR	0.05	0.03	0.04
9011	1940-1994	55	1967	15.9	13.9	1.06	2.01	NSR	8.65	5.16	2.81	1.94	SR	-0.11	0.05	0.04
26040	1940-1983	44	1962	6.29	4.85	1.23	2.02	NSR	4.66	2.96	2.48	2.1	SR	-0.07	0.04	0.05
10027	1940-1989	50	1965	1.19	1.64	1.6	2.01	NSR	0.73	1.21	2.75	1.98	SR	0.02	0.01	0.05
24181	1940-1986	47	1963	8.77	12.5	1.77	2.01	NSR	5.63	8.4	2.22	2.04	SR	0.15	0.07	0.04
9080	1958-1991	34	1975	19.5	25.9	1.78	2.04	NSR	5.38	13.8	6.53	2.36	SR	0.34	0.16	0.04
10064	1953-1997	45	1975	45.2	59	1.88	2.02	NSR	18.3	29.5	2.61	2.08	SR	0.93	0.24	0.00
25009	1940-1975	36	1958	21.4	13	6.35	2.03	SR	11.8	12	1.05	2.3	NSR	-0.37	0.15	0.02
12352	1940-1995	56	1968	22.9	14.2	2.05	2.01	SR	17.4	14	1.53	1.92	NSR	-0.32	0.13	0.02
30041	1954-1997	44	1976	19	14.4	2.19	2.02	SR	7.71	5.92	1.69	2.1	NSR	-0.25	0.07	0.00
18236	1954-2000	47	1977	5.22	3.67	2.77	2.01	SR	2.21	1.6	1.92	2.04	NSR	-0.07	0.02	0.00
12663	1950-1998	49	1974	3.66	1.81	12	2.01	SR	2.05	1.7	1.45	2.01	NSR	-0.04	0.02	0.02
12347	1940-1985	46	1963	2.03	2.56	2.62	2.02	SR	0.76	0.59	1.65	2.06	NSR	0.02	0.01	0.03
26053	1953-1993	41	1973	0.8	1.5	6.03	2.02	SR	0.31	0.42	1.82	2.16	NSR	0.03	0.00	0.00
26032	1943-1981	39	1962	2.47	4.85	18	2.03	SR	1.02	1.52	2.21	2.21	NSR	0.08	0.01	0.00
26191	1945-1993	49	1969	10.8	21.5	4.44	2.01	SR	8.04	8.88	1.22	2	NSR	0.39	0.08	0.00
11012	1944-1986	43	1965	77.7	104	2.77	2.02	SR	28.8	32.7	1.29	2.12	NSR	0.66	0.32	0.04
10037	1942-1992	51	1967	115	156	2.97	2.01	SR	51.8	48.7	1.13	1.98	NSR	1.53	0.47	0.00
30019	1949-1994	46	1972	1772	1987	2.13	2.02	SR	370	312	1.41	2.06	NSR	9.60	3.26	0.00
12496	1956-2001	46	1979	279	162	4.51	2.02	SR	106	66.4	2.52	2.06	SR	-3.21	1.07	0.00
10033	1940-1987	48	1964	54.5	28	4.31	2.01	SR	25.1	16.4	2.34	2.02	SR	-1.03	0.20	0.00
12375	1943-1986	44	1965	16	0.48	6.65	2.02	SR	10.9	0.18	3743	2.1	SR	-0.46	0.08	0.00
18001	1941-1977	37	1959	4.91	2.66	17.3	2.03	SR	1.66	0.28	34.6	2.29	SR	-0.11	0.01	0.00
26389	1958-1999	42	1979	7.71	4.5	3.13	2.02	SR	4.15	2.21	3.54	2.15	SR	-0.11	0.04	0.02
13001	1950-1997	48	1974	6	3.68	4.12	2.01	SR	2.42	1.34	3.27	2.02	SR	-0.09	0.02	0.00
18271	1957-2001	45	1979	2.09	2.67	3.67	2.02	SR	0.43	0.62	2.09	2.08	SR	0.03	0.01	0.00
12396	1944-1987	44	1966	6.93	8.5	4.38	2.02	SR	1.51	0.73	4.3	2.1	SR	0.05	0.01	0.00

Tabla A.7 Continuación

Clave	Periodo	n	Yr	Criterio de Student, P=95%					Criterio de Fisher, P=95%					Pendiente ajustada		
				Xavg1	Xavg2	tx	ta	Decisión	STD1	STD2	Fx	Fa	Decisión	a	std a	p-level a
9017	1942-1992	51	1967	3.17	3.77	3.15	2.01	SR	1.8	2.94	2.68	1.96	SR	0.08	0.03	0.02
19003	1956-1998	43	1977	10.6	14.1	2.62	2.02	SR	3.3	5.05	2.35	2.12	SR	0.12	0.05	0.02
10079	1960-1999	40	1980	6.02	9.92	8.68	2.02	SR	3.29	5.45	2.74	2.19	SR	0.15	0.07	0.03
26118	1940-1985	46	1963	12.5	20.2	8.56	2.02	SR	3.83	1.89	4.12	2.06	SR	0.31	0.02	0.00
28069	1955-1997	43	1976	36.6	55.7	8.68	2.02	SR	6.43	33.3	26.8	2.12	SR	0.58	0.27	0.04
30016	1948-2000	53	1974	184	213	3.05	2.01	SR	27.8	41.4	2.22	1.94	SR	0.92	0.30	0.00
10065	1953-1997	45	1975	45.2	59	6.38	2.02	SR	18.3	29.5	2.61	2.08	SR	0.93	0.24	0.00
10018	1940-1989	50	1965	160	371	6.49	2.01	SR	146	71.2	4.19	1.98	SR	5.90	0.57	0.00

Nota: n= longitud de la serie en años; Yr= año en que se dividió la serie en dos periodos; Xavg1 y Xavg2 =medias del primero y segundo período respectivamente; tx y ta=valor empírico y tabular del estadístico de Student, respectivamente; STD1 y STD2=desviación estándar del primero y segundo período respectivamente; Fx y Fa=valor empírico y tabular del estadístico de Fisher, respectivamente; a= pendiente, el signo indica incremento del caudal si es positivo o decremento si es negativo; std = error estándar; p-level= nivel de significancia estadística; NSR= No se rechaza la hipótesis de homogeneidad; SR= Se rechaza la hipótesis de homogeneidad.

Tabla A.8 Listado de estaciones hidrométricas cuyos datos de gastos medios anuales resultaron homogéneos por los criterios de Student y de Fisher (alfa = 0.05).

Clave	Periodo	n	Yr	Criterio de Student, P=95%					Criterio de Fisher, P=95%				
				Xavg1	Xavg2	tx	ta	Decisión	STD1	STD2	Fx	Fa	Decisión
10036	1942-1993	52	1968	44	45.9	0.38	2.01	NSR	19.9	16	1.55	1.96	NSR
11008	1943-1987	45	1965	3.45	3.06	0.61	2.02	NSR	1.91	2.27	1.42	2.08	NSR
11014	1946-2002	57	1974	42.4	42.1	0.054	2	NSR	15.8	16.7	1.12	1.91	NSR
11016	1948-1998	51	1973	52.8	53.8	0.14	2.01	NSR	25.2	25.8	1.05	1.96	NSR
11058	1956-1997	42	1977	31.9	31.2	0.13	2.02	NSR	15	19.3	1.64	2.15	NSR
12128	1940-1995	56	1968	24.3	19.6	0.69	2.01	NSR	23.9	27.4	1.31	1.92	NSR
12209	1940-1992	53	1966	21.4	18.6	1.31	2.01	NSR	8.88	6.58	1.82	1.96	NSR
12233	1940-1991	52	1966	35.5	33.4	0.26	2.01	NSR	27.6	30	1.18	1.96	NSR
12310	1940-1996	57	1968	10.5	10.1	0.64	2	NSR	2.55	2.04	1.57	1.92	NSR
12374	1943-1991	49	1967	4.04	4.44	1.11	2.01	NSR	1.39	1.17	1.42	2.01	NSR
12428	1948-2002	55	1975	19.6	19.9	0.093	2.01	NSR	12.3	13.7	1.23	1.93	NSR
12438	1949-1994	46	1972	105	88.6	0.96	2.02	NSR	60.6	53.9	1.26	2.06	NSR
12441	1949-1996	48	1973	10.9	8.35	1.56	2.01	NSR	6.02	5.36	1.26	2.02	NSR
12454	1955-2002	48	1979	3.32	2.12	1.13	2.01	NSR	4.23	3.06	1.91	2.02	NSR
12466	1963-2001	39	1982	1.67	1.3	0.99	2.03	NSR	1.12	1.23	1.19	2.21	NSR
12469	1952-1998	47	1975	4.06	4.19	0.26	2.01	NSR	1.95	1.47	1.77	2.04	NSR
12484	1955-1997	43	1976	13.2	9.6	1.69	2.02	NSR	7.57	6.32	1.43	2.13	NSR
12504	1948-1997	50	1973	20.9	17.9	0.72	2.01	NSR	14	15.4	1.21	1.98	NSR
12514	1949-1999	51	1974	25.9	25.3	0.15	2.01	NSR	14.8	13.8	1.14	1.98	NSR
16014	1941-1998	58	1970	15.4	13.1	1.75	2	NSR	5.58	4.47	1.56	1.91	NSR
16021	1945-1998	54	1972	1.69	1.83	0.76	2.01	NSR	0.66	0.7	1.15	1.94	NSR
18245	1959-2001	43	1980	6.07	5.32	1.51	2.02	NSR	1.55	1.71	1.22	2.12	NSR
22008	1940-1996	57	1968	11.5	12.2	0.35	2	NSR	6.18	8.22	1.77	1.91	NSR
22035	1963-2002	40	1983	34.8	34.7	0.014	2.02	NSR	19.1	15.1	1.59	2.19	NSR
24038	1940-1980	41	1960	6.35	7.76	0.36	2.02	NSR	14.2	10.6	1.81	2.18	NSR
24195	1942-1986	45	1964	4.78	5.58	0.65	2.02	NSR	3.85	4.38	1.29	2.08	NSR
24226	1949-1996	48	1973	19.9	18.9	0.28	2.01	NSR	13.2	12.6	1.1	2.02	NSR
25027	1952-1996	45	1974	2.6	2.53	0.12	2.02	NSR	2.06	1.62	1.6	2.09	NSR
26023	1946-2001	56	1974	12.3	13.1	0.94	2.01	NSR	3.2	3.33	1.08	1.92	NSR
26034	1940-1995	56	1968	1.5	1.26	0.79	2.01	NSR	1.19	1.09	1.18	1.92	NSR
26042	1940-1997	58	1969	5.63	5.27	0.35	2	NSR	4.39	3.42	1.65	1.91	NSR
26070	1940-1998	59	1969	3.8	3.7	0.23	2	NSR	1.76	1.36	1.68	1.9	NSR
26133	1940-1989	50	1965	2.1	2.66	1.96	2.01	NSR	0.97	1.02	1.1	1.98	NSR
26149	1943-1995	53	1969	11.5	13.9	0.93	2.01	NSR	8.75	9.83	1.26	1.94	NSR

Tabla A.8 Continuación

Clave	Periodo	n	Yr	Criterio de Student, P=95%					Criterio de Fisher, P=95%				
				Xavg1	Xavg2	tx	ta	Decisión	STD1	STD2	Fx	Fa	Decisión
26218	1950-2000	51	1975	11.5	12.9	1.07	2.01	NSR	5.18	4.49	1.33	1.98	NSR
26241	1954-1998	45	1976	30.1	28.5	0.92	2.02	NSR	5.46	6.02	1.21	2.08	NSR
26243	1954-2001	48	1978	45	39.2	1.25	2.01	NSR	17	14.8	1.31	2.02	NSR
26248	1955-2001	47	1978	95.6	77.7	1.5	2.01	NSR	45.6	35.8	1.62	2.04	NSR
26255	1957-2000	44	1979	436	345	1.82	2.02	NSR	166	167	1.02	2.1	NSR
26267	1959-2002	44	1981	35.8	35.5	0.068	2.02	NSR	14.5	16.6	1.31	2.1	NSR
26268	1959-2002	44	1981	46	36	1.47	2.02	NSR	24.5	20.6	1.4	2.1	NSR
26270	1960-2002	43	1981	51	51.8	0.12	2.02	NSR	21.9	18.9	1.34	2.13	NSR
26272	1954-2000	47	1977	188	146	1.8	2.01	NSR	80.2	79.6	1.01	2.04	NSR
26277	1960-2000	41	1980	30.6	31	0.079	2.02	NSR	10.7	15.4	2.07	2.16	NSR
26280	1961-1998	38	1980	7.87	7.32	0.3	2.03	NSR	6.04	5.51	1.2	2.25	NSR
26285	1961-2001	41	1981	27.9	24.6	0.94	2.02	NSR	10.3	11.8	1.32	2.16	NSR
26286	1961-1998	38	1980	12.5	11.7	0.42	2.03	NSR	5.3	6.5	1.5	2.25	NSR
26293	1961-2001	41	1981	47.8	53.6	0.87	2.02	NSR	18.9	23.1	1.5	2.16	NSR
26296	1961-2002	42	1982	32	31.6	0.13	2.02	NSR	12.7	9.88	1.64	2.15	NSR
26388	1961-1999	39	1980	17	15.4	0.83	2.03	NSR	6.84	5.57	1.51	2.23	NSR
27001	1953-2001	49	1977	54.7	54.4	0.1	2.01	NSR	8.11	10.4	1.65	2	NSR
27002	1953-2002	50	1978	43.3	47.8	1.2	2.01	NSR	13.8	12.9	1.14	1.98	NSR
28003	1951-2002	52	1977	58.8	53.7	1.3	2.01	NSR	15.1	12.8	1.38	1.96	NSR
28013	1948-2002	55	1975	183	201	1.97	2.01	NSR	35.6	31.2	1.3	1.94	NSR
28016	1948-1987	40	1968	181	208	1.84	2.02	NSR	44.7	49.1	1.21	2.19	NSR
28030	1951-2002	52	1977	16.8	18.2	1.38	2.01	NSR	3.94	3.38	1.36	1.96	NSR
28040	1952-2001	50	1977	18.4	17.6	0.43	2.01	NSR	6.44	5.94	1.17	1.98	NSR
28108	1962-2002	41	1982	15.8	14.4	0.74	2.02	NSR	6.12	5.74	1.14	2.18	NSR
28111	1964-2002	39	1983	4.36	4.85	0.84	2.03	NSR	1.79	1.8	1.01	2.21	NSR
30015	1948-1994	47	1971	705	639	1.46	2.01	NSR	175	131	1.77	2.04	NSR
30020	1952-1999	48	1976	17.6	15.1	1.48	2.01	NSR	6.38	5.12	1.55	2.02	NSR
30031	1951-1990	40	1971	17.6	17.3	0.23	2.02	NSR	3.78	3.47	1.19	2.19	NSR
30032	1951-1995	45	1973	43.4	39.4	1.57	2.02	NSR	7.96	9.07	1.3	2.08	NSR
30088	1953-1994	42	1974	72.9	78.6	0.53	2.02	NSR	30.7	38.8	1.6	2.15	NSR
36044	1947-1999	53	1973	29.3	32.6	0.7	2.01	NSR	16.7	17.7	1.13	1.94	NSR

7 FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS QUE HAN OBTENIDO EL GRADO CON PRESUPUESTO DEL PROYECTO HASTA LA FECHA DE ENTREGA DE ESTE INFORME (INDICAR NOMBRE, NÚMERO DEL ESTUDIANTE Y NIVEL)

Nombre:	Juan Carlos Ramos Soto
Número del estudiante:	S0006-06-01-48492-02-039
Nivel:	Maestría.
Tesis:	“Climatología de Frentes Fríos”.
Institución:	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
Director interno:	Dr. Martín José Montero Martínez, IMTA.
Fecha probable de graduación:	Febrero de 2010.
Nombre:	Maura González Robles
Número del estudiante:	S0006-06-01-48492-01-043
Nivel:	Licenciatura.
Tesis:	“Climatología de Frentes Fríos”.
Institución:	Universidad Veracruzana.
Director interno:	Dr. Juan Cervantes Pérez, UV.
Director externo:	Dr. José Antonio Salinas Prieto, IMTA.
Fecha de graduación:	9 de Julio de 2009.
Nombre:	Carmina Lourdes Yocupicio Murillo
Número del estudiante:	N/A
Nivel:	Licenciatura.
Tesis:	“Situación actual de la disponibilidad de recursos hídricos en la zona de los altos, Sinaloa”.
Institución:	Universidad de la Sierra.
Director externo:	Dr. Luis Brito Castillo, CIBNOR SC.
Fecha de graduación:	12 de Febrero de 2009.
Nombre:	Fernando García Paez
Número del estudiante:	N/A
Nivel:	Doctorado.
Tesis:	“Variabilidad de la precipitación y pronósticos de escurrimientos en la región Pacífico Norte y Cuenca del río Yaqui”.
Institución:	Instituto Tecnológico de Sonora.
Director interno:	Dr. Roberto Isidro Cruz Medina, ITSON.



Instituto Mexicano de
Tecnología del Agua

Director externo:

Fecha de graduación:

Tendencias climáticas de fenómenos
hidrometeorológicos extremos en México
durante los últimos 40 años

SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES

Dr. Luis Brito Castillo, CIBNOR SC.
26 de Junio de 2009.

