



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

ANÁLISIS REGIONAL DE EVENTOS EXTREMOS DE TEMPERATURA EN MÉXICO Y
SUS POSIBLES VARIACIONES EN EL CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTORA EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(FÍSICA DE LA ATMÓSFERA)

PRESENTA:

FANNY LÓPEZ DÍAZ

TUTOR:

DRA. ANA CECILIA CONDE ÁLVAREZ
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:

DR. CARLOS GAY GARCÍA (CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM)
DRA. GRACIELA BINIMELIS DE RAGA (CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM)
DRA. OLGA CLORINDA PENALBA (POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA)
DR. JESÚS EFREN OSPINA NOREÑA (POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA)

MEXICO, D.F. OCTUBRE 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

A mi familia por el apoyo incondicional que me ha brindado durante todo este tiempo. Porque cada uno de ellos es admirable, y cuyo ejemplo me ha inspirado a seguir adelante.

A la Dra. Ana Cecilia Conde Álvarez por haber sido mi tutora, por darme su confianza y apoyarme en todo momento. Porque siempre tuvo un espacio para responder mis dudas, por todas sus sugerencias durante el desarrollo de esta tesis.

A la Dra. Graciela Binimelis de Raga, a la Dra. Olga Clorinda Penalba, al Dr. Carlos Gay García, y al Dr. Jesús Efreñ Ospina Noreña, por haber aceptado ser mis sinodales y darse tiempo para revisar esta tesis. Por sus observaciones y sugerencia, las cuales fueron valiosas para mejorar este trabajo de investigación.

Al Dr. Adalberto Tejeda y al Dr. Benjamín Martínez por haber sido parte de mi comité tutorial.

Al M. en C. Oscar Sánchez Meneses por ayudarme y darme sugerencias para la tesis.

Al programa de Posgrado de Ciencias de la Tierra con sede en el Centro de Ciencias de la Atmósfera, por el apoyo brindado.

Al CONACyT por la beca completa que me otorgó durante los tres años de este posgrado y un año más de prórroga.

Índice

	Pág.
Índice de Figuras	5
Índice de Tablas	8
Resumen	10
Abstract	12
1. Introducción	
1.1. Climatología de México.....	14
1.1.2. Estudios Regionales en México.....	15
1.2. Eventos Extremos de Temperatura.....	20
1.2.1. Análisis de Eventos Extremos.....	20
1.2.2. Cambios Observados en Eventos Extremos.....	21
1.3. Modelos Climáticos Globales y Escenarios Futuros.....	24
1.3.1. Proyecciones de Eventos Extremos.....	26
1.4. Objetivo.....	28
1.5. Estructura de Tesis.....	28
2 Metodología	
2.1. Datos.....	29
2.1.1. Control de Calidad de Datos.....	30
2.1.2. Homogeneidad de Series de Datos.....	30
2.2. Regionalización.....	33
2.2.1. Método de <i>Cluster</i>	34
2.3. Modelo de Regresión Lineal.....	37
2.4. Índices de Eventos Climáticos Extremos.....	39
2.5. Proyecciones: Promedios Mensuales y de Eventos Climáticos Extremos.....	43
2.5.1. Escenarios de Cambio Climático.....	43
2.5.2. Selección de Modelos.....	44
2.5.3. Metodología a Seguir con Cambio Climático	45
3 Resultados de Tendencias Observadas de Temperatura y Eventos Climáticos Extremos	
3.1. Grupos de Estaciones.....	47

3.2. Climatología: 18 Grupos.....	55
3.3. Tendencias de Temperaturas Observadas en México.....	60
3.3.1. Tendencias de Series Anuales.....	61
3.3.2. Tendencias de Series Mensuales.....	66
3.4. Tendencias de Eventos Climáticos Extremos de Temperatura Observados en México.....	71
4 Resultados en Proyecciones de Temperatura Mensual y Eventos Climáticos Extremos.....	
4.1. Temperatura Mensual.....	85
4.1.1. Comparación entre Climatologías: Lo Observado vs Histórico del Modelo.....	85
4.1.2. Proyecciones Mensuales para Tmax y Tmin.....	90
4.2. Eventos Climáticos Extremos con Cambio Climático.....	101
4.2.1. Comparación entre Índices Observados e Históricos.....	101
4.2.2. Proyección en Índices de Eventos Climáticos Extremos.....	103
4.3. Posibles Impactos por Cambios en Temperatura.....	115
5 Discusión y Conclusiones.....	
5.1 Discusión de Resultados.....	118
5.2 Conclusiones.....	124
Apéndice 1.....	128
Apéndice 2.....	135
Bibliografía.....	137

Índice de Figuras

	Pág.
Figura 1.1.1. Las 18 Regiones de Douglas para México. Las marcas (+) indican la latitud y longitud promedio. Fuente: Conde, 2003.....	16
Figura 1.1.2. a) Localización de las 130 estaciones con datos de lluvia mensuales, b) mapa de las 5 regiones para precipitación en México, c) localización de las 103 estaciones para datos de temperatura, d) mapa de las 4 regiones delimitadas para temperatura en México. Fuente: Englehart & Douglas (2002 y 2004).....	17
Figura 1.1.3. Del lado izquierdo el mapa de la regionalización de temperatura media por el método de componentes principales, realizada por Salas-Flores <i>et al.</i> (2011). Del lado derecho la regionalización basada en precipitación hecha por Salas, 2008.....	18
Figura 1.2.1. Distribución de probabilidad para temperatura. Se muestra los posibles cambios en los eventos extremos (colas de la distribución): media, variabilidad y simetría. Fuente: IPCC, 2012.....	20
Figura 1.2.2. Tendencias de los índices de noches frías (TN10p), noches cálidas (TN90p) y días cálidos (TX90p). Fuente: Met Office (2011).....	22
Figura 1.3.1. Concentraciones de CO ₂ en partes por millón, usadas en CMIP3 y CMIP5, históricas y modelos. Las líneas verticales sombreadas indican el periodo de referencia (1981-2000) y los dos periodos de 20 años (2045-065 y 2081-2100) considerados en un análisis de cambio climático futuro. Fuente: Sillmann <i>et al.</i> , 2013.....	26
Figura 2.2.1. Representación de las distancias entre clusters a) mínima distancia, b) máxima distancia c) distancia promedio. (Myatt & Johnson, 2009).....	36
Figura 3.1.1. Localización de las 74 estaciones disponibles que conforman las 18 divisiones de Douglas para temperatura.....	50
Figura 3.2.1. Localización de estaciones seleccionadas en cada uno de los 18 grupos para México.....	55
Figura 3.2.2. Temperatura máxima promedio 1961-1990 de cada uno de los 18 grupos para México.....	57
Figura 3.2.3. Temperatura mínima promedio 1961-1990 de cada uno de los 18 grupos para México.....	58
Figura 3.3.1. Mapa que ilustra el comportamiento de las tendencias anuales de Tmax para los 18 grupos. Nivel de confianza del 95%.....	62
Figura 3.3.2. Mapa que ilustra el comportamiento de las tendencias anuales de Tmin para los 18 grupos. Nivel de confianza del 95%.....	62
Figura 3.3.3. Distribución de 18 grupos para México, se muestra el lugar donde se localiza la estación seleccionada en cada uno de estos.....	66
Figura 3.3.4. Gráfica de valores de tendencias significativas de Tmax para los meses de enero, abril, julio y octubre para los 18 grupos en México.....	67

Figura 3.3.5. Gráfica de valores de tendencias significativas de T _{min} para los meses de enero, abril, julio y octubre para los 18 grupos en México.....	69
Figura 3.4.1. Comportamiento de las tendencias anuales del índice de días cálidos (DC) para los 18 grupos en México. DC _{n1} muestra el umbral de T _{max} para los días cálidos en cada grupo y debajo de éste el valor de la tendencia significativa, con un nivel de confianza del 95%. El sentido de los triángulos arriba/abajo indica tendencias de incremento/decremento y el tamaño ilustra su magnitud. NS expresa que no hubo cambios significativos en ese grupo.	72
Figura 3.4.2. Gráfica de valores de coeficiente de tendencia significativa en orden descendente, para días cálidos en los 18 grupos de México. Los valores positivos indican incrementos, mientras que los negativos son de decremento.....	73
Figura 3.4.3. Comportamiento de las tendencias anuales del índice de noches frías (NF) para los 18 grupos. NF _{n2} muestra el umbral de T _{min} para las noches frías en cada grupo y debajo de éste el valor de la tendencia significativa, con un nivel de confianza del 95%. El sentido de los triángulos arriba/abajo indica tendencias de incremento/decremento y el tamaño ilustra su magnitud. NS expresa que no hubo cambios significativos en ese grupo.....	76
Figura 3.4.4. Gráfica de valores de coeficiente de tendencia (significativa) en orden descendente, para noches frías de los 18 grupos en México. Los valores positivos indican incrementos, mientras que los negativos son de decremento.....	77
Figura 3.4.5. Comportamiento de las tendencias anuales del índice de noches cálidas para los 18 grupos. NC _{n3} muestra el umbral de T _{min} para las noches cálidas en cada grupo y debajo de éste el valor de la tendencia significativa, con un nivel de confianza del 95%. El sentido de los triángulos arriba/abajo indica tendencias de incremento/decremento y el tamaño ilustra su magnitud. NS expresa que no hubo cambios significativos en ese grupo.....	80
Figura 3.4.6. Gráfica de valores de coeficiente de tendencia (significativa) en orden descendente, para noches cálidas de los 18 grupos en México. Los valores positivos indican incrementos, mientras que los negativos son de decremento.....	81
Figura 4.1.1. Comparación entre climatologías de temperatura máxima, lo observado versus históricos de los modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR.....	87
Figura 4.1.2. Comparación entre climatologías de temperatura mínima, lo observado versus históricos de los modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR.....	88
Figura 4.1.3. Grupos seleccionados para el análisis de temperatura bajo el contexto de cambio climático.....	92
Figura 4.1.4. Gráficas de coeficiente de tendencia (°C/año) para T _{max} mensual en los grupos seleccionados, escenario RCP8.5, horizontes 2015-2039 y 2075-2099, y modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR.....	93
Figura 4.1.5. Gráficas de coeficiente de tendencia (°C/año) para T _{max} mensual en los grupos seleccionados, escenario RCP4.5, horizontes 2015-2039 y 2075-2099, y modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR.....	95
Figura 4.1.6. Gráficas de coeficiente de tendencia (°C/año) para T _{min} mensual en los grupos seleccionados, escenario RCP8.5, horizontes 2015-2039 y 2075-2099, y modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR.....	97

Figura 4.1.7. Gráficas de coeficiente de tendencia (°C/año) para Tmin mensual en los grupos seleccionados, escenario RCP4.5, horizontes 2015-2039 y 2075-2099, y modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR.....	99
Figura 4.2.1. Grupos seleccionados para el análisis de eventos climáticos extremos bajo el contexto de cambio climático.....	102
Figura 4.2.2. Histogramas de días cálidos para los grupos G3, G5 y G12, lo actual y lo proyectado con el modelo GFDL-CM3.....	104
Figura 4.2.3. Histogramas de días cálidos para los grupos G3, G5 y G15, lo actual y lo proyectado con el modelo MPI-ESM-LR.....	105
Figura 4.2.4. Histogramas de noches frías para G6, G8 y G11, lo actual y lo proyectado con el modelo GFDL-CM3.....	107
Figura 4.2.5. Histogramas de noches frías para G6, G7, G12 y G14, lo actual y lo proyectado con el modelo MPI-ESM-LR.....	108
Figura 4.2.6. Histogramas de noches cálidas para G6 y G9, observado y lo proyectado con el modelo GFDL-CM3.....	112
Figura 4.2.7. Histogramas de noches cálidas para G8 y G14, lo observado y lo proyectado con el modelo MPI-ESM-LR.....	113
Figura 4.3.1. Cantidad de eventos registrados en el inventario histórico de desastres-Desinventar para los 18 grupos analizados. Fuente: http://online.desinventar.org/	115

Índice de Tablas

	Pág.
Tabla 2.3.1. Pruebas de especificación para validar el modelo de regresión lineal.....	39
Tabla 2.4.1. Índices de temperatura definidos por el ETCCDI.....	40
Tabla 2.4.2. Índices de eventos climáticos extremos seleccionados.....	41
Tabla 2.5.1. Concentraciones representativas de los RCPs.....	44
Tabla 3.1.1. Total de estaciones identificadas en las 18 regiones de Douglas.....	48
Tabla 3.1.2. Estaciones descartadas por medio de <i>cluster</i>	51
Tabla 3.1.3. Estaciones con registros en la base de CLICom.....	52
Tabla 3.1.4. Estaciones adicionadas en algunos grupos.....	53
Tabla 3.1.5. Estaciones seleccionadas en cada grupo.....	54
Tabla 3.2.1. Temperaturas representativas para cada uno de los 18 grupos en México....	59
Tabla 3.3.1. Resumen de valores de coeficientes en el modelo de regresión lineal para Tmax anual.....	64
Tabla 3.3.2. Resumen de valores de coeficientes en el modelo de regresión lineal para Tmin anual	65
Tabla 3.4.1. Percentiles calculados para definir días cálidos, noches frías y noches cálidas para cada grupo en México.....	71
Tabla 3.4.2. Resumen de valores de los coeficientes del modelo de regresión lineal para los días cálidos.....	74
Tabla 3.4.3. Resumen de valores de los coeficientes del modelo de regresión lineal para las noches frías.....	78
Tabla 3.4.4. Resumen de valores de los coeficientes del modelo de regresión lineal para las noches cálidas.....	82
Tabla 3.4.5. Cambios detectados en los índices de eventos climáticos extremos analizados en los 18 grupos en México.....	83
Tabla 4.1.1. Meses para los cuales los modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR reproducen lo observado.....	91
Tabla 4.1.2. Tendencias ajustadas para RCP8.5 de Tmax mensual con los modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR.....	94
Tabla 4.1.3. Tendencias ajustadas para RCP4.5 de Tmax mensual con los modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR.....	96
Tabla 4.1.4. Tendencias ajustadas para RCP8.5 de Tmin mensual con los modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR.....	98

Tabla 4.1.5. Tendencias ajustadas para RCP4.5 de Tmin mensual con los modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR.....	100
Tabla 4.2.1. Grupos seleccionados para las proyecciones de eventos climáticos extremos.....	102
Tabla 4.2.2. Cambios en intervalos de número de días cálidos para el periodo de 2055-2099 con RCP4.5 y RCP8.5.....	106
Tabla 4.2.3. Cambios en intervalos de número de noches frías para el periodo de 2055-2099 con RCP4.5 y RCP8.5.....	110
Tabla 4.2.4. Cambios en intervalos de número de noches cálidas para el periodo de 2055-2099 con RCP4.5 y RCP8.5.....	114

Resumen

Las evidencias han mostrado que hay un aumento de temperatura a nivel global por causas antropogénicas y con ello un cambio en el clima. Sin embargo, la respuesta a nivel regional los cambios del clima pueden ser diferentes. Por lo tanto, el objetivo de esta tesis fue detectar, para diferentes regiones en México, cambios en temperatura máxima (Tmax) y mínima (Tmin) y en sus eventos climáticos extremos, en condiciones observadas y de cambio climático.

En este estudio se utilizó una regionalización previamente generada para México, la cual dividió al territorio en 18 regiones de temperatura. Ésta fue validada aplicando el método de *cluster*, renombrando el término región por el de grupo. En cada grupo se eligió una estación meteorológica como representativa, suponiendo que todos los sitios que conforman una región tienen el mismo comportamiento de Tmax y Tmin a través del año. Con un modelo de regresión lineal se detectaron cambios en la temperatura observada. El modelo fue validado con pruebas estadísticas de especificación. Se ajustaron tendencias para series de Tmax y Tmin anuales y mensuales (enero, abril, julio y octubre) y para eventos climáticos extremos. Estos eventos fueron caracterizados con índices definidos por umbrales: noches frías, noches cálidas y días cálidos.

Así, se determinó que no en todas las regiones de México hubo cambios en Tmax y Tmin y en los eventos climáticos extremos caracterizados. En las regiones del sur de México el incremento fue en Tmax y Tmin, mientras que en el norte del país Tmin disminuyó. Por otra parte, en la mayoría de los grupos se presentaron más cambios en las noches cálidas que en noches frías. El mayor incremento de noches frías fue en la región de Chihuahua, donde además hubo un decremento en noches cálidas y días cálidos, es decir fue el grupo con una mayor tendencia al enfriamiento.

En el contexto de cambio climático, se utilizaron los escenarios *Representative Concentration Pathways* (RCPs), RCP4.5 y RCP8.5, para los modelos de circulación general individuales GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR. Los horizontes fueron 2015-2039 y 2075-2099 para el análisis con datos mensuales y 2055-2099 para el diario. Se evaluó el desempeño de las salidas de los modelos comparando su histórico con lo observado: climatología, por mes y con índices de eventos climáticos extremos. En todos los casos se seleccionaron los grupos que fueron mejor representados por los modelos. Con los dos modelos, las tendencias mensuales tuvieron mayores incrementos para el escenario RCP8.5 y el horizonte 2075-2099 para Tmax y Tmin.

Para los dos escenarios, los días y noches cálidas tuvieron un corrimiento hacia una mayor cantidad de estos eventos, lo que implica un posible aumento en el número de Tmax cálidas. Por otra parte la cantidad de noches frías disminuyó, proyectándose una menor cantidad de Tmin frías.

De esta manera, es posible que en las regiones donde se está experimentando una tendencia de aumento de temperatura y de eventos extremos cálidos, con cambio climático continúe ese comportamiento o sea superior.

Abstract

Evidences have showed that there is an increment of temperature around the world for anthropogenic cause; however regionally the changes can be different. Therefore the objective this thesis was to detect changes in the temperatures maximum and minimum, and extreme climate events, considering observed conditions and climate change at some regions of México. This analysis was done utilizing a regionalization previously performed for Mexico, which divided the territory into 18 regions for temperature, and it was validated using a cluster method. Into each group only one representative meteorological station was chosen. The supposition was that all the stations in the same region had the same climatology.

Using a regression linear model, changes were detected in the observed temperature. The model was validated with statistical tests of specification. The adjusted trends were developed for annual and monthly temperatures (representative months: January, April, July, and October), and for extreme climate events, which were calculated using indices defined by thresholds: warm days, cold nights and warm nights.

In the observed series the results showed that there are not changes on all the regions in México for Tmax, Tmin, and for extreme climate events. In southern regions the changes showed an increase of both temperatures, while in the north of Mexico there is a decrease for Tmin. On the regions, warm nights had more changes that cool nights. A great increase of cool nights occurred on Chihuahua, also there were a decrease of warm nights and warm days; these results could mean that this region had an important cooling trend.

In the context of climate change, the models GFDL-CM3 and MPI-ESM-LR were used considering the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. The time horizons considered were: 2015-2039 and 2075-2099 in the monthly case, and 2055-2099 for the daily analysis. The performance of the models outputs was evaluated comparing the observed series with the proposed historical series of models. This comparison was done for the series of climatology, months and with extreme events indices. For the analysis, groups were then selected depending on the best representation by each model.

For the two models, the monthly trends of Tmax and Tmin presented the greatest increments for the RCP8.5 scenario and for the far horizon (2075-2099). For extreme events, the results showed a displacement toward an increment in the number of warm days and warm nights with the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. Also the number of cool nights decreased; that is, there could be an increase of warm temperatures and a decrease of cool temperatures.

Is possible then that in the regions where there is an increment in the trend for temperature and in the warm extreme events, with climate change conditions this behavior will continue or could even be greater.

1

Introducción

Alrededor del planeta se han generado diferentes investigaciones sobre eventos climáticos extremos, ya que los impactos que puedan ocasionar conducen significativamente a la vulnerabilidad y exposición de algunos ecosistemas y sistemas humanos. Los impactos por los cambios en los eventos extremos incluyen alteraciones de ecosistemas, distribución de producción de alimentos y suministros de agua, daños en infraestructuras y asentamientos, y alteraciones a la salud humana (IPCC, 2014). En muchos países en todos los niveles de desarrollo, estos impactos son consistentes con un significativo retraso de preparación para la variabilidad del clima actual. En el Quinto Reporte del Grupo II del IPCC, se señalan los impactos observados atribuidos a cambio climático distribuidos alrededor del planeta. Sin embargo en países como México, no hay atribuciones (IPCC, 2014). Este retraso de información obliga a generar más investigaciones que se enfoquen en la atribución de cambios en los eventos climáticos extremos, pero esto no se puede lograr si antes estos cambios no son detectados. Por lo tanto estudios que detecten cambios en los eventos extremos son relevantes, ya que son un generador de preguntas que nos conducen a tratar de responder por qué hay un cambio. Además se suma el problema del clima futuro y sus proyecciones con los diferentes escenarios. Si no conocemos el estado actual del clima cómo poder hablar de su estado futuro, sobre todo en los eventos extremos, siendo este un problema de frontera porque no hay una metodología específica para su análisis.

Por tanto en esta tesis se abordan estos temas importantes: la detección de cambios en el clima observado y sus proyecciones con escenarios de cambio climático para eventos extremos de temperatura en México. Se eligió esta variable porque a diferencia de la precipitación no presenta muchas variaciones espaciales y temporales y por tanto los registros de temperatura pueden ser más confiables. Incluso en la literatura se encuentra un mayor número de trabajos para precipitación que para temperatura, porque los impactos y desastres aparatosos provienen de eventos extremos relacionados con precipitación.

A continuación se presenta de manera general la justificación y antecedentes para de este trabajo de investigación. Se abordan temas que van desde las características climáticas del lugar de estudio, regionalización, hasta las bases teóricas de eventos extremos y escenarios de cambio climático.

1.1 Climatología de México

México está localizado en la región 32°43'-14°32' latitud norte y 86°42'-118°22' longitud oeste (<http://www3.inegi.org.mx/>). Por su ubicación geográfica el territorio es afectado por sistemas meteorológicos de latitudes medias en invierno y sistemas tropicales en verano. Factores como la topografía, el uso de suelo, la presencia de océanos, también determinan el tipo de clima que se experimenta regionalmente. Las temperaturas medias en el país oscilan entre los 10 °C y 26 °C en un 93% de su superficie. Este porcentaje abarca los climas: cálido-subhúmedo en un 23%, seco en el 28%, muy seco en el 21% y templado-subhúmedo en el 21%.

Durante el invierno es cuando se tienen los mínimos de temperatura principalmente en el norte y zonas montañosas. Mientras que durante el verano, en las zonas semiáridas es donde se pueden alcanzar temperaturas por encima de 40 °C (Magaña *et al.*, 1999). Por otra parte, sólo el 7% del territorio (en el sureste) recibe el 40% de la lluvia anual del país, mientras que en el norte del país existen regiones con precipitaciones entre 125 a 400 mm anuales (Conde, 2003).

De manera general la temporada de lluvias en México comienza entre mayo-julio finalizando en septiembre-octubre, es en verano donde ocurren las lluvias más intensas (Magaña *et al.*, 1999).

Durante el invierno hay condiciones secas en la mayor parte del territorio, sin embargo en zonas del noroeste y la vertiente del Golfo de México se ven afectados por lluvias asociadas a los *frentes* (Conde, 2003). Otros sistemas de latitudes medias que generan lluvias en la vertiente del Golfo de México durante el invierno son los *Nortes*. Estos se asocian con la influencia de las masas polares continentales con origen en Alaska y Canadá. Cuando estas masas de aire se propagan hacia los trópicos generan un contraste de presión dando como resultado vientos intensos y lluvias. Además estas masas producen condiciones relativamente frías durante el invierno (usualmente por debajo de 0 °C), y contienen poca humedad, por lo que se asocian con condiciones de relativa sequía, lo que pueden ocasionar severas heladas en el norte y centro de México (Reyes Coca, 2001).

Las lluvias de verano están asociadas con:

a) La Zona Intertropical de Convergencia (ZITC), b) el monzón mexicano, c) las ondas del este, y d) los huracanes en el Pacífico, el Caribe y el Golfo de México (Magaña *et al.*, 1999).

En la precipitación de verano aparecen dos máximos en la región centro-sur de México, uno en junio y el otro en septiembre. Por tanto ocurre un mínimo relativo entre julio y agosto, al que se le conoce como sequía intraestival, sequía de medio verano, "canícula" o "veranillo". En este mínimo de precipitación hay una menor cantidad de nubes convectivas profundas, por tanto hay una mayor incidencia de radiación solar, lo que implica un aumento de temperatura en la superficie, típico de este periodo (Magaña *et al.*, 1999).

Finalmente, gran parte del clima en el país está modulado por el *fenómeno de El Niño/Oscilación del Sur* (ENOS), que es un evento que puede elevar los eventos climáticos extremos en el país (Magaña et al., 1997).

1.1.2. Estudios Regionales en México

Para realizar estudios en el país de tipo climático se pueden elaborar análisis a escala regional. Una regionalización presenta ventajas en una investigación, puesto que permite organizar la información de manera espacial en áreas o zonas con ciertas características en común (<http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/regionalizacion.html>).

La regionalización dependerá del propósito de la investigación a realizar e incluso nos conduce a contestar lo que nos estamos preguntando. Por ejemplo, para un estudio hidrológico podría ser más útil emplear una división por cuencas hidrográficas o hidrológicas¹ (RH), que una división política por estados (<http://www.conagua.gob.mx/atlas/>). Por otra parte para un estudio de clima estas regiones no son viables, ya que la regionalización está basada principalmente en características físicas: cercanía de cuencas, superficie, conexión física entre barras costeras, misma región hidrológica y semejante tipo de drenaje y dirección (<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/639/regionalizacion.pdf>).

El primer trabajo en México para clasificar el clima de México en regiones, fue el realizado por García E. (1988). El autor modificó el tradicional sistema climático de Köppen que define regiones climáticas basadas en cambios latitudinales y los límites de los diferentes tipos de vegetación. Adaptó esta clasificación a la diversidad de climas de México y su vegetación, abarcando así todo el territorio.

¹ Generalmente el término "cuenca hidrográfica" se refiere a la definición geográfica de la misma, mientras que "cuenca hidrológica" se suele entender como una unidad para la gestión que se realiza dentro de la cuenca hidrográfica. Sin embargo, la Ley de Aguas Nacionales utiliza "cuenca hidrológica" con el mismo sentido que otras fuentes atribuyen a "cuenca hidrográfica", que es el término correcto. Fuente: <http://www.cambioclimaticoysseguridadnacional.org/biblioteca/53920687931388.pdf>.

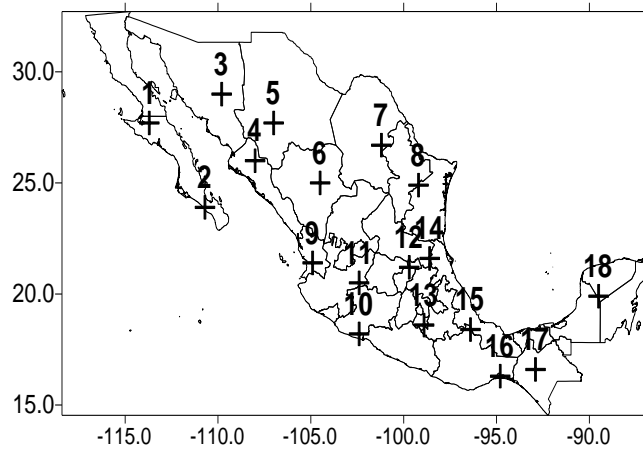


Figura 1.1.1 Las 18 Regiones de Douglas para México. Las marcas (+) indican la latitud y longitud promedio. Fuente: Conde, 2003.

Douglas (1993) construyó 18 regiones climatológicas (Figura 1.1.1), basándose en la densidad geográfica de las estaciones y en los siguientes criterios:

- 1) similitud en la pendiente y elevación de las estaciones,
- 2) recuperación de los datos de 95% para el periodo 1947-1988, y
- 3) los totales anuales de lluvia de las estaciones debían encontrarse dentro del 20% de la media del área de la región (criterio para regionalización de precipitación).

Agrupó 98 estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo del país para desarrollar una división basada en temperatura y 280 para precipitación; es decir una regionalización por cada variable.

Esta división climática fue utilizada en investigaciones que formaron parte de los proyectos de la Primera Comunicación Nacional (INE, 1997) y la Cuarta Comunicación Nacional (Conde *et al.*, 2008, Conde & Gay, 2008; <http://www.atmosfera.unam.mx/gcclimatico/index>).

Englehart & Douglas (2002 y 2004), emplearon una división parecida a la de Douglas (1993), para describir la variabilidad de la precipitación y la temperatura en México. Ellos utilizaron un método de componentes principales con el cual identificaron 5 divisiones para precipitación (Englehart & Douglas, 2002) y 4 para temperatura (Englehart & Douglas, 2004), éstas se muestran en la figura 1.2.a y 1.2.b, respectivamente.

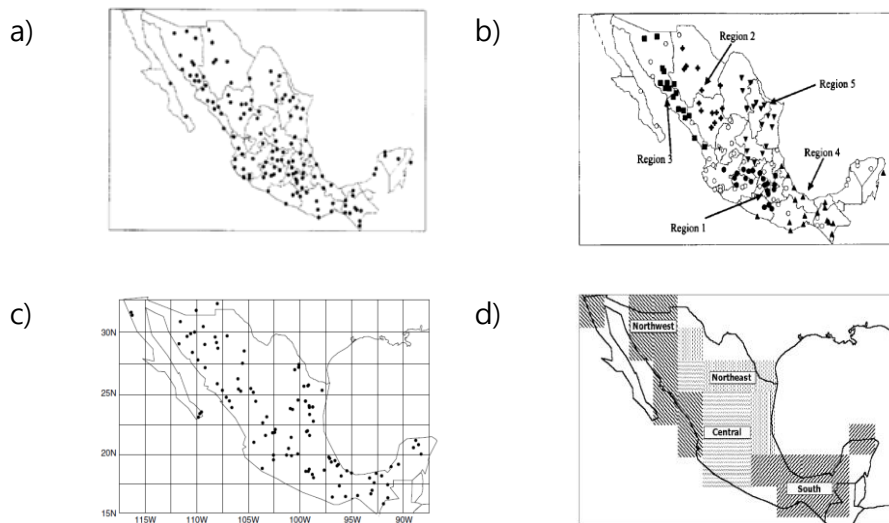


Figura 1.1.2. a) Localización de las 130 estaciones con datos de lluvia mensuales, b) mapa de las 5 regiones para precipitación en México, c) localización de las 103 estaciones para datos de temperatura, d) mapa de las 4 regiones delimitadas para temperatura en México. Fuente: Englehart & Douglas (2002 y 2004).

Los patrones de temperatura fueron los mismos sobre el sur de México y toda la Península de Yucatán Algo similar ocurrió en el norte del país, que a pesar de la presencia de las grandes cordilleras, la temperatura fue homogénea (Englehart & Douglas, 2004).

Con la regionalización de temperatura, Englehart & Douglas (2005) realizaron un análisis regional de tendencias para el rango diurno de temperatura en México.

Por otra parte Pineda (2009) buscó regiones climáticas para México, utilizando un método jerárquico de *clusters*. Empleó series de datos de temperatura máxima, mínima y precipitación acumulada mensuales, de un total de 2324 estaciones para un periodo de 1940-2004. Encontró un total de 12 regiones climáticas, las cuales coincidieron con los gradientes topográficos y la cubierta vegetal del país.

Otro trabajo que incluyó al territorio de México en su investigación fue el realizado por Comrie & Glenn (1998). Ellos determinaron regiones de precipitación para la región fronteriza Estados Unidos-México. Obtuvieron 9 regiones las cuales incluyeron: regiones para el monzón de Norte América, el desierto bajo, el régimen Mediterráneo de California y los regímenes de precipitación de verano contiguos al Golfo de México.

Salas-Flores *et al.* (2011) llevaron a cabo una regionalización para México con temperatura media y el método de componentes principales. Ellos usaron 49 estaciones meteorológicas de México (salvo estados del centro-sur y sur-sureste) y la franja fronteriza de Estados Unidos, con un periodo de 1941-2001. Identificaron seis regiones: 1) Noroeste, 2) Monzón Mexicano, 3) Altiplano Central, 4) Norte de Baja California, 5) Húmeda de Baja California y 6) Zona Semiárida

del Norte (figura 1.1.3) . Estas regiones fueron consistentes con la climatología de México y la empataron con la regionalización basada en precipitación propuesta por Salas (2008), conformada por once regiones: 1) Altiplano Central, 2) Costa del Golfo de México, 3) Noreste, 4) Zona Semiárida del Norte, 5) Región Húmeda de Baja California Sur, 6) Norte de la Península de Baja California, 7) La Huasteca, 8) Zona Desértica de Baja California Sur, 9) Sureste, 10) Costa del Pacífico Sur y 11) Monzón Mexicano.

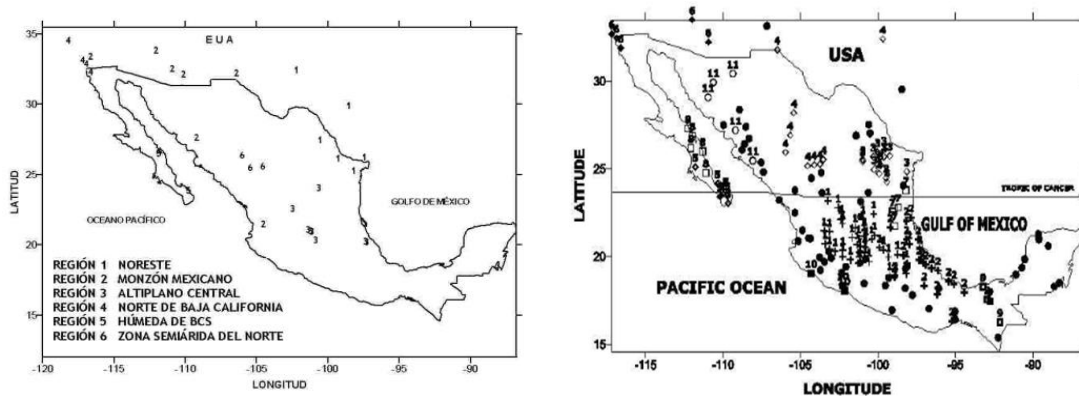


Figura 1.1.3. Del lado izquierdo el mapa de la regionalización de temperatura media por el método de componentes principales, realizada por Salas-Flores *et al.* (2011). Del lado derecho la regionalización basada en precipitación hecha por Salas, 2008.

La división por regiones también se ha aplicado a un nivel local, en México. Pineda *et al.* (2007) definieron zonas climáticas en la zona centro-noreste de México. Su regionalización concordó con las características topográficas y de vegetación del lugar, además lograron hacer una clasificación de zonas bioclimáticas.

Por su parte Estrada *et al.* (2009), presentan un estudio sobre la variabilidad espacial del clima en la Ciudad de México. En este trabajo se aplicaron métodos de análisis multivariados, lo que permitió identificar dos grandes regiones: zona húmeda y zona seca. Además de cuatro subregiones con características climáticas similares: baja altitud con elementos suburbanos, baja altitud altamente urbanizada, pie de montaña con urbanización y zonas de mayor altitud y presencia de bosques. Este trabajo se tomó como base para llevar a cabo el proyecto para el Distrito Federal sobre "Historia del clima de la Ciudad de México: Efectos observados y perspectivas" (Conde *et al.*, 2011a).

Conde *et al.* (2011b) realizaron una regionalización climática para el estado de Michoacán utilizando 55 estaciones. Para identificar las regiones en el estado se utilizaron métodos de análisis multivariados (método de clúster) aplicados a variables como temperatura, precipitación, evaporación y altitud. Para definir el tipo de zona climática se apoyó en el índice de Lang (definido por el cociente entre precipitación y temperatura). Se identificaron cuatro regiones con similitud: 1) zona templada y semicálida subhúmeda, 2) zona templada y semicálida más

húmeda de las subhúmedas, 3) zona cálida y semicálida subhúmeda y 4) zona cálida semiárida y árida.

En los dos estudios anteriores, las regionalizaciones facilitaron realizar un análisis de tendencias de temperatura máxima y mínima, precipitación mensuales y de eventos climáticos extremos. Sobre todo por la falta de calidad y disponibilidad de los datos.

En la presente investigación no se pretende proponer una nueva regionalización para México, por tanto es necesario seleccionar alguna de las mencionadas anteriormente. Esta será la base los análisis que se llevarán a cabo y permitirá cumplir con el objetivo de este trabajo. Se seleccionó la regionalización propuesta por Douglas (1993), la cual divide a México en 18 regiones para temperatura.

Si bien, existen trabajos más recientes y actualizados del mismo autor, su primer trabajo permite tomar un mayor número de regiones y así realizar los análisis con mayor detalle espacial. Incluso las 18 regiones han sido utilizadas en estudios previos de cambio climático (INE, 1997; Conde *et al.*, 2008; Conde & Gay, 2008). Para este trabajo la regionalización de Douglas fue reagrupada con el método de *cluster*, con datos más actualizados para validarla, por tanto en este trabajo se hablará de **grupo** sustituyendo el término **región**.

1.2 Eventos Extremos de Temperatura

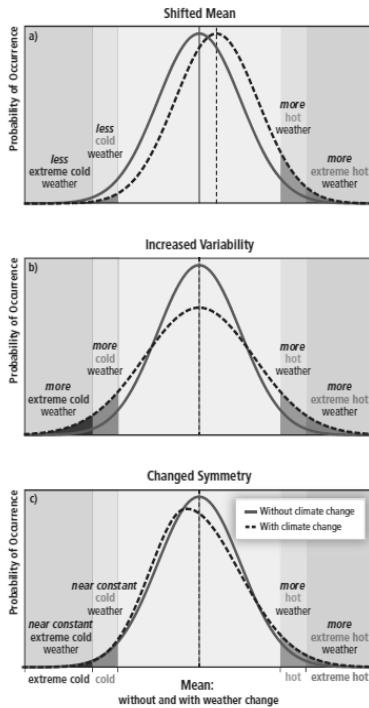


Figura 1.2.1 Distribución de probabilidad para temperatura. Se muestra los posibles cambios en los eventos extremos (colas de la distribución): media, variabilidad y simetría. Fuente: IPCC, 2012.

Un evento extremo se puede definir estadísticamente como aquel evento que se encuentra por encima del 90o. ó por debajo del 10o. percentil en una distribución de probabilidad observada de alguna variable, como la temperatura o la precipitación. Cuando un patrón de eventos extremos persiste por algún tiempo, como una temporada, se puede clasificar como evento climático extremo (IPCC, 2007). Los eventos climáticos extremos dependerán de la climatología de cada región.

Otra manera de clasificar un evento extremo es de acuerdo a criterios como su variabilidad y, también considerando la vulnerabilidad de la población a este tipo de eventos. Entre estos criterios se encuentran: a) por su *rareza*, eventos que ocurren con poca frecuencia; b) por *intensidad*, eventos cuya magnitud está fuera de lo "normal" (Beniston *et al.*, 2006); y c) por su *impacto*, por lo general asociado a daños y pérdidas en diferentes sectores (Beniston & Stephenson, 2004).

La variabilidad de los eventos extremos puede verse modificada por cambios en el clima, lo que lleva a cambios en la frecuencia, intensidad, extensión espacial y duración de los eventos extremos. Estos cambios pueden estar relacionados (estadísticamente) con cambios en el promedio, la varianza, la forma de la distribución de probabilidad observada de una variable, como se puede ver en la figura 1.3 (IPCC, 2012).

1.2.1 Análisis de Eventos Extremos

Varias investigaciones se han enfocado en poder encontrar métodos que ayuden a la evaluación de este tipo de eventos y también estimar lo que se espera con el cambio climático. Uno de ellos está basado en el cálculo de indicadores de eventos climáticos extremos, y son definidos por percentiles, umbrales, etc. Proporcionan información para determinar si existen cambios en los eventos extremos y por tanto si existe un cambio en el clima. Cabe mencionar que este método fue el que se utilizó en este trabajo de investigación.

Actualmente el Equipo de Expertos en Índices y Detección de Cambio Climático (*The Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices ETCCDMI*), dependiente de la

Comisión Climatológica (CCI) de la Organización Meteorológica Mundial y el proyecto CLIVAR, definió 27 índices base (Zhang & Yang, 2004; Peterson, 2005), relacionados con temperatura y precipitación. Estos se están empleando en varias investigaciones: Frich *et al.*, 2002; Klein Tank & Können, 2003; Rusticucci & Barrucand, 2004; Aguilar *et al.*, 2005; Alexander *et al.*, 2006; Caesar *et al.*, 2006; Sillmann & Roeckner, 2008; Bartholy & Pongracz, 2007; Aguilar *et al.*, 2009; Vincent *et al.*, 2011; Caesar *et al.*, 2011, todos ellos seleccionaron los índices de acuerdo a sus enfoques específicos.

En las investigaciones sobre eventos extremos se debe de contar con: registros de observaciones diarias, de periodo largo, de buena calidad y homogéneas. Con lo anterior se pueden eliminar la mayor cantidad de factores externos (por ejemplo, errores de tipo instrumental, humano, ambiental, etc.) que puedan alterar los resultados. Si bien existen datos de re-análisis, que generalmente, para temperatura son aceptables al compararse con datos observados; al emplearlos para calcular índices con temperaturas diarias puede ser diferente como lo muestra Donat *et al.* (2014). Ellos encontraron grandes diferencias entre resultados observados y de re-análisis para extremos de temperatura, particularmente durante la era pre-satelital. Lo que indica que los re-análisis son más consistentes con análisis de más recientes décadas. Por tanto, si se utiliza este tipo de información, los resultados que se puedan obtener deben tratarse con precaución, ya que solo son una aproximación de lo observado.

1.2.2 Cambios Observados en Eventos Extremos

Desde 1950 existen evidencias de cambios en los eventos climáticos extremos. El nivel de confianza de los cambios observados alrededor del mundo dependerán de factores como: la calidad, cantidad y disponibilidad de datos. El hecho de asignar un "nivel de confianza bajo" a los cambios observados en un evento climático extremo específico a escala regional o mundial, no supone ni excluye la posibilidad de cambios en ese fenómeno (IPCC, 2012).

A continuación se muestran algunos estudios relacionados con eventos climáticos extremos en diferentes regiones del planeta. Los cuales muestran evidencias de cambios en tales eventos.

América

Vincent *et al.* (2005) hicieron un estudio con índices de eventos climáticos extremos para el periodo de 1960 al 2000. Ellos encontraron un incremento significativo en las noches tropicales en regiones como el sur de Brasil, Paraguay y Uruguay, es decir T_{min} más cálidas.

En la región de la Patagonia Rusticucci & Barrucand (2004), encontraron que el número de días y noches fríos descendió. Por otra parte hubo un incremento en el número de días y noches cálidos, sobre todo en las temporadas de verano e invierno. Es decir hubo un descenso en los eventos extremos fríos y un aumento en los cálidos.

De acuerdo a Aguilar *et al.* (2005) para Centroamérica y el norte de Sudamérica, durante la segunda mitad del siglo XX, las temperaturas extremas se incrementaron significativamente de 0.2 °C/década a 0.3 °C/década, sobre todo en temperatura máxima diaria. Esto resultó en un significativo incremento del rango diurno de temperatura (DTR) regional de alrededor de 0.1 °C/década, para una escala anual y estacional. Contrariamente a lo que ocurre a nivel global, donde el DTR está disminuyendo debido al rápido incremento de la temperatura mínima.

En México López-Díaz *et al.* (2013) realizaron un estudio sobre detección de cambios en eventos climáticos extremos de temperatura para un sitio en el estado de Tlaxcala. Su análisis mostró que los días de verano tuvieron un incremento y los días fríos disminuyeron, también hubo un aumento significativo de días de helada. En general, los resultados indicaron que se presentaron temperaturas extremas más cálidas pero también más frías. Es decir, no todos los cambios apuntan hacia temperaturas más cálidas.

En su investigación Salas (2008) hizo un análisis con diferentes índices de eventos climáticos extremos para 35 sitios distribuidos en todo el país. Sólo analizó tendencias en cuatro lugares los cuales presentaron una gran cantidad de resultados significativos. Se observó un patrón de enfriamiento en el estado de Nayarit cerca de las costas del Pacífico. Incluso apreció, tendencias de calentamiento en el norte y de enfriamiento hacia el sur del país.

De acuerdo con un estudio del Met Office (2011) se reveló que en México hay un enfriamiento en la Península de Yucatán, que es consistente con el incremento de noches frías. El incremento en este indicador se extiende sobre regiones en la costa del oeste, contrastando con el decremento en el resto del país. También se muestra un incremento significativo en noches calientes en la mayor parte del país, excepto en algunas regiones de las costas del Pacífico y la Península de Yucatán, donde hay un decremento no significativo en este índice. Los días cálidos, en su mayoría, también muestran incrementos (figura 1.2.2).

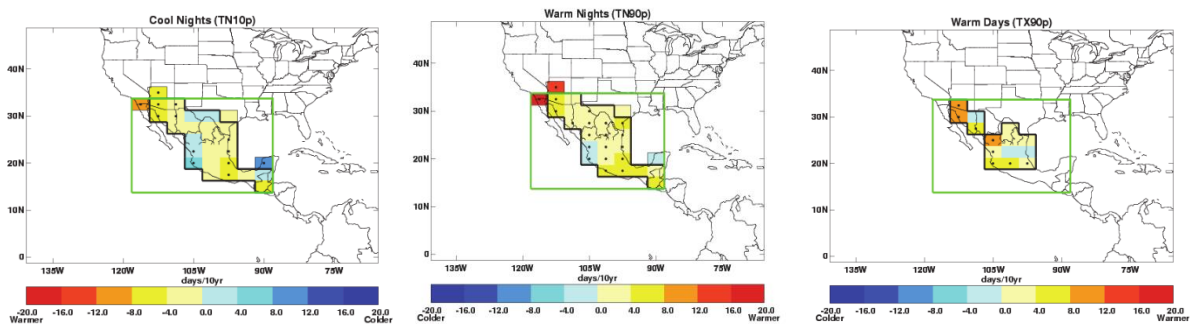


Figura 1.2.2. Tendencias de los índices de noches frías (TN10p), noches cálidas (TN90p) y días cálidos (TX90p). Fuente: Met Office (2011).

Europa

En general, el número anual de eventos extremos calientes de temperatura máxima y mínima diaria, se incrementó al doble en los últimos 25 años (Klein Tank & Können, 2003).

En España, por ejemplo, Brunet *et al.* (2006) encontraron grandes reducciones en el número de días fríos con el incremento de días cálidos; sin embargo, desde 1973 los días cálidos se incrementaron dramáticamente, en particular cerca de las costas del Mediterráneo.

África

Aguilar *et al.* (2009) realizó un primer análisis de eventos climáticos extremos para la región del oeste de África, Guinea Conakry y Zimbabwe, para el periodo de 1955 a 2006. En la región se mostró un claro calentamiento, con un descenso en los extremos fríos y un incremento en los extremos cálidos.

Asia

Para la región del Indo-Pacífico (13 países) Caesar *et al.* (2011), realizaron un análisis de eventos climáticos extremos para el periodo de 1971 a 2005. En general encontraron un incremento en la frecuencia de las noches y días cálidos y una reducción de las noches y días fríos.

En general, a escala mundial es muy probable que se haya producido un descenso generalizado del número de día/noches fríos y un aumento del número de días/noches cálidos. Esto es, en la mayoría de las zonas terrestres para las que se dispone de datos suficientes, está ocurriendo un aumento en eventos cálidos y un descenso en los fríos (IPCC, 2012).

1.3. Modelos Climáticos Globales y Escenarios Futuros

Debido a que el estado natural del clima está experimentando un cambio, por causas antropogénicas principalmente (IPCC, 2007), sería poco confiable extrapolar tendencias actuales hacia el futuro (Tebaldi & Knutti, 2010). Por tal motivo, los científicos especialistas en el clima utilizan Modelos de Circulación General (GCM por sus siglas en inglés) de Atmósfera y Océano Acoplados (AOGCMs), como el recurso disponible más avanzado para estudios de clima. Los modelos climáticos se basan en las leyes fundamentales de la física, para simular una gran variedad de procesos que ocurren en un rango muy amplio de escalas espaciales y temporales, entre los diversos subsistemas climáticos.

Los resultados obtenidos con los AOGCMs cuando se aplican en condiciones de cambio climático, dan lugar a escenarios de cambio climático para diversas variables proyectados hacia diferentes horizontes (Conde & Gay, 2008). El IPCC define los escenarios climáticos como “una representación plausible y simplificada del clima futuro, basada en un conjunto de relaciones climatológicas que han sido construidas expresamente para investigar las posibles consecuencias del cambio climático antropogénico” (IPCC, 2007).

De esta manera se pueden probar diferentes hipótesis de futuras emisiones antropogénicas y otros parámetros que regulan el sistema climático, abarcando una amplia gama de incertidumbre. Se tiene que ver a un escenario como una proyección mas no como una predicción. Cada escenario representa una alternativa de cómo se podría comportar el clima, debido a diferentes maneras en que se puede desarrollar el planeta

En la construcción de escenarios de cambio climático se asocian diferentes fuentes de incertidumbre (Tebaldi & Knutti, 2010):

- a) Diferencias en las condiciones iniciales de las simulaciones, debida a la variabilidad natural del sistema (es decir, la naturaleza caótica de tiempo).
- b) Forzamientos externos como las diferentes trayectorias de emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles, las cuales causan una diferente evolución (trayectoria) del sistema climático perturbado.
- c) El pobre entendimiento del comportamiento del sistema climático, ya que algunos de sus procesos no se han podido entender o no ha sido posible simularlos.
- d) Resolución de los modelos, puesto que siempre hay necesidad de aproximar procesos que actúan a escalas menores, de las que los GCMs son capaces de simular. Sin embargo, han surgido varios métodos para caracterizar el clima regional: 1) modelos atmosféricos de circulación general de alta resolución (AGCMs, por sus siglas en inglés); 2) modelos regionales, o modelos anidados de área limitada (RCMs, por sus siglas en inglés) y 3) métodos empírico-estadísticos o estadísticos-dinámicos (Conde & Gay, 2008).

Aunque la incertidumbre se incrementa cuando se consideran cambios más regionales (Tebaldi & Knutti, 2010).

Como no existe “el mejor modelo” que simule perfectamente el clima del planeta, conjuntos de modelos se han utilizado para la construcción de escenarios de cambio climático. Tebaldi & Knutti (2010), menciona que análisis basados en un solo GCM limitaría los resultados de proyecciones del clima futuro, lo que denomina como “un modelo, un voto”. Mientras que un promedio de modelos o ensamble de modelos sería un resultado más seguro y no tan limitado. Incluso Reichler & Kim (2008) encontraron que los ensambles multimodelos son un promedio legítimo y efectivo para mejorar las salidas de las simulaciones climáticas. Sin embargo de acuerdo con Conde & Gay (2008), aunque los promedios de ensambles multimodelos pudieran ser capaces de reproducir mejor el clima actual que los miembros individuales del ensamble (no para todas las regiones), no existe ninguna garantía de que ese desempeño se mantenga en el clima futuro. Así, como resultado de la falta de independencia en los modelos, no hay razón para pensar que los sesgos individuales de los modelos se cancelen, por lo que el uso de medias o medianas no proveería mejores estimaciones.

Siguiendo la metodología propuesta en el *General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Versión 2* (IPCC-TGICA, 2007), Conde & Gay (2008) seleccionaron tres GCMs para construir los escenarios de cambio climático en México. Eligieron los tres modelos que fueran capaces de representar el rango de incertidumbre. Es decir, con un rango en posibles aumentos de temperatura y, más importante, que proporcionaran tanto incrementos como reducciones en precipitación. Lo que garantizaría no tener la limitación de un solo modelo ni mucho menos el resultado de un promedio, el cual podría limitar el rango de las posibles proyecciones.

Por otra parte, Cavazos *et al.* (2012a, 2012b) utilizaron el método REA (*Reliability Ensemble Averaging*) con 15 GCMs. El desempeño de este conjunto de modelos fue evaluado aplicando métricas en las variables de temperatura y precipitación. Además, se compararon los resultados con la base de datos históricos del CRU (*Climatic Research Unit*; <http://www.cru.uea.ac.uk/home/>), e incluyeron la convergencia entre modelos.

Si bien existen diferentes métodos para construir los escenarios de cambio climático, de acuerdo a Conde & Gay (2008) es fundamental tomar en cuenta que los escenarios deben ser producto del trabajo conjunto entre los generadores de escenarios y los usuarios de los mismos. Con el fin de que sean de utilidad y se ajusten a las necesidades de información. Es decir, deben ser un producto hecho a la medida de las necesidades de los usuarios y no un producto genérico que pretenda satisfacer a cualquier usuario.

Lo anterior debe ser considerado con la nueva generación de escenarios (Moss *et al.*, 2008), llamados "*Representative Concentration Pathways*" (RCPs, por sus siglas en inglés). Los RCPs son conjuntos consistentes de proyecciones sólo de las componentes de forzamiento radiativo que sirven como insumos para la modelación climática. Estos escenarios son nombrados de acuerdo a su nivel de forzamiento radiativo en 2100. Las estimaciones de forzamiento radiativo están basadas en el forzamiento de gases de efecto invernadero y otros agentes de forzamientos,

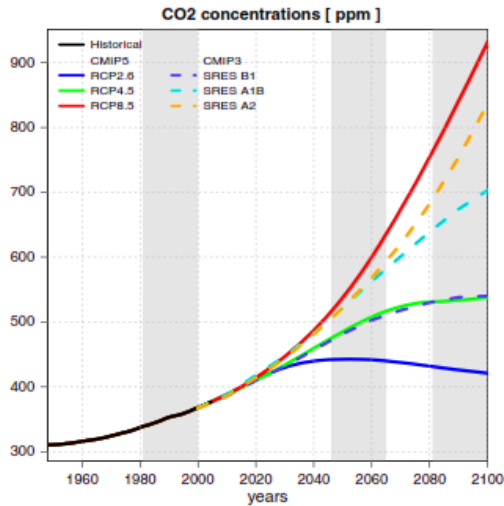


Figura 1.3.1. Concentraciones de CO₂ en partes por millón, usadas en CMIP3 y CMIP5, históricas y modelos. Las líneas verticales sombreadas indican el periodo de referencia (1981-2000) y los dos periodos de 20 años (2045-065 y 2081-2100) considerados en un análisis de cambio climático futuro. Fuente: Sillmann *et al.*, 2013.

Sin embargo aún en el último reporte del IPCC sobre eventos extremos (IPCC, 2012) se incluyen resultados con los escenarios previos al AR5. Actualmente estos nuevos escenarios ya se están utilizando en varias investigaciones. En México, por ejemplo, un grupo de investigadores realizó una actualización de escenarios para el país, como parte de la Quinta Comunicación Nacional (Cavazos *et al.*, 2012a, Cavazos *et al.*, 2012b) utilizando las bases de datos del CMIP5. Se espera que sigan surgiendo más actualizaciones, para generar el mejoramiento de resultados en diferentes sectores como el forestal, biodiversidad, agrícola, etc.

1.3.1. Proyecciones de Eventos Extremos

Para analizar los cambios en cantidades extremas más que en los promedios, se han utilizado índices de extremos climáticos. En este caso, también se han utilizado los ensambles de modelos de GCMs, para obtener cambios consistentes entre las simulaciones (Tebaldi & Knutti, 2010).

pero no incluyen directamente impactos de cambio de uso de suelo (albedo) (<http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tnt/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=about#descript>).

El proyecto de CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*), fue el marco para la coordinación de los experimentos sobre el cambio climático y por tanto de los nuevos escenarios RCPs (Taylor, 2009).

Los resultados con estos nuevos escenarios ya se incluyen en el Quinto Reporte (AR5) del IPCC (IPCC, 2013). Sustituyendo a los anteriores escenarios de emisiones, definidos por dos grandes familias de escenarios "A" y "B" (Conde &

Aun así, el nivel de confianza en la proyección de los eventos climáticos extremos dependerá del tipo de evento, la región, la estación del año, la cantidad y calidad de datos de observación, el nivel de comprensión de los procesos climáticos regionales y la confiabilidad de las simulaciones por modelos (IPCC, 2012). De acuerdo con el reporte *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* (SREX) del IPCC, las proyecciones con distintos escenarios para los eventos extremos en las próximas dos o tres décadas, no suelen divergir demasiado. Sin embargo, el signo de los cambios proyectados en algunos eventos climáticos extremos para ese periodo de tiempo es incierto. Si bien en algunos eventos el nivel de confianza es bajo en sus proyecciones, no implica ni excluye la posibilidad de cambios en tales eventos.

Tebaldi *et al.* (2006) analizaron simulaciones históricas para proporcionar fiabilidad para las proyecciones futuras de 10 indicadores derivados de un ensamble de 9 modelos. Las proyecciones de los modelos para el siglo XXI con escenarios de emisión A1, A1B y B1; consistentemente mostraron temperaturas más extremas con un clima más caliente. Hubo diferencias menores en la distribución espacial de los cambios con los diferentes modelos y escenarios.

Rusticucci *et al.* (2009), examinaron el desarrollo de 8 modelos climáticos globales, así como su ensamble promedio para simular índices anuales de eventos climáticos de temperatura en Sudamérica. En lo histórico, el número de noches calientes fueron mejor representadas por los modelos que los días de helada. Los patrones de variabilidad interanual incluso tuvieron consistencia con los valores observados.

Por otra parte Sillmann & Roeckner (2008) calcularon índices de temperatura extremas, sólo con base en las simulaciones del modelo climático global ECHAM5/MPI-OM del siglo XX y para escenarios de emisión A1B y B1 (siglo XXI). Al comparar lo histórico con lo observado, mostraron que el modelo fue capaz de capturar los patrones de larga escala de las observaciones climatológicas de los índices de temperatura. Sin embargo, la calidad de las simulaciones dependió del índice y la región en consideración. En las proyecciones, se detectaron temperaturas más cálidas alrededor del planeta, utilizando índices para temperatura máxima y mínima.

Más recientemente en trabajos con los escenarios RCPs y la base de datos del CMIP5, Sillmann *et al.* (2013), encontraron que en la mayor parte del planeta para los tres RCPs, son estadísticamente significativos los descensos en días/noches frías, así como los incrementos en noches/días cálidos. Con cambios más marcados en los índices basados en temperatura mínima que en los de temperatura máxima.

Para estos mismos escenarios, en México, como parte de su Quinta Comunicación Nacional, se realizó un primer análisis de eventos extremos (Conde, 2012). Este análisis estuvo basado en los indicadores propuestos por el ETCCDI, aunque no se utilizaron bases de datos diarias, sino

mensuales. Para meses extra cálidos, mayores cambios se con el escenario RCP8.5, hubo un aumento de hasta 7 meses con $T_{max} \geq 35$ °C en el estado de Sinaloa. Incluso en regiones sobre el litoral del Pacífico se presentaron incrementos de 9 a 11 meses para el período 2015-2039. Lo que implica una mayor ocurrencia de temperaturas extremas cálidas.

1.4. Objetivo

Entre las posibles consecuencias de los cambios registrados en la temperatura es el potencial cambio en los eventos extremos. La importancia de detectar cambios en las temperaturas extremas y los eventos climáticos extremos, es el tener información confiable y sustentada, sobre sus posibles cambios. Sobre todo a una escala regional, ya que se tiene la idea de que el aumento de temperatura está ocurriendo en todo el planeta. Sin embargo esto puede que no ocurra, ya que factores regionales pueden influir en el comportamiento de la temperatura y los eventos climáticos extremos, provocando que haya un aumento y/o un descenso de estos, o bien no haya cambios.

Por tanto en esta investigación el objetivo es **detectar cambios en los eventos climáticos extremos de temperatura y en las temperaturas extremas, para diferentes regiones en México, así como sus variaciones bajo el contexto de cambio climático.**

Objetivo clave a resolver, puesto que en México no hay estudios previos de análisis sistemáticos sobre eventos extremos de temperatura para todo el país. Incluso en esta investigación se presenta uno de los primeros análisis con los más recientes escenarios de cambio climático.

1.5. Estructura de Tesis

En el capítulo dos se presenta la metodología que se utilizó en esta investigación. En el tercer y cuarto capítulos, se muestran los resultados del análisis de temperatura mensual anual y eventos climáticos extremos con datos observados y en el contexto de cambio climático, respectivamente. La discusión y conclusiones se presentarán en el quinto capítulo. Finalmente se muestran dos apéndices y la bibliografía utilizada.

2

Metodología

Para cumplir con el objetivo de la tesis, la metodología tuvo dos partes: la primera de ellos fue un análisis con datos observados, mientras que la segunda se realizó con datos proyectados, ya en un contexto de cambio climático.

Los puntos de la metodología fueron los siguientes:

Parte observada

- 1) Selección de series de datos de temperatura y control de calidad. Datos diarios, mensuales y anuales.
- 2) Validación de una regionalización previamente seleccionada.
- 3) Ajuste de tendencias con un modelo de regresión lineal a series de promedios mensuales anuales y mensuales de Tmax y Tmin.
- 4) Cálculo de índices climáticos extremos.
- 5) Ajuste de tendencias de los indicadores seleccionados.

Con cambio climático

- 6) Selección de modelos, escenarios y horizontes.
- 7) Validación de salidas de los modelos a diferentes escalas temporales.
- 8) Ajuste de tendencias con datos proyectados.
- 9) Construcción de histogramas de índices de eventos climáticos extremos.

En esta sección se describirán las diferentes herramientas y métodos que se emplearon en esta investigación como parte de la metodología propuesta.

2.1 Datos

Para esta investigación se utilizaron datos de temperatura máxima (Tmax) y temperatura mínima (Tmin), a una escala temporal diaria, mensual y anual. Tres fuentes de bases de datos se consultaron para diferentes propósitos de esta metodología:

Para regionalización:

1. ERIC III (Extractor Rápido de Información Climática desarrollado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua).
2. Normales Climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

Para el análisis de temperaturas extremas y eventos climáticos extremos:

3. CLICOM (CLIma COMputarizado, <http://data.eol.ucar.edu/codiac/dss/id=82.175>).
4. CMIP5 (<http://pcmdi9.llnl.gov/esgf-web-fe/>).

Los datos que se utilizan en una investigación climática deben ser confiables para que no exista una mala interpretación de los resultados. Por lo que es necesario aplicar un control de calidad a los mismos.

2.1.1 Control de Calidad de Datos

Un total de 74 bases de datos diarios de temperatura máxima y mínima fueron depuradas, con los que posteriormente se calculó promedios mensuales y anuales. Para este fin fue necesario llevar a cabo un control de calidad inicial de datos diarios, se utilizó el *quality control* (QC) que se incluye en el programa *RClimDex* (<http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.shtml>).

El QC de *RClimDex* desarrolla el siguiente procedimiento: a) Reemplaza todos los datos faltantes (codificados como -99.9) en un formato interno que reconoce R, y b) reemplaza todos los valores no razonables por NA. Estos valores incluyen temperatura máxima diaria menor o igual que temperatura mínima diaria.

En la selección de series de datos, también se consideró que éstas fueran lo más largas (al menos 30 años en los registros), completas y actuales posibles, y que además fueran homogéneas. Esta última condición por su complejidad se tratará en la siguiente subsección.

2.1.2 Homogeneidad de Series de Datos

La homogeneidad de datos climáticos existe cuando las variaciones en los datos son el resultado sólo de variaciones en el tiempo meteorológico y el clima. Las inhomogeneidades se manifiestan en las series de tiempo como: una tendencia gradual o como una discontinuidad en el promedio o la varianza. Las tendencias pueden ocurrir debido al efecto del calentamiento urbano o por efectos que se acumulan en el tiempo. Las discontinuidades pueden ser por un cambio abrupto ocurrido en la estación de observación (cambio de lugar o de instrumentos), en la plataforma de observación o en el procesamiento de la información. Por lo tanto es necesario remover o identificar las inhomogeneidades, en este caso sólo se tratarán las discontinuidades en las series de datos.

a) Identificación de quiebres

Los cambios que se presentan en una serie pueden estar documentados en los registros de metadatos; sin embargo hay cambios que no están documentados, y es necesario identificar

(con pruebas estadísticas apropiadas), ya que pueden influir en los resultados (Easterling *et al.*, 1996). Para homogenizar series se pueden utilizar programas como el *RHtestsV3*, el cual detecta y ajusta múltiples puntos de quiebre (discontinuidades) que puedan existir en el promedio de una serie de datos. Utiliza una prueba estadística F de penalización máxima aplicada a un modelo de regresión de dos fases, para identificar los cambios en la serie (Wang, 2008).

Sea el modelo de regresión lineal:

$$x_t = \mu_0 + \beta_0 t + u_t \quad \text{para } t = 1, 2, \dots, N, \quad 2.1.1$$

donde u_t denota una variable de errores idénticamente e independientemente distribuidos de promedio cero y varianza σ^2 . Para probar que no existe un cambio en el promedio al tiempo $t = k$ en las series de tiempo $\{x_t\}$ con una tendencia lineal β se plantea la hipótesis nula

$$H_0: x_t = \mu + \beta t + u_t \quad t = 1, 2, \dots, N \quad 2.1.2$$

en contra de la alternativa

$$H_a: \begin{cases} x_t = \mu_1 + \beta t + u_t & t \leq k \\ x_t = \mu_2 + \beta t + u_t & k - 1 \leq t \leq N \end{cases} \quad 2.1.3$$

donde $\mu_1 \neq \mu_2$, cuando H_a es verdadera el punto/ tiempo $t = k$ es nombrado un *change point* y $\Delta = |\mu_1 - \mu_2|$ es la magnitud del cambio en el promedio (o el tamaño del brinco). El punto más probable a ser el *change point* se asocia con

$$F_{max} = \max_{1 \leq k \leq N-1} F_c(k) \quad 2.1.4$$

donde

$$F_c(k) = \frac{(SSE_0 - SSE_a)}{SSE_a / (N-3)} \quad 2.1.5$$

$$SSE_a = \sum_{t=1}^k (x_t - \hat{\mu}_1 - \hat{\beta}t)^2 + \sum_{t=k+1}^N (x_t - \hat{\mu}_2 - \hat{\beta}t)^2 \quad 2.1.6$$

$$SSE_0 = \sum_{t=1}^N (x_t - \hat{\mu}_0 - \hat{\beta}_0 t)^2 \quad 2.1.7$$

donde $\hat{\mu}_0$ y $\hat{\beta}_0$ son los estimados de la ecuación 2.1.1.

Un cambio en el promedio o *change point* es declarado si el estadístico F_{max} calculado para la serie de tiempo que es probada, es más grande que el valor crítico correspondiente al nivel nominal de confianza ($p = 1 - \alpha = 0.95$) o significancia ($\alpha = 0.05$).

Cuando H_a es verdadera, las series de datos pueden ser vistos como dos muestras. Una de tamaño $N_1 = k$ (para $t = 1, 2, \dots, k$) con respuesta $(\mu_1 + \beta t)$ y otra de tamaño $N_2 = (N - k)$ (para

$t = k + 1, k + 2, \dots, k + N$) con respuesta $(\mu_2 + \beta t)$. El tamaño de las dos muestras generalmente no es igual, esto es $N_1 \neq N_2$ excepto cuando $k = N/2$ (es decir cuando el punto está a la mitad de la serie).

Muestras de tamaños diferentes pueden tener un enorme impacto sobre los resultados de los cambios en el promedio no documentado. Los niveles resultantes de confianza sobre los puntos identificados que están cerca del final (en medio) de las series son mucho más bajo (alto) que el nivel nominal, lo cual no es deseable.

Para disminuir tal efecto no deseable, la siguiente PMFT (Prueba F de Penalización Máxima) es propuesta

$$PF_{max} = \max_{1 \leq k \leq N-1} [P(k)F_c(k)] \quad 2.1.8$$

Donde $P(k)$ es un factor de castigo, el cual fue construido empíricamente y $F_c(k)$ es definido por la relación 2.1.5.

b) Homogeneidad de la series

Después de ser identificadas las discontinuidades en las series de datos, el *RHtestV3* utiliza un método *Quantile-Matching* (QM) para ajustarlas. Lo hace de tal modo que la distribución empírica de todos los segmentos de una serie base sea igualada con cada segmento de la serie que se quiere ajustar (Wang & Feng, 2010; Wang, 2009). Cabe mencionar, que el ajuste de los valores depende de la frecuencia empírica del dato a ajustar, es decir, este varía de un dato a otro en un mismo segmento dependiendo de su correspondiente frecuencia empírica.

El programa también ajusta los segmentos sin requerir series de referencia, para lo cual ajusta de acuerdo al segmento más actual. El *RHtestV3* es un programa libre el cual se puede descargar a través de la página <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.shtml>. El programa ha sido desarrollado y mantenido por Xiaolan Wang y Yang Feng del *Climate Research Division*.

El origen de los quiebres identificados puede establecerse a partir de los metadatos de cada estación; sin embargo en México no se cuenta con registros de este tipo. Por tanto para poder establecer el origen de los quiebres identificados en las series de temperatura, se realizó la prueba de homogeneidad en estaciones vecinas. De esta manera, se determinó qué quiebres se debían eliminar y cuáles no. Así, si algún quiebre se repetía entre estaciones vecinas, este no se tendría que ajustar. A continuación se describe brevemente la metodología:

- i) Búsqueda de estaciones vecinas. Las estaciones vecinas se localizaron en los alrededores de otro grupo de "estaciones principales" (con latitud, longitud altitud similares), porque

debían estar dentro de la misma división de temperatura (ver sección 2.2 sobre regionalización).

- ii) A todas las series de datos se les eliminó el periodo anterior a 1960, con el objetivo de descartar la parte "ruidosa" o irregular de los registros de la década de los 50s y anteriores.
- iii) Se aplicó el control de calidad de datos diarios a las series vecinas: Las series debían ser lo más completas y con registros de datos lo más reciente posible, se eliminaron datos de Tmax menores o iguales a Tmin.
- iv) Se graficó Tmax, Tmin y Tmed anuales (1961-1990) para determinar que se tuviera el mismo comportamiento a través del año. Es decir, que las estaciones vecinas correspondieran aproximadamente al mismo grupo de temperatura.
- v) A las estaciones vecinas se les identificaron los quiebres con el programa *RHtestV3* (Wang X. & Feng Y., 2010).
- vi) Los quiebres no se ajustaron si no eran estadísticamente significativos.
- vii) Se hizo el ajuste de acuerdo a los siguientes criterios:
 - a) Caso mensual: Los quiebres debían coincidir exactamente en la misma fecha (año y mes) para que el brinco no fuera ajustado. Puesto que las series mensuales tienden a tener menos variaciones comparadas con las series diarias, por lo se puede dar un registro más factible de algún fenómeno meteorológico que haya afectado a toda la región.
 - b) Caso diario: Para que no fueran ajustados los quiebres encontrados, la coincidencia debía ser en año, mes y día o bien la fecha debía coincidir en año, mes y con diferencia máximo de 5 días, ya que los fenómenos meteorológicos tienen una corta duración.

En a) y b) la(s) fecha(s) debía(n) coincidir por lo menos en una estación vecina.

De esta manera se pudo garantizar no perder información de posibles variaciones naturales en las series.

2.2 Regionalización

Una de las condiciones para realizar un análisis de tipo climático es contar con un buen número de datos disponibles. Pero esto no siempre ocurre, pueden existir la falta de datos o por el contrario muchas fuentes de información concentradas en pocas zonas (por ejemplo un gran número de estaciones meteorológicas). Para suprimir estos defectos, la regionalización de un lugar (país, estado, etc.) puede ayudar. Se selecciona una estación que sea representativa de cada región para ser analizada. Con el supuesto de que un grupo de estaciones que conforman

una misma región tienen las mismas características, ya sea climática, de biodiversidad, de temperatura, de precipitación, etc., según sea el caso o el objetivo de la investigación a realizar. Sin embargo, hay que considerar que al hacer un análisis de eventos extremos, como en esta investigación, los efectos locales pueden jugar un papel importante en el comportamiento de los mismos, siendo muy particulares del sitio analizado.

En este estudio se optó por una regionalización ya establecida, porque dentro de los objetivos de esta tesis no se encuentra el realizar una regionalización nueva para México, sino mostrar la metodología que se está proponiendo para el análisis de los eventos extremos.

Aquí se seleccionó y corroboró la fortaleza de la regionalización para temperatura propuesta por Douglas (Douglas, 1993), puesto que este trabajo se enfoca en el análisis con esta variable. Además esta división permite hacer estudios a nivel país y/o regionales, es pública y confiable, fue utilizada para diferentes investigaciones en México (INE, 1997; Conde & Gay, 2008).

En esta investigación simplemente se trató de asegurar que las estaciones que conformaran estas 18 regiones, aún en la actualidad, cumplieran con la condición de pertenecer al mismo grupo con temperatura similar. Por tanto se utilizó el método de *cluster* para hacer este agrupamiento y tomar por buenas o bien descartar estaciones en las 18 regiones (por no tener datos actualizados, por ejemplo) previamente conocidas. Por lo anterior en las secciones subsiguientes se sustituye el término de **región** por el de **grupo**.

2.2.1 Método de *Cluster*

Para revalidar las 18 regiones de Douglas (1993) de temperatura en México, se reprodujo esta división con datos más actualizados. De esta manera, se comprobó si ésta aún era válida para las condiciones de temperatura con la climatología promedio 1961-1990.

El método empleado para agrupar las estaciones seleccionadas por Douglas (1993) fue un método de *cluster*. En este método las observaciones de un conjunto de datos son automáticamente organizadas en grupos, con base en características similares. El conocer el contenido de los grupos más pequeños nos ayudan a entender a ese gran conjunto de datos al que pertenecen (Myatt & Johnson, 2009).

Hay diferentes tipos de métodos para agrupar las observaciones en *clusters*. La selección de un método está influenciada por su complejidad, el tiempo que toma para generar los clústeres y el número de observaciones que pueda procesar. El agrupamiento en *clusters* es dependiente del conjunto de datos a analizar. El reordenamiento de las observaciones conduce a diferentes resultados (Myatt & Johnson, 2009, Von Luxburg *et al.*, 2012).

Para hacer una agrupación en *clusters* primero es necesario determinar cuán similares o diferentes son los sujetos o elementos que se desean agrupar, por lo cual es necesario calcular la "distancia" o "diferencia" que hay entre ellos. Existen muchos métodos para calcular esa distancia, pero se debe elegir el método más apropiado para el problema en particular de las

observaciones a analizar. Las medidas de distancia que se deben elegir deben de cumplir con las siguientes propiedades:

- La medida de distancia entre dos observaciones debe ser mayor o igual a cero.
- La distancia entre las observaciones A y B es la misma que la distancia entre las observaciones B y A.
- Si la distancia es cero, no hay diferencia entre las dos observaciones, es decir, tienen los mismos valores.
- La distancia entre A y B ($d_{A,B}$) satisface la siguiente suposición con respecto a una tercera observación (C), basada en la distancia entre A y C ($d_{A,C}$) y la distancia entre B y C ($d_{B,C}$):

$$d_{A,B} \leq d_{A,C} + d_{B,C}$$

Los métodos de agrupamiento generalmente requieren de una matriz de distancia (D) como salida. Esta matriz es una matriz de $n \times n$, donde n es el número de observaciones en un conjunto de datos a ser agrupados. La matriz de distancia es de la siguiente forma:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & d_{1,2} & d_{1,3} & \dots & d_{1,n} \\ d_{2,1} & 0 & d_{2,3} & \dots & d_{2,n} \\ d_{3,1} & d_{3,2} & 0 & \dots & d_{3,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n,1} & d_{n,2} & d_{n,3} & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

Donde $d_{i,j}$ es el valor distancia entre pares de observaciones, por ejemplo $d_{1,2}$ es la distancia entre la primer y segunda observación. Los valores de la diagonal son todos distancia cero, no hay distancia entre dos observaciones idénticas.

La función de medida de distancia más intuitiva y que comúnmente se usa es la distancia euclidiana. La cual debe calcular la distancia entre dos pares de puntos, p y q , medidas sobre n variables (Myatt & Johnson, 2009):

$$d_{p,q} = \sum_{i=1}^n \sqrt{(p_i - q_i)^2} \quad (2.2.1)$$

Una vez que se determinó la distancia entre los sujetos es necesario agruparlos en *clusters*, el procedimiento más común que se utiliza es el de clúster jerárquico.

Esto es, se construye un conjunto de grupos jerárquicos, cada uno de los cuales son formados por la combinación de pares de grupos previamente definidos por distancias. Se considera que las n observaciones de un conjunto de datos no tienen una estructura de grupo o, equivalentemente, si los datos consisten de n grupos con una observación cada uno. El primer paso es encontrar los dos grupos que sean encerrados en su espacio de K-dimensiones y que

se combinen dentro de un nuevo grupo, esto se hace calculando la distancia entre las observaciones. Hay ahora $n - 1$ grupos, uno de los cuales tiene dos miembros. En cada paso subsecuente, los dos grupos que son encerrados son clasificados para formar un grupo mayor. Este proceso continúa hasta el final de los $(n - 1)$ pasos para todas las n observaciones que han sido agregadas dentro de un solo grupo. Mientras las distancias entre pares de puntos pueden ser definidas inequívocamente, hay un número de alternativas para definir la distancia entre grupos.

El criterio usado para definir la distancia de *cluster a cluster* esencialmente define el método de aglomeración (figura 2.2.1). Los más comunes son los siguientes (Wilks, 1995):

Vínculo simple o aglomeración de mínima distancia: Aquí la distancia entre *clusters* G_1 y G_2 es la distancia euclidiana más pequeña entre un miembro de G_1 y un miembro de G_2 :

$$d_{G_1 G_2} = \min_{p \in G_1, q \in G_2} [d_{p,q}] \quad 2.2.2$$

Vínculo completo o aglomeración de máxima distancia: toma como base la mayor distancia entre puntos en los dos grupos G_1 y G_2 :

$$d_{G_1 G_2} = \max_{p \in G_1, q \in G_2} [d_{p,q}] \quad 2.2.3$$

Promedio de grupo: define la distancia de *cluster a cluster* como el promedio de la distancia euclidiana entre todos los posibles pares de puntos de los dos grupos que se comparan. Si G_1 contienen n_1 puntos y G_2 contiene n_2 , la medida de la distancia es:

$$d_{G_1 G_2} = \frac{1}{n_1 n_2} \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} d_{p_i q_j} \quad 2.2.4$$

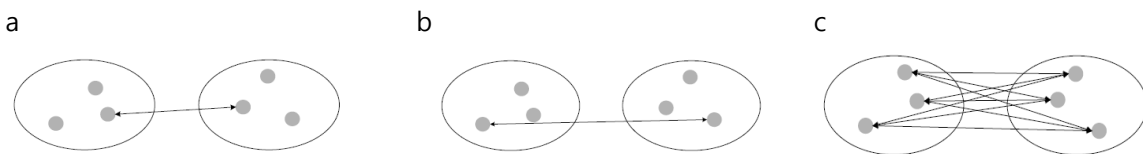


Figura 2.2.1. Representación de las distancias entre clusters a) mínima distancia, b) máxima distancia c) distancia promedio. (Myatt & Johnson, 2009).

Un problema en el análisis de *clusters* es la elección de la etapa que se elegirá como la solución final. Entonces, se necesita elegir el nivel de agregación en un diagrama de árbol o dendrograma para la combinación de los *clusters*. Aunque la guía para elegir el número de

clúster, es encontrar a qué nivel de aglomeración se maximiza la similitud de los elementos de los *clusters* y se minimiza la similitud entre estos. En la práctica el mejor número de *cluster* para un problema no es tan obvio y generalmente el punto de "parar" puede requerir una elección subjetiva (Von Luxburg *et al.*, 2012).

2.3 Modelo de Regresión Lineal

La modelación empírica se basa en una descripción adecuada de fenómenos estocásticos usando modelos estadísticos que sean consistentes, los cuales van a extraer toda la información sistemática de los datos. En la modelación se van a introducir variables que sean representativas para realizar una descripción adecuada, es decir cuan bien el modelo elegido va a representar la información sistemática de los datos.

Uno de los modelos más simples con los que se puede trabajar es un modelo de regresión lineal de grado 1, el cual se basa en explicar el comportamiento de una variable a partir de otras. Para ello se supone que existe una relación lineal entre la variable cuyo comportamiento se quiere explicar y las variables que se utilizan como explicativas:

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 x_t + u_t \quad 2.3.1$$

donde la variable y_t es la variable dependiente, las variables $x_t, t = 1, \dots, K$ son las variables explicativas. El u_t es la perturbación aleatoria que encierra todas aquellos factores que afectan la variable dependiente pero que no son considerados en el modelo de forma explícita (Gujarati, 2003). El parámetro β_1 es el asociado a la variable explicativa, también llamado coeficiente de regresión, y miden el impacto de cada variable en el comportamiento de la variable dependiente. El coeficiente β_0 es el término independiente.

El modelo requiere de una cierta cantidad de pruebas de validación, que sustenten los valores calculados (muestrales) de los parámetros β_0 y β_1 ; que se pueden representar como $\hat{\beta}_0$ y $\hat{\beta}_1$ respectivamente (valores estimados). Además de la naturaleza del comportamiento de u_t que en este caso son, los errores del modelo, los residuos o residuales que la serie de tiempo observada tiene respecto al modelo representado por la ecuación de regresión.

Existen 5 supuestos sobre los residuales del modelo de regresión (Brooks, 2008):

- 1) La media de los residuales es nula: $E(u_t) = 0$
- 2) La varianza de los residuales es constante y finita (homoscedasticidad) sobre todos los valores de x_t : $var(u_t) = \sigma^2 < \infty$
- 3) Los residuales son linealmente independientes unos de otros (no autocorrelación):
 $cov(u_i, u_j) = 0$
- 4) Los residuales no están relacionados con sus correspondientes valores de x_t : $cov(u_t, x_t) = 0$

5) Los residuales se ajustan a una distribución estadística normal: $u_t \sim N(0, \sigma^2)$

El hecho de que los supuestos 1 a 4 se cumplan permite garantizar que los parámetros muestrales calculados, $\hat{\beta}_0$ y $\hat{\beta}_1$, del modelo posean un conjunto de características deseables:

- a) Son estimadores de los parámetros poblacionales o verdaderos β_0 y β_1 .
- b) Son lineales, es decir, las fórmulas para calcularlos son combinaciones lineales de las variables y_i .
- c) Si se repite el análisis con diferentes muestras, el promedio de la colección de valores obtenidos de $\hat{\beta}_0$ y $\hat{\beta}_1$, coincide con los valores poblacionales β_0 y β_1 (consistencia).
- d) Si se repite el análisis con diferentes muestras, el parámetro $\hat{\beta}_1$ tiene la menor varianza entre todos los calculados (eficiencia).

La quinta suposición garantiza que se pueden hacer inferencias acerca de los parámetros de la población (β_0 y β_1 , actuales) a partir de los parámetros de la muestra estimados usando una cantidad finita de datos.

Otros supuestos que se deben de cumplir están relacionados con la estabilidad y forma funcional del modelo (Gujarati, 2003):

6) Parámetros constantes: Se tiene que verificar que los parámetros sean constantes a lo largo de la muestra, si no es así, se pueden identificar cambios estructurales en la series de datos. Un cambio estructural quiere decir que los parámetros del modelo no permanecen constantes a lo largo de todo el periodo. Estos cambios pueden deberse a diferencias en la intersección al origen o en el coeficiente de la pendiente, o por ambos.

7) Forma funcional: En este caso se supone que el modelo de regresión lineal que se utiliza tiene una forma funcional lineal. Lo que significa el modelo apropiado se asume que es lineal en los parámetros y que en el caso con dos variables, la relación entre y y x puede ser representado como una línea recta. Sin embargo esta suposición puede no ser siempre cierta, por lo que se debe verificar el supuesto.

En la tabla 2.3.1 se muestran las pruebas que se tienen que realizar para validar el modelo de regresión lineal, las cuales se realizaron empleando el software *EViews* (*Econometric Views*, <http://www.eviews.com/home.html>). Sin embargo, se puede emplear otros como *STATISTICA* (<http://www.statsoft.com/>), *R* y sus paquetes estadísticos (<http://www.r-project.org/>), por ejemplo.

Tabla 2.3.1. Pruebas de especificación para validar el modelo de regresión lineal

Pruebas de Residuales		
Autocorrelación	Normalidad	Homoscedasticidad
Correlograma-Residuales	Jarque-Bera	White
Correlograma-Cuadrado de los Residuales		ARCH
Prueba LM de Correlación Serial		
Pruebas de Estabilidad en el Modelo		Forma Funcional del Modelo
CUSUM y CUSUM de los Cuadrados	Cambio Estructural: Quandt-Andrews	Ramsey RESET

En el Apéndice 1 se describe de manera breve en qué consiste cada una de las pruebas que se utilizaron para validar el modelo.

2.4 Índices de Eventos Climáticos Extremos

Existen diferentes metodologías para el análisis de los eventos climáticos extremos, una de ellas es la que caracteriza a este tipo de eventos por medio de índices. En esta investigación se utilizaron los índices base sugeridos por el Equipo de Expertos en Índices y Detección de Cambio Climático (*The Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices ETCCDM*), auspiciado por la Comisión Climatológica (CCI) de la Organización Meteorológica Mundial y el proyecto CLIVAR. Este equipo definió 27 índices base (Zhang & Yang, 2004; Peterson, 2005), relacionados con temperatura (Tabla 2.4.1 y Apéndice 2) y precipitación, los cuales han sido empleados en varias investigaciones que están contenidas en el Cuarto Reporte del IPCC y muy probablemente en su Quinto Reporte.

Los índices se pueden clasificar de la siguiente manera (Alexander *et al.*, 2006):

Índices de percentiles: Muestran los extremos de una distribución con un periodo de referencia. Por ejemplo para temperatura, estos índices muestran los déciles más fríos y más calientes, permitiendo evaluar el grado al cual los extremos están cambiando.

Índices absolutos: Representan los valores máximos y mínimos en una temporada o año.

Índices con umbrales: Son definidos como el número de días en el cual un valor cae sobre o por debajo de un umbral fijo. Usar un umbral fijo, depende de la región bajo estudio, ya que este puede ser muy específico de sus condiciones climáticas regionales o bien de algún sector (agricultura, salud, etc.) en específico.

Índices de duración: Van a definir periodos de tiempo con cierta duración y características climáticas; por ejemplo periodos excesivamente calientes, fríos, húmedos, secos o para el caso del periodo de crecimiento de las plantas.

Tabla 2.4.1. Índices de temperatura definidos por el ETCCDI

ID	Nombre del Indicador Temperatura	Definición	Unidad
FD0	<i>Frost days</i> (Días de helada)	Número de días en un año cuando Tmin diaria < 0 °C	Días
SU25	<i>Summer days</i> (Días de verano)	Número de días en un año cuando Tmax diaria > 25°C	Días
ID0	<i>Ice days</i> (Días de hielo)	Número de días en un año cuando Tmax diaria < 0 °C	Días
TR20	<i>Tropical nights</i> (Noches tropicales)	Número de días en un año cuando Tmin diaria > 20 °C	Días
GSL	<i>Growing season length</i> (Duración de la estación de crecimiento)	Cuenta Anual (1st Ene a 31 st Dic en HN, 1 st Julio a 30 th Junio en HS) entre el primer periodo de por lo menos 6 días con TG>5°C y primer periodo después de Julio 1 (Enero 1 en HS) de 6 días con TG<5°C	Días
TXx	Max Tmax	Valor mensual máximo de temperatura máxima diaria	°C
TNx	Max Tmin	Valor mensual máximo de temperatura mínima diaria	°C
TXn	Min Tmax	Valor mensual mínimo de temperatura máxima diaria	°C
TNn	Min Tmin	Valor mensual mínimo de temperatura mínima diaria	°C
TN10p	<i>Cool nights</i> (Noches frías)	Porcentaje de días cuando Tmin <10th percentil	%Días
TX10p	<i>Cool days</i> (Días fríos)	Porcentaje de días cuando Tmax <10th percentil	%Días
TN90p	<i>Warm nights</i> (Noches calientes)	Porcentaje de días cuando Tmin >90th percentil	%Días
TX90p	<i>Warm days</i> (Días calientes)	Porcentaje de días cuando Tmax >90th percentil	%Días
WSDI	<i>Warm spell duration indicador</i> (Indicador de la duración de periodos calientes)	Conteo anual de días con por lo menos 6 días consecutivos en que Tmax >90th percentil	Días
CSDI	<i>Cold spell duration indicador</i> (indicador de la duración de periodos fríos)	Conteo anual de días con por lo menos 6 días consecutivos en que Tmin <10th percentil	Días
DTR	<i>Diurnal temperature range</i> (rango diurno de temperatura)	Diferencia media mensual entre Tmax y Tmin	°C

Los índices se calcularon con la ayuda del programa computacional *RClimDex*, el cual es un software libre (<http://ccma.seos.uvic.ca/ETCCDI/software.shtml>) que funciona bajo una plataforma R (<http://www.r-project.org/>). *RClimDex* realiza el cálculo de los índices utilizando datos diarios, proporciona datos mensuales y anuales, además posee un control de calidad de datos.

Los indicadores deben ser seleccionados de acuerdo al objetivo de la investigación que se desarrolle y de la representatividad de cada uno de ellos en la zona de estudio. Así, para México y las divisiones de temperatura empleadas en este trabajo, se han descartado ciertos índices por las siguientes razones:

Índices de umbrales: *Frost days*, *summer days*, *ice days* y *tropical nights*, no se han considerado ya que están definidos por una cantidad fija, que no es representativa para todas los sitios que se analizarán a lo largo del país. Incluso los *ice days* no arrojaron resultados, por su definición, ya que en México no se presentan Tmax diarias menores a 0 °C.

Índices absolutos: Estos índices tienen la desventaja de mostrar la información de un sólo valor y no de toda una serie de datos, perdiéndose información relevante.

Índices de duración: El indicador de *Growing season length* es útil sólo para latitudes altas. Para algunas divisiones no fue posible el cálculo de *Warm spell duration indicator* y *Cold spell duration indicator*, por el porcentaje de datos ausentes, a pesar de que no hay muchos datos faltantes en las series de los sitios seleccionados.

Índices de percentiles: Estos índices se pueden aplicar en cualquier zona de estudio, ya que se calcula el 10o. y 90o. percentil de los datos; sin embargo no es posible conocer el valor de los percentiles.

Por tanto se decidió utilizar tres índices que se definen en la Tabla 2.4.2, los cuales resultan de una combinación entre la definición de los índices de umbrales y los de percentiles. El umbral se estableció de acuerdo a la definición estadística de evento extremo, es decir, se calculó el 10o. y 90o. percentil de cada serie diaria de datos (Tmax, Tmin).

Tabla 2.4.2. Índices de eventos climáticos extremos seleccionados

ID	Índice	Definición	Unidad
DC _{n₁}	Días cálidos	Número de días en un año cuando Tmax diaria > n ₁	Días
NFn ₂	Noches frías	Número de días en un año cuando Tmin diaria < n ₂	Días
NCn ₃	Noches cálidas	Número de días en un año cuando Tmin diaria > n ₃	Días

n_i valor de los umbrales para cada índice.

Estos indicadores cubren eventos extremos de T_{min} y T_{max} , representando las temperaturas nocturnas y diurnas. Además por su definición son representativos para cada sitio analizado y se garantiza que el umbral si considere las temperaturas extremas. Cabe mencionar que no se calculó los días fríos, ya que para T_{max} es más relevante que se muestre índices para T_{max} cálidas que para T_{max} frías.

2.5 Proyecciones: Promedios Mensuales y de Eventos Climáticos Extremos

Elementos importantes para hacer el análisis de las proyecciones para datos mensuales y diarios son los modelos de circulación general y sus salidas para diferentes trayectorias. En esta tesis se utilizaron los escenarios más recientes RCPs, que sustituyeron a los escenarios de emisiones del AR4 del IPCC (IPCC, 2013).

2.5.1 Escenarios de Cambio Climático

La base de datos que se consultó fue la del CMIP5 (<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>), que agrupa un conjunto de modelos, los cuales generan salidas con los nuevos escenarios RCPs. Dichas salidas fueron utilizadas directamente para proyectar los posibles cambios en las temperaturas extremas (Tmin y Tmax) y sus eventos extremos.

Los escenarios RCPs definidos son cuatro:

RCP8.5: Fue desarrollado por el equipo de modelación MESSAGE e *Integrated Assessment Framework del International Institute for Applied Systems Analysis* (IIASA) de Austria. Este RCP se caracteriza por el incremento de emisiones de gases de efecto invernadero durante un tiempo representativo, encierra altos niveles de concentraciones de estos gases.

RCP6.0: El equipo de modelación AIM (*Asian Pacific Integrated Model*) del *National Institute for Environmental Studies* (NIES) de Japón desarrolló este RCP. Es un escenario de estabilización donde el forzamiento radiativo total se estabiliza después de 2100 sin exceso, por el uso de tecnologías y estrategias para reducir emisiones de gases de efecto invernadero.

RCP4.5: Fue desarrollado por el equipo de modelación MiniCAM del *Joint Global Change Research Institute* (JGCRI) que pertenece al *Pacific Northwest National Laboratory* de Estados Unidos. Este RCP es un escenario de estabilización donde el forzamiento radiativo total se estabiliza antes de 2100.

RCP2.6: Fue desarrollado por el equipo de modelación IMAGE de la Agencia de Evaluación Ambiental de Holanda. Cuenta con niveles bajos de concentraciones de gases de efecto invernadero. Su nivel de forzamiento radiativo primero alcanza un valor alrededor de 3.1 W/m^2 a mitad de siglo, para posteriormente retornar a 2.6 W/m^2 para el 2100. Para alcanzar tales niveles de forzamiento radiativo, las emisiones de gases de efecto invernadero se reducen substancialmente en este tiempo.

En la tabla 2.5.1 se describen las concentraciones representativas para cada RCP.

Tabla 2.5.1. Concentraciones representativas de los RCPs

RCP	Descripción
RCP8.5	El creciente forzamiento radiativo llega a 8.5 W/m ² (~1370 ppm CO ₂ eq) para 2100.
RCP6.0	Estabilización sin exceder a 6.0W/m ² (~850 ppm CO ₂ eq) y una estabilización de 2100
RCP4.5	Estabilización sin exceder a 4.5 W/m ² (~650 ppm CO ₂ eq) y una estabilización después de 2100
RCP2.6	Pico en el forzamiento radiativo de ~3 W/m ² (~490 ppm CO ₂ eq) antes de 2100 y entonces hay un declive (el declive es a 2.6 W/m ² para 2100)

Fuente: Van Vuuren *et al*, 2011.

Los RCPs utilizados en esta investigación fueron RCP8.5 y el RCP4.5, por tener una representación extrema y moderada, respectivamente. Los horizontes para proyectar fueron 2015-2039 y 2075-2099 en el caso de Tmax y Tmin mensuales. Para eventos extremos el horizonte 2050-2099, ya que se requiere de un mayor periodo para poder tener un amplio registro de este tipo de eventos.

2.5.2 Selección de Modelos

Los modelos seleccionados para esta investigación fueron seleccionados de acuerdo a trabajos previos en México. En específico de aquel que se desprende de la Cuarta Comunicación Nacional (Conde & Gay, 2008). Ellos hicieron una selección de tres modelos válidos para México, siguiendo los criterios desarrollados por el del IPCC-TGICA (2007), los cuales se enumeran a continuación:

- 1) Consistencia a nivel regional con las proyecciones globales.
- 2) Plausibilidad física y realismo.
- 3) Información apropiada para las evaluaciones de impactos.
- 4) Representatividad del rango potencial de cambio climático regional.
- 5) Actualidad de las simulaciones (uso de experimentos numéricos más recientes).
- 6) Resolución espacial, la más alta resolución la tiene la última generación de modelos.
- 7) Validez, que reproduzcan en lo posible el clima observado.
- 8) Representatividad de sus resultados (seleccionar salidas de modelos que den un rango representativo de los posibles cambios futuros).
- 9) Comparabilidad con estudios anteriores.
- 10) Ser útiles para los estudios de impacto, vulnerabilidad y adaptación.

Conde & Gay (2008), considerando el criterio de representatividad sugerido por el TGICA-IPCC, eligieron 3 modelos que fueran capaces de representar el rango de incertidumbre. En este caso se eligieron 3 modelos el ECHAM5, HADGEM1 y GFDLCM2.0, con los escenarios de emisión A1B, A2, B1 y B2. Los 3 primeros fueron tomados como referencia del AR4 y el B2, porque se había usado en estudios anteriores (Conde & Gay, 2008).

Esta evaluación fue importante porque no hubo una selección arbitraria de modelos a utilizar, sino que hay un fundamento. Por tanto en esta investigación se decidió considerar dos de los modelos seleccionados por Conde & Gay (2008). Aunque en sus versiones actualizadas y disponibles en el CMIP5. Dado que para el análisis de eventos extremos es necesario utilizar datos diarios, la disponibilidad de estos para los diferentes modelos también fue fundamental.

2.5.3 Metodología a Seguir con Cambio Climático

La metodología seguida para realizar el análisis de Tmax, Tmin y sus eventos extremos en el contexto de cambio climático fue la siguiente:

1. Selección de modelos. Los modelos seleccionados fueron el GFDLCM3 (*Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Coupled Model 3*) y el MPI-ESM-LR (*Max Planck Institute Earth System Model running on Low Resolution grid*), versiones anteriores de estos modelos se han usado en estudios de cambio climático en México (Conde & Gay, 2008). Incluso fueron seleccionados y utilizados en la actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de la Quinta Comunicación Nacional (Cavazos *et al.*, 2012a, Cavazos *et al.* 2012b).
2. Horizontes seleccionados. Para proyecciones mensuales fueron 2015-2039 y 2075-2099, en el caso de los extremos fue de 2055-2099. Las trayectorias seleccionadas fueron RCP4.5 y RCP8.5, para observar las proyecciones moderada y de mayor forzamiento, respectivamente.
3. Descarga de datos. Los datos de las proyecciones fueron obtenidas directamente de la página del CMIP5: <http://pcmdi9.llnl.gov/esgf-web-fe/> para datos diarios de temperatura máxima y temperatura mínima.
4. Como un primer filtro de confiabilidad, se comparó la climatología 1961-1990 de las series homogéneas observadas y la histórica de cada modelo. Se utilizó el rango de $\pm\sigma$. Así se determinó si los modelos representaban a lo observado o qué grupos eran mejor representados.
5. Con las regiones seleccionadas resultado del punto 4, nuevamente se hizo la comparación pero ahora con las series mensuales observadas de los meses de enero, abril, julio y octubre. Los criterios para la selección fueron: 1) que la mayor cantidad de valores y/o el rango de incertidumbre de la serie del modelo, estuviera dentro del

rango de $\pm\sigma$ de la serie mensual observada; 2) la variabilidad interanual de la serie del modelo debía comportarse, por lo menos, en un 50% igual a la observada.

6. A las series de proyecciones (horizontes: 2015-2039 y 2075-2099, y trayectorias: RCP4.5 y RCP8.5) de los grupos seleccionados, se les ajustó una tendencia con el método de la sección 2.3.
7. Para el caso diario, se calcularon los índices de noches cálidas, noches frías y días fríos para las series históricas de los modelos seleccionados del punto 5. Tales series se compararon con las series observadas de los índices, de acuerdo a los criterios del punto 5. De esta manera se determinó cuales grupos se emplearían en el análisis por ser los mejores representados por los modelos.
8. Se calcularon los índices para los grupos seleccionados con las trayectorias de los RCP4.5 y RCP8.5, para el horizonte 2055-2099.
9. Por medio de histogramas se comparó el cambio de número de días cálidos, noches frías y noches cálidas, observados y proyectados.

3 Resultados de Tendencias Observadas de Temperatura y Eventos Climáticos Extremos

Los resultados del capítulo que corresponden al análisis de datos observados se enfocarán en tres puntos principales:

- El primero de ellos está relacionado con la descripción del comportamiento de la temperatura en cada una de las estaciones seleccionadas de los grupos definidos. La climatología es una parte fundamental ya que los eventos extremos van a depender de las características climáticas de cada región. Aquí se podrá observar, por ejemplo, los rangos de temperatura entre grupos.
- El segundo punto está enfocado en el análisis de tendencias de la temperatura máxima y mínima. Se presentará lo obtenido al aplicar el modelo de regresión lineal a las series de datos anuales y mensuales de las variables a estudiar. Con lo anterior se determinó qué regiones en México se están calentando, enfriando o no están sufriendo cambios.
- Finalmente se describirán los resultados obtenidos de realizar el cálculo de índices de eventos climáticos extremos con su ajuste de tendencias. Para detectar aquellos índices que están presentando cambios significativos en los grupos definidos para México.

3.1 Grupos de Estaciones

Douglas (1993) agrupó 92 estaciones climatológicas en 18 divisiones para temperatura media y un periodo de 1947-1988. Para esta investigación se utilizó la base de datos de ERIC III para identificar las 92 estaciones, pero sólo 74 estuvieron disponibles (Tabla 3.1.1 y Figura 3.1.1). La clave actual de las estaciones no corresponde a la registrada por Douglas (en algunos casos ni longitud, latitud o altura), por lo que se buscaron por nombre no por clave. Incluso, algunas estaciones dejaron de funcionar y por tanto sus registros de datos estaban desactualizados.

Tabla 3.1.1 Total de estaciones identificadas en las 18 regiones de Douglas

No.	Región de Douglas	Clave	Nombre de Estación	Latitud °N	Longitud °W	Elevación (msnm)
1	1	3052	San Ignacio, Mulege, B.C.	27.300	-112.867	150
2	2	3005	Cabo San Lucas, San J. C, B.C.	22.883	-109.917	15
3	2	3051	San Felipe, Los Cabos, B.C.	23.100	-109.850	380
4	2	3062	Santiago, Los Cabos, B.C.	23.467	-109.717	125
5	3	26004	Arivechi, Arivechi, Son.	28.933	-109.183	556
6	3	26047	La Dura, Rosario, Son	28.383	-109.550	177
7	3	26032	El Orégano, Hermosillo, Son.	29.233	-110.717	282
8	3	26077	Sahuaripa, Sahuaripa (SMN), Son.	29.050	-109.233	460
9	3	26078	Sahuaripa, Sahuaripa (CFE), Son.	29.050	-109.233	460
10	3	26088	San Pedro de La Cueva, Son.	29.283	-109.733	319
11	3	26101	Tonichi, Soyopa (SMN), Son.	28.583	-109.567	217
12	3	26090	Presa Abelardo Rodríguez, Son	29.083	-110.933	211
13	3	26117	Presa Plutarco E. Calles, Son.	28.983	-109.650	192
14	4	25012	Cosala, Cosala (SMN), Sin.	24.417	-106.700	300
15	4	25015	Culiacán, Culiacán, Sin.	24.817	-107.400	40
16	4	25019	Choix, Choix (DGE), Sin.	26.733	-108.267	225
17	4	25044	Huites, Choix, Sin.	26.900	-108.367	168
18	4	25046	Jaina, Sinaloa (DGE)	25.900	-108.017	200
19	4	25069	Palos Blancos, Culiacán, Sin.	24.933	-107.383	88
20	4	26075	Quiriego, Quiriego, Son.	27.517	-109.250	251
21	4	26102	Tres Hermanos, Navojoa, Son.	27.200	-109.200	85
22	5	8026	Ciudad Cuauhtémoc, Chih.	28.417	-106.850	2010
23	5	8090	La Junta, Temosachic, Chih.	28.750	-107.967	2053
24	5	8208	Temosachic, Chih.	28.950	-107.833	1990
25	6	10027	Francisco I. Madero (SMN), Dgo.	24.467	-104.300	1961
26	6	10029	Guanacevi, Guanacevi (SMN), Dgo.	25.467	-105.967	2300
27	6	10108	Ciudad Lerdo (DGE), Dgo.	25.500	-103.367	1140
28	6	10098	Rodeo, Rodeo (DGE), Dgo.	25.183	-104.533	1526
29	6	10084	Tepehuanes, Tepehuanes, Dgo.	25.300	-105.750	1967
30	7	5044	Cuatro Cienegas (SMN), Coah.	26.983	-102.067	740
31	7	5030	Presa V. Carranza, Coah.	27.533	-100.600	240
32	7	19024	Granja Experimental, N.L.	27.233	-100.150	187
33	7	19055	Salinillas, Anáhuac, N.L.	27.450	-100.117	226
34	7	5047	Monclova, Monclova, Coah.	26.900	-101.417	586
35	7	5032	Ramos Arizpe (SMN), Coah.	25.533	-100.983	1494
36	7	5048	Saltillo, Saltillo (DGE), Coah.	25.417	-101.000	1589
37	8	28028	El Barretal, Padilla, Tamps.	24.100	-99.133	196
38	8	28123	Burgos, burgos (SMN), Tamps.	24.950	-98.783	193
39	8	19039	Las Enramadas, N.L.	25.517	-99.517	223
40	8	19048	Montemorelos, N.L.	25.200	-99.833	309
41	8	19049	Monterrey, Monterrey (DGE), N.L.	25.683	-100.317	537

42	8	28086	San Fernando, Sn. Fernando, Tamps.	24.850	-98.150	43
43	8	19035	Linares, Linares (DGE), N.L.	24.867	-99.567	350
44	8	28118	Villagrán, Villagrán (SMN), Tamps.	24.483	-99.483	363
45	9	18038	Tepic, Tepic (DGE), Nay.	21.500	-104.883	920
46	9	14096	Mascota, Mascota (SMN), Jal.	20.517	-104.817	1235
47	10	6040	Colima, Colima	19.233	-103.733	498
48	11	16031	Chaparaco, Zamora, Mich.	19.983	-102.283	1633
49	11	14040	Chapala, Chapala, Jal.	20.300	-103.20	1523
50	11	14066	Guadalajara, Guadalajara, Jal.	20.717	-103.383	1583
51	11	14147	Tepatitlán, Jal.	20.817	-102.767	1746
52	11	16141	Yurecuaro, Yurecuaro, Mich.	20.340	-102.248	1534
53	11	16048	Zamora, Zamora (DGE), Mich.	20.000	-102.383	1567
54	12	9012	Col. Escandón, D.F.	19.500	-99.133	2245
55	12	13084	Presa Requena, T. del R., Hgo.	19.950	-99.317	2109
56	12	11064	San Diego de la Unión, Gto.	21.467	-100.867	2080
57	13	17005	Cuautla, Cuautla (DGE), Mor.	18.800	-98.950	1309
58	13	17004	Cuernavaca, Cuernavaca, Mor.	18.917	-99.250	1529
59	13	21063	Piaxtla, Piaxtla, Pue.	18.200	-98.250	1155
60	14	24001	Agua buena, Tamasopo, S.L.P.	21.950	-99.383	372
61	14	28002	Ahualulco, Gómez Farías, Tamps.	22.950	-99.133	100
62	14	28097	Santa Elena, Mante (SMN), Tamps.	22.533	-98.933	50
63	14	13021	Orizatlan, Orizatlan, Hgo.	21.183	-98.617	210
64	15	20014	Cantón, C. Lucas Ojitlan, Oax.	18.017	-96.283	42
65	15	20113	San Juan del Rio, Oax.	17.432	-95.830	122
66	15	30179	Teocelo, Teocelo, Ver.	19.383	-96.967	1218
67	15	20175	Valle Nacional, Valle N., Oax	17.783	-96.317	65
68	16	20068	Matías Romero, Matías Romero, Oax.	16.883	-95.033	201
69	17	7175	Villa Flores (SMN), Chs.	16.033	-93.267	857
70	18	4041	Chamotón, Chamotón (DGE), Camp.	19.350	-90.717	2
71	18	4034	Xcupil (A. Holcatzin), Camp.	19.717	-89.850	65
72	18	4066	Xcupil, Hopelchen, Camp.	19.700	-89.867	130
73	18	31044	Mérida, Mérida (DGE), Yuc.	20.983	-89.633	22
74	18	31033	Tekax de Álvaro Obregón, Yuc.	20.200	-89.300	11

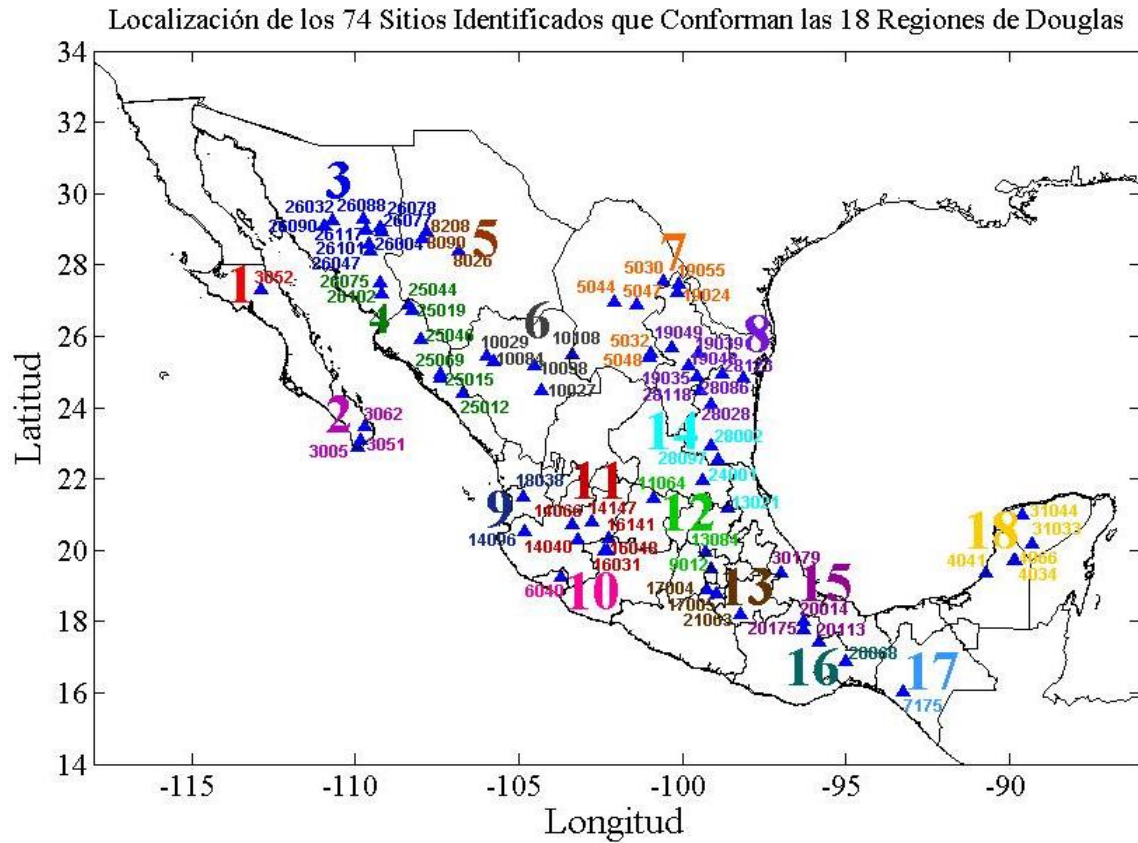


Figura 3.1.1 Localización de las 74 estaciones disponibles que conforman las 18 divisiones de Douglas para temperatura.

Cabe mencionar, que en el estudio original (Douglas, 1993) utilizó sólo 92 estaciones disponibles distribuidas en México, ya que la temperatura es una variable con un comportamiento más uniforme. En el mapa de la figura 3.1.1 se puede observar ausencia de representatividad en algunos estados, por lo que este análisis se consideraría valido para los sitios que conforman cada grupo.

Con la finalidad de revalidar la división de temperatura de Douglas (1993), las estaciones se reagruparon pero ahora con datos más actualizados (con climatología 1961-1990). Se aplicó el método de *cluster* jerárquico para realizar el agrupamiento de las estaciones en grupos. En su mayoría, se reprodujo la división hecha por Douglas (1993) con las 74 estaciones disponibles de las 92 originalmente utilizadas. Incluso en algunos casos el número de *cluster* coincidió con el de la división original (regiones 1-6 y 17-18). Mientras que las otras regiones, aunque no hubo esta coincidencia la mayoría de las estaciones si se agruparon de acuerdo a la misma división. Como resultado del reagrupamiento de las estaciones, algunas de ellas por simplicidad se eliminaron (tabla 3.1.2), ya que estadísticamente no se integraron a la división original. Lo cual

se pudo deber a que el análisis de *cluster* se realizó con datos actuales de las variables de Tmed, latitud y longitud, diferentes a los que Douglas (1993) utilizó. Finalmente se concluyó que 18 grupos eran adecuados, rescatándose la mayor parte de las estaciones en cada región.

Tabla 3.1.2. Estaciones descartadas por medio de *cluster*

Grupo	Clave	Nombre de Estación	Latitud °N	Longitud °W	Elevación (msnm)
6	10108	Ciudad Lerdo (DGE), Dgo.	25.500	-103.367	1140
6	10098	Rodeo, Rodeo (DGE), Dgo.	25.183	-104.533	1526
7	5032	Ramos Arizpe (SMN), Coah.	25.533	-100.983	1494
7	5048	Saltillo, Saltillo (DGE), Coah.	25.417	-101.000	1589
13	21063	Piactla, Piactla, Pue.	18.200	-98.250	1155
14	24001	Agua buena, Tamasopo, S.L.P.	21.950	-99.383	372
15	20014	Cantón, C. Lucas Ojitlan, Oax.	18.017	-96.283	42
15	20113	San Juan del Rio, Oax.	17.432	-95.830	122
15	20175	Valle Nacional, Valle N., Oax	17.783	-96.317	65

Posteriormente se seleccionaron aquellas estaciones cuyas series de datos de Tmax y Tmin diarias con registros disponibles en la base de datos CLICOM y con periodos de tiempo lo más largos posibles. De esta manera 44 estaciones cumplieron con este criterio (Tabla 3.1.3).

Tabla 3.1.3. Estaciones con registros en la base de CLICom

No	Grupo	Clave estación	inicio	fin
1	1	3005	1951-01	2007-12
2	2	3051	1939-02	2007-12
3	2	3052	1939-01	2007-12
4	2	3062	1939-02	2007-12
5	3	26004	1961-01	2008-02
6	3	26032	1941-06	2007-12
7	3	26075	1927-07	2007-11
8	3	26077	1945-01	2007-11
9	3	26101	1945-07	1998-10
10	4	25015	1961-01	2008-10
11	4	25019	1953-01	2004-11
12	4	25044	1961-01	2004-07
13	4	25046	1942-03	2008-10
14	4	26102	1943-01	2007-12
15	5	8026	1942-01	2003-12
16	5	8090	1936-04	1993-12
17	6	10027	1932-03	2006-06
18	7	5030	1965-06	1998-12
19	7	5032	1928-01	1995-07
20	7	5048	1949-04	1998-12
21	7	19024	1933-05	2006-11
22	7	19055	1941-01	2006-06
23	8	19035	1948-07	2006-11
24	8	19048	1943-01	2006-06
25	8	19049	1949-01	2001-12
26	8	28028	1948-01	2003-07
27	8	28086	1932-01	2003-06
28	9	14096	1926-05	2007-12
29*	10	----	----	----
30	11	14040	1934-04	2007-12
31	11	14066	1931-01	2007-12
32	11	16031	1948-03	2002-05
33	11	16141	1923-03	2007-12
34	12	11064	1925-01	1998-10
35	13	17004	1955-04	2006-12
36	13	17005	1955-04	2008-08
37	13	21063	1926-01	2006-12

38	14	13021	1942-06	2001-12
39	14	28002	1961-01	2007-05
40	15	20113	1950-04	2006-12
41	15	20175	1961-01	2006-12
42	15	30179	1945-03	2006-12
43*	16	----	----	----
44	17	7175	1933-07	2006-11
45	18	31033	1952-08	2000-12
46	18	31044	1961-01	2000-12

*No hubo datos para la estación representativa en el grupo.

Por la escasa calidad de datos en algunas regiones o por la falta de registros fue necesario agregar estaciones vecinas (una por región faltante). Estas estaciones debían tener un mismo comportamiento de temperatura para sustituir a la estación "original". En la tabla 3.1.4 se enlistan las estaciones de cada grupo que se agregaron.

Tabla 3.1.4. Estaciones adicionadas en algunos grupos

Grupo	Clave	Nombre de la Estación	Latitud °N	Longitud °W	Elevación (msnm)
1	3028	La Poza Honda, B.C.S.	25.368	-111.519	80
3	26073	Punta de Agua, Son.	28.444	-110.370	245
10	6013	La Salada, Col.	19.056	-103.786	360
16	20134	Santiago Chivela (DGE), Oax.	16.717	-95.000	210
18	31030	Sotuta (DGE), Yuc.	20.595	-89.005	21

Posteriormente se aplicó el control de calidad a las estaciones con lo cual se eligió la mejor por cada grupo (tabla 3.1.5). Cada estación tenía que ser la más completa, que cubriera un periodo a partir de 1960 a lo más actual y con un comportamiento lo más homogéneo posible. Es decir, se privilegia la calidad de los datos observados sobre la multiplicidad de estaciones en una misma división. Lo anterior con el objetivo de que los resultados de un análisis fuera lo más completos y robustos posibles en cada una de las 18 estaciones. Es claro que hacer consideraciones sobre una sola estación de entre varias en una misma división no garantiza su validez en general; sin embargo las estaciones de una misma división pasaron filtros. Cumplieron con tener climatologías afines, comparadas tanto por inspección ocular con climogramas como por el método de *clusters*; por lo que si las estaciones de un grupo mostraran resultados muy diferentes estaría en otra división.

Por lo anterior la selección se hizo con el supuesto de que todos los sitios que conforma el *cluster* tienen un comportamiento similar de temperatura y por tanto se hace válido tomar una de ellas como representativa.

Tabla 3.1.5. Estaciones seleccionadas en cada grupo

Grupo	Clave	Nombre de la Estación	Latitud °N	Longitud °W	Periodo
1	3028	La Poza Honda, B.C.S.	25.368	-111.519	1960-2005
2	3062	Santiago, Los Cabos, B.C.S.	23.467	-109.717	1960-2007
3	26073	Punta de Agua, Son.	28.444	-110.370	1960-2007
4	26075	Quiriego, Quiriego, Son.	27.517	-109.250	1960-2007
5	8090	La Junta, Temosachic, Chih.	28.750	-107.967	1960-1993
6	10027	Francisco I. Madero (SMN), Dgo.	24.467	-104.300	1960-2005
7	19024	Granja Experimental, N.L.	27.233	-100.150	1960-2006
8	28028	El Barretal, Padilla, Tamps.	24.100	-99.133	1960-2002
9	14096	Mascota, Mascota (SMN), Jal.	20.517	-104.817	1960-2007
10	6013	La Salada, Col.	19.056	-103.786	1964-2010
11	14040	Chapala, Chapala, Jal.	20.300	-103.200	1960-2007
12	11064	San Diego de la Unión, Gto.	21.467	-100.867	1960-1998
13	17004	Cuernavaca (DGE), Mor.	18.677	-99.085	1960-2006
14	28002	Ahualulco, Gómez Farías, Tamps.	22.950	-99.133	1961-2006
15	30179	Teocelo, Teocelo, Ver.	19.383	-96.967	1960-2006
16	20134	Santiago Chivela (DGE), Oax.	16.717	-95.000	1960-1994
17	7175	Villa Flores (SMN), Chs.	16.033	-93.267	1961-2006
18	31030	Sotuta (DGE), Yuc.	20.595	-89.005	1960-2000

3.2 Climatología: 18 Grupos

La climatología de cada uno de los grupos será descrita de acuerdo al comportamiento a través del año (ciclo anual) de las variables de temperatura máxima y mínima. Fueron utilizadas las normales climatológicas 1961-1990 del SMN (Servicio Meteorológico Nacional), el periodo de 30 años es el establecido por la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

En la figura 3.2.1 se muestran el mapa de México con la localización de cada una de las estaciones seleccionadas y que fueron utilizadas para los análisis de esta investigación.

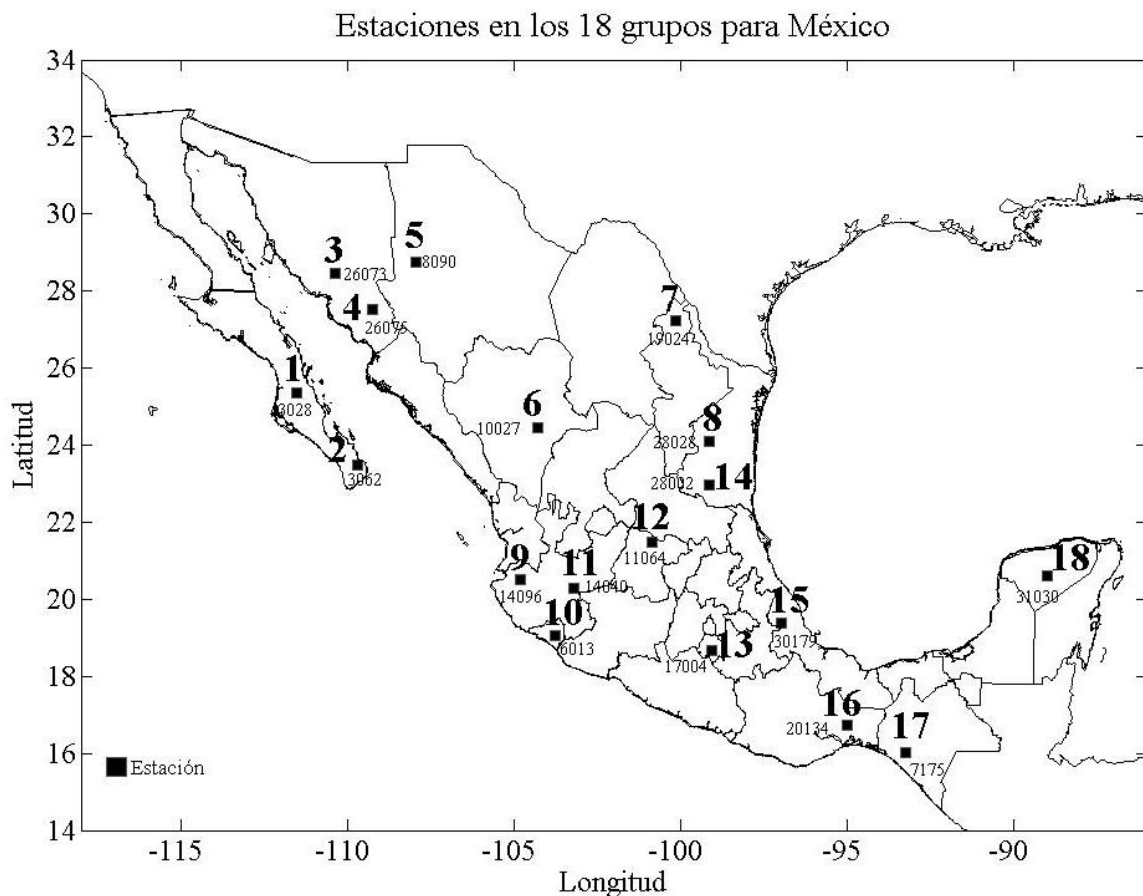


Figura 3.2.1. Localización de estaciones seleccionadas en cada uno de los 18 grupos para México.

A continuación se hace una descripción de la climatología (1961-1990) a partir de las estaciones seleccionadas de la tabla 3.2.1. En las figuras 3.2.2 y 3.2.3 se despliegan las gráficas de los 18 grupos para Tmax y Tmin promedio mensuales 61-90, respectivamente. Además se describe la relación entre los grupos y la regionalización de Salas (2008), para describir las condiciones climáticas con precipitación.

En la figura 3.2.2 se observa el comportamiento de Tmax a través del año. El grupo G1 está localizado en la Zona Desértica de Baja California Sur, con condiciones de escasa precipitación. En contraste G2 que se ubica en la Zona Húmeda de Baja California Sur. El sur de la Península de Baja California experimenta una transición entre condiciones tropicales y extratropicales, donde el Trópico de Cáncer es el límite geográfico. Esta región está influenciada por el monzón de verano y ciclones tropicales (verano-otoño). En ambas zonas de la Península La Tmax aumenta paulatinamente hasta llegar a temperaturas más cálidas en los meses de junio a octubre, con un solo máximo.

En la Zona del Monzón Mexicano G3 y G4, se caracteriza por la concentración de precipitación durante la temporada de verano en las tierras bajas del lado occidental de la cordillera del Pacífico Norte (Sierra Madre Occidental). Para la precipitación anual total, esta región está limitada al territorio mexicano, por lo que no se extiende más allá de la frontera entre México y Estados Unidos. En ambos grupos se tiene el máximo en junio, decae y en septiembre nuevamente se observa un segundo aumento en la temperatura, para luego descender a partir de octubre.

En la Zona Semiárida del Norte se encuentran G5 y G6. Esta parte de México está aislada por dos cadenas montañosas que actúan como una barrera para las fuentes de humedad, que a su vez facilitan los procesos de lluvia en otras regiones. Hay un máximo de temperatura en el mes de junio, seguido de un decremento de julio hasta diciembre.

En la zona del Noreste se ubican G7 y G8, aquí hay una transición entre condiciones tropicales y extratropicales. Lo anterior implica un descenso de precipitación comparada con la zona que cubre el Golfo de México. Esta región está influenciada por los nortes en el invierno, los vientos alisios y ciclones tropicales en el verano. El máximo de temperatura ocurre en el mes de agosto, para luego descender hasta diciembre.

En la zona denominada como Costas del Pacífico Sur se localizan G10 y G13, estos grupos están influenciados por la Zona Intertropical de Convergencia, los alisios de Sureste, los ciclones tropicales en verano y otoño. Cuenta con escasas precipitaciones en invierno y con dos máximos de temperatura, en abril-mayo y octubre-noviembre.

Los grupos G9, G11 y G12 estarían localizados en el Altiplano Central. Se caracteriza por altas elevaciones que permiten la influencia en el clima local de circulación atmosférica de gran altitud, y que a menudo están limitadas por las barreras montañosas. Esta zona está influenciada de los vientos alisios en verano, el monzón del pacífico, tiene regímenes de lluvias en verano. Los máximos de temperatura ocurren en mayo y agosto.

En la zona de la Huasteca entraría G14, aquí hay una transición de condiciones húmedas a secas. Cuenta con régimen de lluvias en verano y está influenciada por ciclones tropicales en verano y otoño y frentes fríos en invierno. Destaca un mínimo de temperatura en julio.

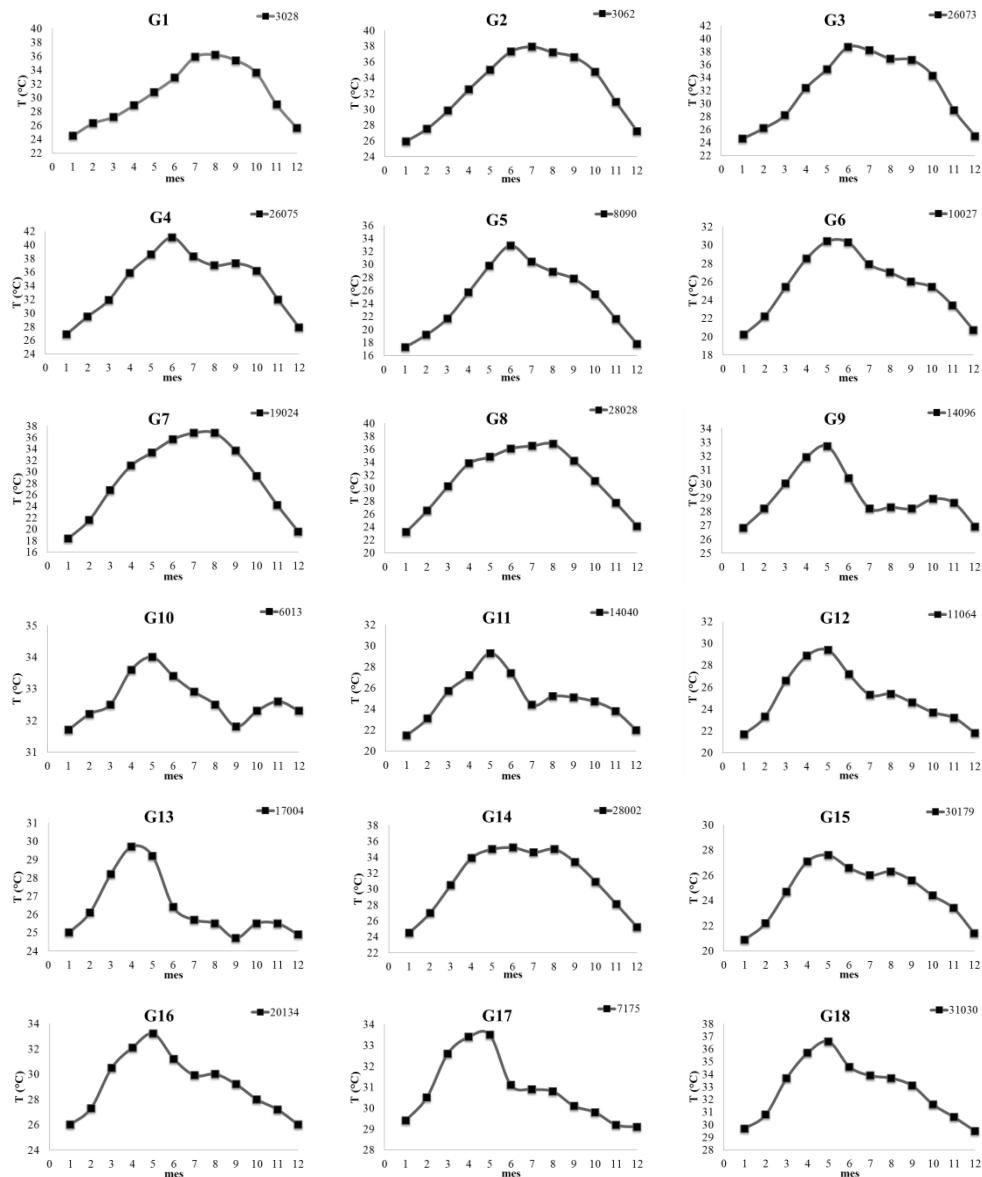


Figura 3.2.2. Temperatura máxima promedio 1961-1990 de cada uno de los 18 grupos para México.

Como parte de la zona de la Costa del Golfo de México se localizan G15 y G16. Estos grupos están influenciados por vientos alisios en el verano, ondas del este y ciclones tropicales tanto en verano como en otoño y los nortes en invierno. Se presentan máximos de temperatura en mayo y agosto.

Finalmente en la zona Sureste se incluyen G17 y G18. Se caracteriza por abundante precipitación y es donde se localizan las áreas de selva tropical. Esta región de México se ve influenciada por la Zona Intertropical de Convergencia, los alisios del sureste, los ciclones tropicales en verano y otoño. Ocurren dos máximos de temperatura, mayo y agosto.

En Tmin (figura 3.2.3), en general, se pueden distinguir dos comportamientos. El primero de ellos sigue una forma tipo campana, el cual se observa en la mayor parte de los grupos de la zona norte de México: G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7, G8 y G14. En el segundo caso se puede apreciar un descenso entre los meses de junio-julio, el cual es más pronunciado a partir de septiembre-octubre. Ocurre en gran parte de los grupos del centro y sur-sureste del territorio: G9, G11, G12, G13, G15, G16, G17 y G18)

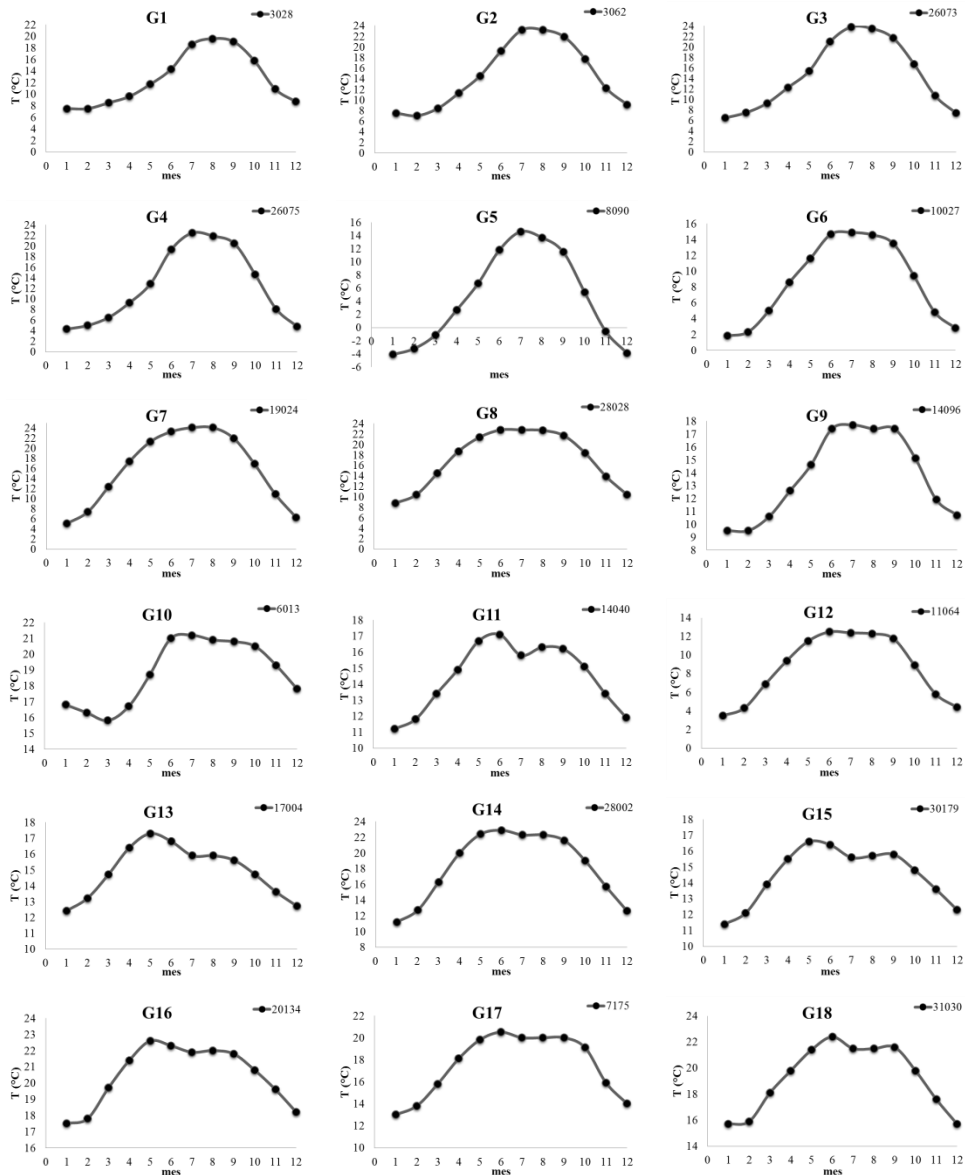


Figura 3.2.3. Temperatura mínima promedio 1961-1990 de cada uno de los 18 grupos para México.

Cabe destacar el grupo G5 el cual es el único que presenta T_{min} negativas. En este grupo es donde posiblemente se tienen las T_{min} más frías.

En la tabla 3.2.1 se muestran algunas de las temperaturas representativas para cada uno de los grupos: el promedio anual 61-90, el máximo y mínimo de T_{max} y T_{min}, así como el mes de ocurrencia de estos. De esta manera se puede observar el rango en que se puede encontrar la climatología de cada grupo.

Tabla 3.2.1. Temperaturas representativas para cada uno de los 18 grupos en México

Grupo	Estación	T _{max}					T _{min}				
		61-90	mínimo		máximo		61-90	mínimo		máximo	
			T (°C)	mes	T (°C)	mes		T (°C)	mes	T (°C)	mes
1	3028	30.5	24.5	1	36.2	8	12.7	7.5	1-2	19.6	8
2	3062	32.7	25.9	1	37.9	7	14.6	7.0	2	23.2	7-8
3	26073	32.1	24.6	1	38.7	6	14.7	6.5	1	23.8	7
4	26075	34.4	26.9	1	41.1	6	12.5	4.3	1	22.5	7
5	8090	24.9	17.3	1	32.9	6	4.5	-4.1	1	14.6	7
6	10027	25.6	20.2	1	30.4	5	8.7	1.8	1	14.9	7
7	19024	29.0	18.4	1	36.8	7-8	15.9	5.1	1	24.1	7-8
8	28028	31.3	23.2	1	36.8	8	17.2	8.8	1	22.8	6-7
9	14096	29.1	26.8	1	32.7	5	13.7	9.5	1-2	17.7	7
10	6013	32.7	31.7	1	34.0	5	18.8	15.8	3	21.2	7
11	14040	25.0	21.5	1	29.3	5	14.5	11.2	1	17.1	6
12	11064	25.1	21.7	1	29.4	5	8.6	3.5	1	12.5	6
13	17004	26.4	24.9	12	29.7	4	14.9	12.4	1	17.3	5
14	28002	31.1	24.5	1	35.2	6	18.3	11.2	1	22.9	6
15	30179	24.7	20.9	1	27.6	5	14.5	11.4	1	16.6	5
16	20134	29.2	26.0	12-1	33.2	5	20.5	17.5	1	22.6	5
17	7175	30.9	29.1	12	33.5	5	17.5	13.0	1	20.5	6
18	31030	32.8	29.5	12	36.6	5	19.3	15.7	12-1	22.4	6

El rango de temperaturas más cálidas ocurre en los grupos que corresponden al norte y al sureste del país. El grupo G4 tiene el valor más alto de T_{max} con 41.1 °C y también el de promedio anual 61-90 con 34.4 °C. Los grupos que corresponden aproximadamente al centro de México como G9, G11, G12 y G13, tienen una T_{max} que no sobrepasan los 30.0 °C. G10 con la particularidad de no tener mucha variación a través del año, pues su máximo y mínimo se encuentra entre 31.7 °C y 34.0 °C, respectivamente. El mes con el mayor mínimo de T_{max} es

enero, en la mayoría de los grupos. Mientras que los meses más cálidos son abril, mayo, junio, julio y agosto, mayo fue el mes más cálido para 9 de los grupos.

Se puede observar que las mínimas de T_{min}, por lo general, se tienen en los grupos del norte de México (G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7 y G8), que no sobrepasan los 10.0 °C. Aunque incluso sobresale G12 (Altiplano Central), con uno de los mínimos y máximo con valor bajo, 3.5 °C (enero) y 12.5 °C (junio), respectivamente. Presencia de frentes fríos y temporada de lluvias, podrían ser las causas de este descenso, incluyendo características geográficas.

El grupo con el mayor mínimo de T_{min} fue G5 (Chihuahua) con -4.1 °C, aquí ocurren las T_{min} más frías. El mes más frío, en la mayor parte de los grupos fue enero (lo mismo que T_{max}). Aunque hubo una variación en G10 donde marzo fue el mes más frío (15.8 °C). Los meses con T_{min} más cálidas tiene variaciones entre los meses de junio, julio, agosto y septiembre, los meses dominantes fueron junio y julio.

Como era de esperarse las regiones del norte de México y del sur fueron las que registraron los mayores valores de T_{max}. Las T_{max} menos cálidas fueron aquellas localizadas en el centro del país. Los grupos con T_{min} más cálidas resultaron ser G16 y G18, los cuales se encuentran en la zona de la Costa del Golfo de México y del Sureste, respectivamente. Aunque algunos de los grupos del norte también registraron T_{min} cálidas, hubo una mayor variación entre los mínimos y máximos.

3.3 Tendencias de Temperaturas Observadas en México

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en los ajustes de tendencias a las series de T_{max} y T_{min} (anuales y mensuales), para la detección de posibles cambios observados en dichas variables. La detección se define como "el proceso que muestra que el clima ha cambiado o no en algún sentido definido estadísticamente, sin tener que aportar una razón para explicar dicho cambio" (<http://www.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-sp.pdf>). Es importante detectar cambios para luego pasar a la parte de atribución, la cual no se aborda en este estudio. El periodo de ajuste para cada grupo es el mostrado en la tabla 3.2.1, tiene variaciones entre grupos, pero es lo que se tiene disponible. De lo contrario este periodo se reduciría y no se tendría registros recientes de entre 2007-2010.

Con el modelo de regresión lineal fueron detectados cambios estructurales en las series de datos, así se tuvieron análisis más completos. Ya que al dividir las series antes y después de un cambio (o cambios) registrado (os), no se mezclan resultados de series diferentes.

3.3.1 Tendencias de Series Anuales

El análisis anual se hizo para poder identificar de manera general, aquellas regiones con tendencias significativas. Esta información proporciona un antecedente sobre el comportamiento de la temperatura en los diferentes grupos, para luego profundizar en el caso por meses.

Las figuras 3.3.1 y 3.3.2, para Tmax y Tmin respectivamente, muestran espacialmente el comportamiento de las tendencias. Son representadas por símbolos "▲" que es de incremento y "▼" es de decremento, el tamaño indica visualmente su magnitud. Además, "NS" significa que el cambio no es significativo, con un intervalo de confianza del 95%.

En el mapa de la figura 3.3.1 se observa que en la mayoría de los 18 grupos no hay tendencias significativas en Tmax anual (G5, G7, G8, G13, G14, G16 y G18). En 6 de los grupos hay una tendencia de incremento (G3, G4, G9, G12, G15 y G17), mientras que en las 5 restantes es de decremento (G1, G2, G6, G10 y G11). En el mapa sobresale el grupo G4 que cuenta con la mayor magnitud positiva del coeficiente de tendencia a partir de 1990 (0.247 °C/año). Le sigue G17 (0.100 °C/año) y finalmente G6 con el mayor descenso de temperatura -0.111 °C/año.

En Tmin anual (figura 3.3.2), la mayor parte de los grupos tuvieron cambios significativos. Sólo 4 de ellos no fueron significativos: G2, G4, G12 y G15. Destacan los grupos G5 y G17 con la mayor magnitud de coeficiente positivo 0.073°C/año y 0.068°C/año, respectivamente. También los grupos G10 (-0.132 °C/año) y G1 (-0.092 °C/año) con una tasa de cambio mayor de decremento.

G17 tiene un incremento en la Tmax como en Tmin, cuya magnitud es de las mayores en ambos casos. Lo contrario ocurre con G1 y G6 donde hay un decremento en Tmax y de Tmin sólo para G1, por lo que hubo una mayor cantidad de cambios para Tmin que para Tmax.

En Tmax, 6 de los grupos presentan quiebres en las series en su mayoría de cambio de tendencia: G4:1990, G5:1982 (año de "El Niño"), G7:1989 (año de "La Niña"), G10:2003, G13:1994 y G9: 1972 y 1978. Mientras que para Tmin, 7 hay cambios principalmente en el valor de la media: G4:1977, G5:1984, G8:1990, G9: 1994, G12:1966 (año de "El Niño"), G15:1980 y G17:1988 (año de "La Niña").

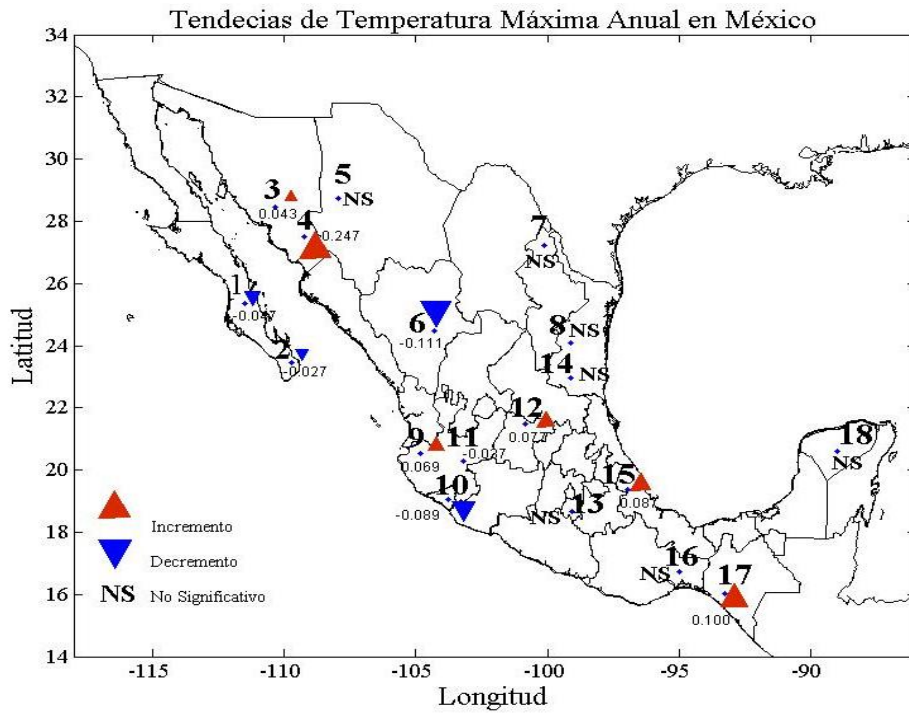


Figura 3.3.1. Mapa que ilustra el comportamiento de las tendencias anuales de Tmax para los 18 grupos. Nivel de confianza del 95%.

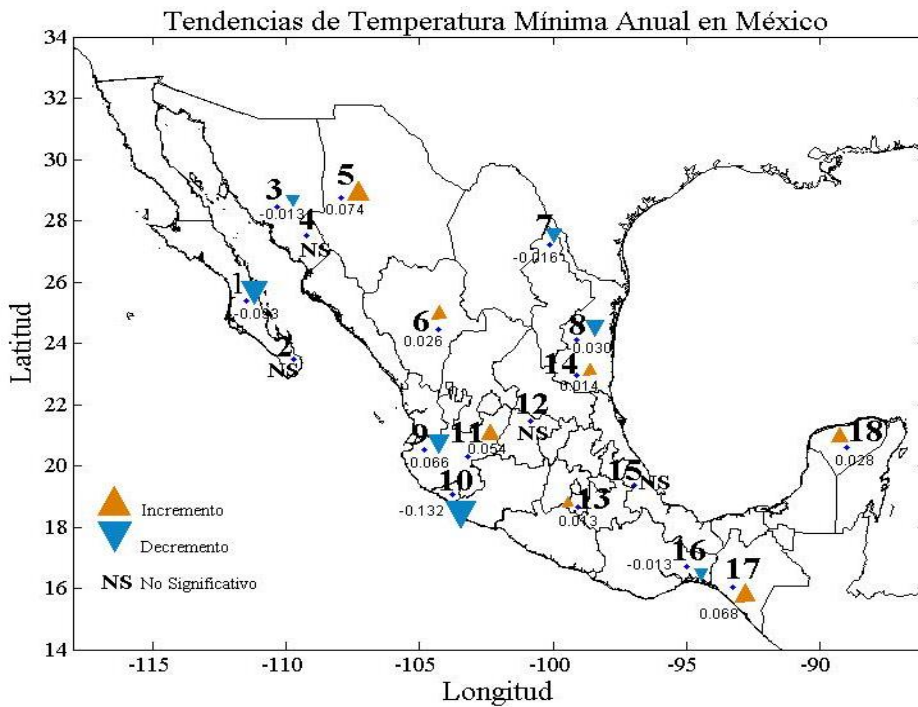


Figura 3.3.2. Mapa que ilustra el comportamiento de las tendencias anuales de Tmin para los 18 grupos. Nivel de confianza del 95%.

En las tablas 3.3.1 y 3.3.2, se muestra con mayor detalle los valores de los coeficientes del modelo de regresión lineal. En este caso el de "C" que corresponde a la media del modelo y "trend" como la tendencia, y el de sus respectivos cambios estructurales.

En ambos casos, la primera columna indica el grupo y la segunda a la estación seleccionada por cada grupo. La tercera hace referencia al valor del coeficiente de la media en la regresión con su valor inicial (es decir sin cambio o valor neto). Las columnas cuarta y quinta muestran los cambios estructurales (año de ocurrencia y valor) en la media y en la pendiente, respectivamente. La sexta columna indica los *outliers* ajustados en la ecuación de regresión lineal. Las columnas séptima y octava corresponden a valores referentes a la tendencia, y estos corresponden al valor de tendencia inicial (valor neto) y tendencia final (el valor es el mismo de la séptima columna si no hay cambios estructurales), respectivamente. La novena columna es el valor de la probabilidad de la tendencia final y la décima columna indica si hubo cambios significativos "SI" (SI (+) tendencia positiva, SI (-) tendencia negativa) o no "NS", si no fue significativo el cambio.

En las tablas se observa que muchos de los *outliers* ocurren en la década de los ochenta y noventa. Probablemente durante estas décadas se presentaron valores de temperaturas críticas que aún con el promedio anual conservaron su efecto. Lo cual se podría verificar con los análisis posteriores. Algunos de los *outliers* que sobresalen son aquellos que ocurrieron en años de "El Niño" como en 1997-1998 (G6, G8, G9 y G15), notándose la posible influencia del fenómeno en estas regiones.

En el caso de T_{min} anuales los *outliers* ajustados también muestran una mayor ocurrencia en la década de los ochenta y noventa, aunque hay pocas coincidencias en los años respecto a T_{max}.

Ahora que se identificaron los casos anuales sobresalientes con el análisis mensual se podrá determinar en qué meses del año ocurrieron cambios significativos.

Tabla 3.3.1. Resumen de valores de coeficientes en el modelo de regresión lineal para Tmax anual

Temperatura Máxima Anual									
Grupo	Estación	C(i) [°C]	CE C	CE Tendencia	Outliers	Tendencia (i) [°C/año]	Tendencia(f) [°C/año]	Prob(<0.05)	Significancia
1	3028	31.49	-----	-----	D87=3.482 D89=-3.224	-0.047	-0.047	0.000	SI(-)
2	3062	31.14	-----	-----	D64=-1.433 D75=-0.934 D07=1.336	-0.027	-0.027	0.000	SI(-)
3	26073	30.75	-----	-----	D62=0.866 D72=1.438 D91=-3.177	0.043	0.043	0.000	SI(+)
4	26075	33.70	D1990=-2.876	D1990=0.195	D84=-1.448 D06=-2.838 D07=-4.285	0.052	0.247	0.002	SI(+)
5	8090	24.59	-----	D1982=-0.235	D60=3.213 D83=2.709	0.032	-0.203	0.058	NS
6	10027	30.69	-----	-----	D87=-2.109 D98=1.207 D99=1.018	-0.111	-0.111	0.000	SI(-)
7	19024	29.23	D1989=1.560	D1989=0.054	D66=-1.821 D76=-1.939	-0.018	0.036	0.168	NS
8	28028	31.51	-----	-----	D98=1.889 D99=2.007	-0.018	-0.018	0.086	NS
9	14096	26.93	D1972=-0.815 D1978=-0.581	-----	D85=-1.064 D89=1.659 D97=-1.195	0.069	0.069	0.000	SI(+)
10	6013	29.98	D1976=0.655	D2003=-0.112	D92=-0.902 D93=-0.879	0.023	-0.089	0.008	SI(-)
11	14040	28.25	-----	-----	-----	-0.037	-0.037	0.000	SI(-)
12	11064	21.42	-----	-----	-----	0.077	0.077	0.000	SI(+)
13	17004	26.82	-----	D1994=0.148	D63=-2.775 D65=-1.148	-0.014	0.135	0.097	NS
14	28002	31.16	-----	-----	-----	-0.003	-0.003	0.651	NS
15	30179	24.29	-----	-----	D98=1.412	0.087	0.087	0.000	SI(+)
16	20134	28.96	-----	-----	-----	0.019	0.019	0.071	NS
17	7175	28.83	-----	-----	-----	0.100	0.100	0.000	SI(+)
18	31030	33.59	-----	-----	-----	0.008	0.008	0.302	NS

Grupo: N, N=1, ..18

Estación: Numero de estación seleccionada por grupo

C(i): Media de Tmax sin cambios, i=inicial

CE C: Cambio estructural (CE) en la media (año (Dnnnn) y valor; nnnn=1990, etc.)

CE Tendencia: Cambio estructural (CE) en tendencia (año (Dnnnn) y valor)

Outliers: Observaciones atípicas (año (Dnn) y valor; nn=90 año 1990, etc.)

Tendencia (i): Valor del coeficiente de tendencia, primer ajuste (sin nuevos coeficientes en la regresión lineal)

Tendencia (f): Valor del coeficiente de tendencia, con nuevo ajuste (introduciendo nuevos coeficientes en la regresión lineal, o bien mismo valor de Tendencia (i) si no hay un nuevo ajuste).

Prob (<0.05): Probabilidad con nivel de confianza del 95%, valor<0.05 es significativa la tendencia.

Significancia: SI(+) es significativa de incremento, SI(-) es significativa de decremento y NS es no significativa, sin cambios significativos.

Tabla 3.3.2. Resumen de valores de coeficientes en el modelo de regresión lineal para Tmin anual

Temperatura Mínima Anual									
Grupo	Estación	C(i) [°C]	CE C	CE Tendencia	Outliers	Tendencia (i) [°C/año]	Tendencia (f) [°C/año]	Prob(<0.05)	Significancia
1	3028	15.60	-----	-----	D87=3.404 D89=-3.511	-0.093	-0.093	0.000	SI (-)
2	3062	14.72	-----	-----	D02=1.736	-0.004	-0.004	0.556	NS
3	26073	16.03	-----	-----	D89=-1.440 D91=-3.513 D03=-1.454	-0.013	-0.013	0.008	SI(-)
4	26075	14.35	D1977=1.096	-----	D89=3.302	-0.002	-0.002	0.889	NS
5	8090	4.39	-----	D1984=0.158	D64=-1.251 D78=1.136 D93=-2.517	-0.085	0.074	0.001	SI(+)
6	10027	6.58	-----	-----	-----	0.026	0.026	0.000	SI(+)
7	19024	16.80	-----	-----	D80=-1.774	-0.016	-0.016	0.030	SI(-)
8	28028	17.63	D1990=1.013	-----	-----	-0.030	-0.030	0.002	SI(-)
9	14096	14.57	D1994=0.569	-----	D91=-1.511 D92=-1.245	-0.066	-0.066	0.000	SI(-)
10	6013	23.39	D1988=-0.897	D1988=-0.033	-----	-0.099	-0.132	0.004	SI(-)
11	14040	13.21	-----	-----	-----	0.054	0.054	0.000	SI(+)
12	11064	8.46	D1966=-0.583	-----	-----	0.009	0.009	0.163	NS
13	17004	14.71	-----	-----	-----	0.013	0.013	0.009	SI(+)
14	28002	18.06	-----	-----	D06=-2.301	0.014	0.014	0.007	SI(+)
15	30179	14.22	D1980=0.968	-----	D67=1.668 D73=1.246	-0.013	-0.013	0.167	NS
16	20134	20.70	-----	-----	D85=-0.582	-0.013	-0.013	0.004	SI(-)
17	7175	13.30	D1988=1.426	-----	D71=-2.878 D02=2.100	0.068	0.068	0.000	SI(+)
18	31030	19.89	-----	-----	-----	0.028	0.028	0.000	SI(+)

Grupo: N, N=1, ..18

Estación: Numero de estación seleccionada por grupo

C(i): Media de Tmin sin cambios, i=inicial

CE C: Cambio estructural (CE) en la media (año (Dnnnn) y valor; nnnn=1990, etc.)

CE Tendencia: Cambio estructural (CE) en tendencia (año (Dnnnn) y valor)

Outliers: Observaciones atípicas (año (Dnn) y valor; nn=90 año 1990, etc.)

Tendencia (i): Valor del coeficiente de tendencia, primer ajuste (sin nuevos coeficientes en la regresión lineal)

Tendencia (f): Valor del coeficiente de tendencia, con nuevo ajuste (introduciendo nuevos coeficientes en la regresión lineal, o bien mismo valor de Tendencia (i) si no hay un nuevo ajuste).

Prob (<0.05): Probabilidad con nivel de confianza del 95%, valor<0.05 es significativa la tendencia.

Significancia: SI(+) es significativa de incremento, SI(-) es significativa de decremento y NS es no significativa, sin cambios significativos.

3.3.2 Tendencias de Series Mensuales

El análisis mensual permite aproximarse más a los probables cambios detectados en la temperatura anual. Para este caso se seleccionaron los meses de enero, abril, julio y octubre, como meses representativos para temporadas frías y cálidas. En el mapa de la figura 3.3.3, se muestra la localización de cada estación representativa.

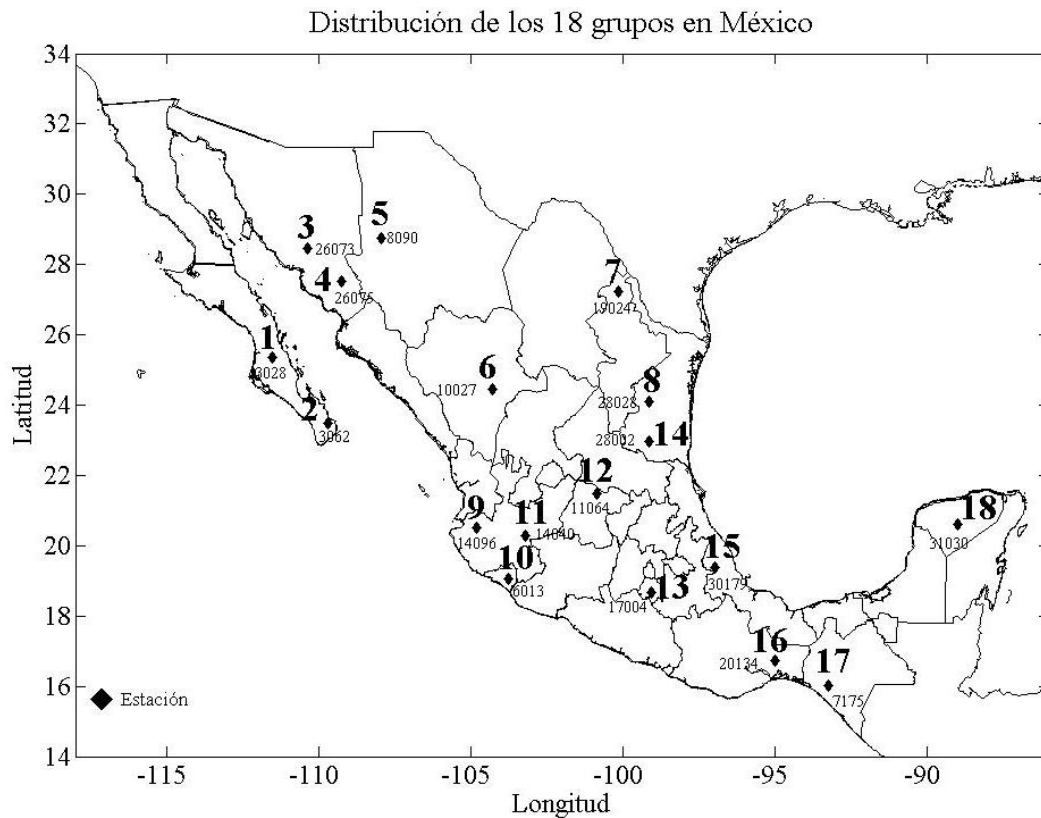


Figura 3.3.3. Distribución de 18 grupos para México, se muestra el lugar donde se localiza la estación seleccionada en cada uno de estos.

Tmax (figura 3.3.4) presenta un comportamiento peculiar en las tendencias. La mayoría de los grupos que se localizan en el norte de México, tienen una tendencia de decremento en alguno de los meses analizados. Lo contrario ocurre en los grupos que corresponden a la zona centro-sur de México, donde el comportamiento es de incremento en Tmax. Hay casos sobresalientes, aquellos donde en los cuatro meses la tendencia es de incremento y/o decremento, o bien donde el valor de la tasa de cambio sobresale por su valor. Incluso se observa en qué grupos la Tmax no cambió.

En G6 todos los meses tienen tendencias negativas, en enero el valor de la tasa de cambio es de -0.113 °C/año, en abril de -0.112 °C/año, en julio de -0.120 °C/año y en octubre -0.094

°C/año. Este comportamiento se reflejó en el caso anual donde la tendencia también fue de decremento. En G11 la tendencia de enero es de -0.030 °C/año, para abril de -0.037 °C/año, en julio de -0.030 °C/año y para octubre -0.049 °C/año, decremento consiste con el caso anual de Tmax.

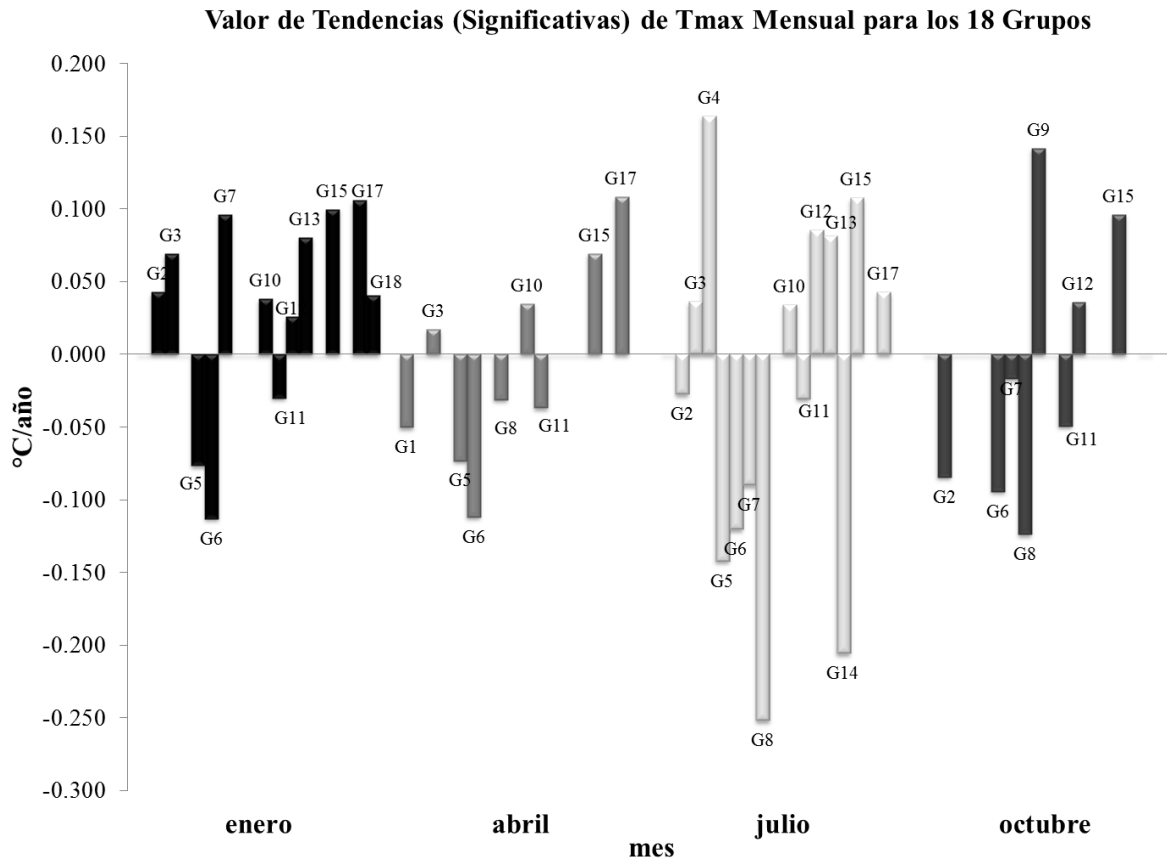


Figura 3.3.4. Gráfica de valores de tendencias significativas de Tmax para los meses de enero, abril, julio y octubre para los 18 grupos en México.

Por otra parte G15 es el único caso de Tmax mensual donde la tendencia es de incremento en los cuatro meses. Enero tiene una tasa de cambio de 0.100 °C/año, en abril la tendencia es de 0.062 °C/año, en julio es de 0.107 °C/año y en octubre se detectó un cambio estructural en la pendiente en 1968. En este último caso la serie se partió en dos, antes y después del cambio. Durante el periodo de 1960-1967 se tuvo una tasa de variación de -0.325 °C/año para posteriormente pasar a un comportamiento positivo con una tendencia de 0.096 °C/año de 1968-2006. Estos resultados son consistentes con lo obtenido anualmente, puesto que Tmax anual tuvo una tendencia de incremento. Es posible que en G15, el posible incremento de temperatura pueda tener efectos negativos por la presencia de temperaturas en promedio más cálidas, y aún más si los extremos se comportan de la misma manera.

En este análisis sobresalen algunos grupos por sus altos valores en las tasas de cambio, positivas y negativas. Entre los que se encuentran G4 que en el mes de julio tuvo una tendencia de $0.164^{\circ}\text{C/año}$, G8 con el valor más negativo de $-0.252^{\circ}\text{C/año}$ seguido de G14 ($-0.205^{\circ}\text{C/año}$). Estos dos últimos grupos son vecinos localizados en el estado de Tamaulipas, el primero aproximadamente al centro del estado y el segundo al sur. Es posible que el decremento de Tmax pueda estar asociado con algún efecto regional.

También es de destacar G9, donde hay un incremento de Tmax en el mes de octubre, uno de los meses fríos. Algo similar ocurre para otros grupos pero durante enero.

G16, es el único caso donde en los cuatro meses analizados no hay cambios significativos (ver figura 3.3.4).

Los grupos con cambios estructurales para enero son: G12 (1968, en la media y en la tendencia), G13 (en la media: 1965 y 1983) y G18 (media y tendencia en 1976). En abril: G5 (1978 en la media y tendencia), G8 (en tendencia y media 1995), G10 (1991 tendencia y media), G13 (1998 en la tendencia) y G17 (1985 y 1988: en la media). Para Julio hay sólo cambios en la media para los grupos: G1, G4, G5, G7, G8, G9, G13, G14 y G17. Además, en el grupo G7 hay un cambio en la tendencia en 1989 (año de "Niña"). Un cambio estructural en 1977 coincide en las regiones G7, G8 y G14, estas regiones son vecinas y corresponden a la región noroeste de México (Nuevo León y Tamaulipas). Para el mes de octubre hay cambios en la tendencia para: G1, G2, G7, G8, G9, G15 y G17. En G7 y G9 coincide un cambio estructural en la media para el año de 1979.

Para Tmin la mayor parte de los grupos que corresponden a la zona norte del país las tendencias de los meses seleccionados en su mayoría son de disminución (figura 3.3.5). Mientras que los de la región centro y sur mayormente hay tendencias de incremento, como en el caso de la Tmax, y en Tmin es predominante.

Los casos más notables se encuentran en los grupos G5 y G10. En G5 en todos los meses analizados se detectaron cambios negativos. En enero la tendencia es $-0.197^{\circ}\text{C/año}$ y en abril de $-0.094^{\circ}\text{C/año}$. En julio se detectó un cambio estructural en 1987 (año de "El Niño") en la pendiente, así que a partir de este año el valor de la tasa de cambio fue de $-0.046^{\circ}\text{C/año}$. Finalmente en octubre la tendencia tuvo un valor de $-0.050^{\circ}\text{C/año}$. Actualmente este grupo sería uno de los más vulnerables, por la presencia de temperaturas más frías. Aunque la Tmin anual indica una tendencia de incremento, es posible que los 8 meses restantes contribuyeran para que la tendencia del promedio anual fuera positiva.

Para G10 el decremento ocurre en los meses de enero, abril y julio. En enero la tasa de cambio es de $-0.141^{\circ}\text{C/año}$. En abril se detectó un cambio estructural en la pendiente dividiendo a la serie en dos periodos. Durante el periodo de 1964-1971 se tuvo una tendencia de -0.323

°C/año y de 1972-2010 fue de -0.153 °C/año, es decir el cambio fue menos abrupto en el segundo periodo de la serie más reciente. Para julio la tasa de cambio tienen un valor de -0.131 °C/año.

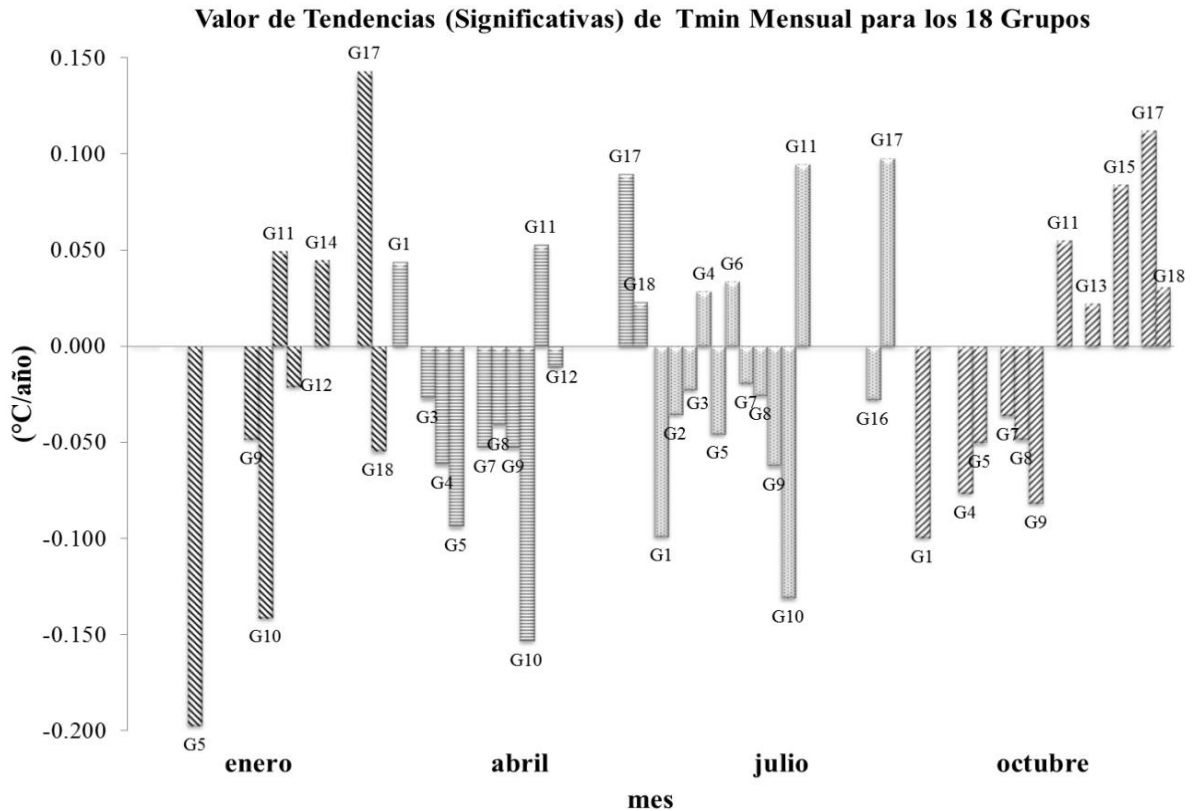


Figura 3.3.5. Gráfica de valores de tendencias significativas de Tmin para los meses de enero, abril, julio y octubre para los 18 grupos en México.

En contraste con Tmax, en G11 la Tmin está aumentando en los cuatro meses. En enero se tiene valor de tendencia de 0.049 °C/año y en abril de 0.050 °C/año. En julio se detectó un cambio estructural en la pendiente en 1974, la tasa de cambio pasó de un valor de 0.029 a 0.094 °C/año (1974-2007), se aceleró el cambio. Finalmente en octubre la tendencia es de 0.054 °C/año. En este grupo las temperaturas siguieron comportamientos en direcciones opuestas, por un lado la Tmax con un decremento y por otra parte un aumento en la Tmin.

En el caso de G17 se tiene incrementos de Tmin en los cuatro meses analizados. En enero la tasa de cambio es de 0.143 °C/año, en abril de 0.089 °C/año, en julio de 0.098 °C/año y en octubre de 0.112 °C/año. Son de los valores más sobresalientes en aumento de Tmin. Este grupo es uno de los cuales la Tmax y Tmin presentaron un aumento anual y mensual.

Hay cambios estructurales para los siguientes grupos:

Enero: G1, G5, G10, G18 (sólo en la media).

Abril: G1, G4, G5, G10, G12 y G15 (hay casos para la media y la tendencia).

Julio: G2, G5, G8, G11, G15, G16 y G18 (hay casos para la media y la tendencia).

Octubre: G4, G8, G9, G10 y G15 (hay casos para la media y la tendencia).

En este caso no se tienen coincidencia en los años donde ocurrieron los cambios estructurales y por tanto relacionar estos cambios con algún fenómeno no es factible.

3.4 Tendencias de Eventos Climáticos Extremos de Temperatura Observados en México

Los índices de eventos climáticos extremos se calcularon con datos diarios, posteriormente se hizo un ajuste de tendencias a las series resultantes. Lo anterior con el objetivo de determinar qué eventos están teniendo cambios y cuáles no. Se utilizó el método de la sección 2.3 para ajuste de tendencias. A continuación se muestran los resultados obtenidos empleando la metodología propuesta.

Para definir cada uno de los índices en cada grupo se calculó el 90o y 10o percentil de Tmax y Tmin diarias, así se definieron umbrales estadísticamente y específicos por grupo. En la tabla 3.4.1 se muestran los umbrales utilizados para definir: los días cálidos (n_1 : 90o percentil de Tmax), noches frías (n_2 : 10o percentil de Tmin) y las noches cálidas (n_3 : 90o percentil de Tmin.)

Tabla 3.4.1 Percentiles calculados para definir días cálidos, noches frías y noches cálidas para cada grupo en México

Grupo	Clave	Nombre de la Estación	Tmax [°C]		
			90o	10o	90o
1	3028	La Poza Honda, B.C.S.	36.8	4.5	18.4
2	3062	Santiago, Los Cabos, B.C.S.	36.2	6.0	23.5
3	26073	Punta de Agua, Son.	39.2	7.5	24.5
4	26075	Quiriego, Quiriego, Son.	40.9	5.7	24.0
5	8090	La Junta, Temosachic, Chih.	32.0	-5.5	13.2
6	10027	Francisco I. Madero (SMN), Dgo.	33.3	-1.0	13.3
7	19024	Granja Experimental, N.L.	37.0	4.6	22.2
8	28028	El Barretal, Padilla, Tamps.	39.2	8.5	24.0
9	14096	Mascota, Mascota (SMN), Jal.	33.0	7.5	19.9
10	6013	La Salada, Col.	33.5	16.0	24.7
11	14040	Chapala, Chapala, Jal.	32.8	10.3	17.6
12	11064	San Diego de la Unión, Gto.	27.5	2.3	13.1
13	17004	Cuernavaca (DGE), Mor.	29.5	11.3	16.8
14	28002	Ahualulco, Gómez Farías, Tamps.	37.5	10.5	23.5
15	30179	Teocelo, Teocelo, Ver.	32.0	9.8	16.7
16	20134	Santiago Chivela (DGE), Oax.	34.0	16.5	23.0
17	7175	Villa Flores (SMN), Chs.	36.0	12.2	20.2
18	31030	Sotuta (DGE), Yuc.	39.8	15.1	24.1

Días Cálidos

El índice calculado que depende de Tmax diaria es el de días cálidos (DC_{n_1}). Este índice es definido como aquellos días donde la Tmax diaria es mayor a un valor " n_1 " de umbral. Se refiere al comportamiento de la cola superior de una distribución de Tmax.

En la figura 3.4.1 se muestra el mapa de tendencias de días cálidos. Se observa sobresalir las regiones del centro-sur y la Península de Baja California y Sonora, donde los eventos de DC se incrementaron. Lo que puede indicar que ocurrió una mayor cantidad de Tmax extremas cálidas. También sobresale G13, donde los días cálidos se incrementaron significativamente 1.521 días/año, esto significa que Tmax diarias por encima 29.5 °C fueron más frecuentes.

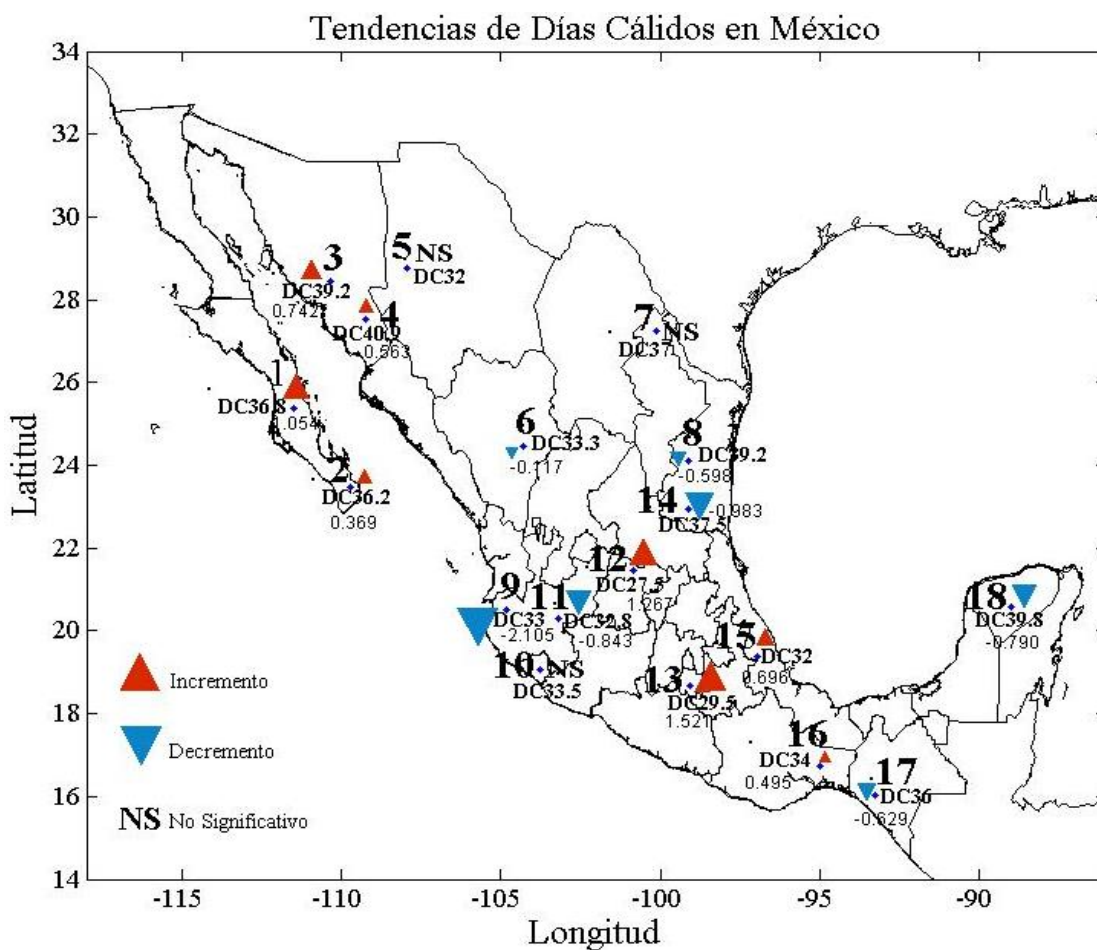


Figura 3.4.1. Comportamiento de las tendencias anuales del índice de días cálidos (DC) para los 18 grupos en México. DC_{n_1} muestra el umbral de Tmax para los días cálidos en cada grupo y debajo de éste el valor de la tendencia significativa, con un nivel de confianza del 95%. El sentido de los triángulos arriba/abajo indica tendencias de incremento/decremento y el tamaño ilustra su magnitud. NS expresa que no hubo cambios significativos en ese grupo.

En el caso del G17; la tendencia de días cálidos indica una disminución (-0.629 días/año). Hay un decremento de la cantidad de Tmax diarias que superaron los 36.0 °C, aunque en promedio no ocurra así.

En G9 se observa un descenso de DC con una tendencia de -2.105 días/año, es la mayor tasa de cambio entre todas los grupos para este índice. La frecuencia con días por encima de 33.0 °C disminuyó.

Los casos de tendencias no significativas únicamente son para G5, G7 y G10. En el caso de G5 aunque no hubo cambios, el valor de la pendiente fue negativo por tanto si este comportamiento continúa podría llegar a ser significativo.

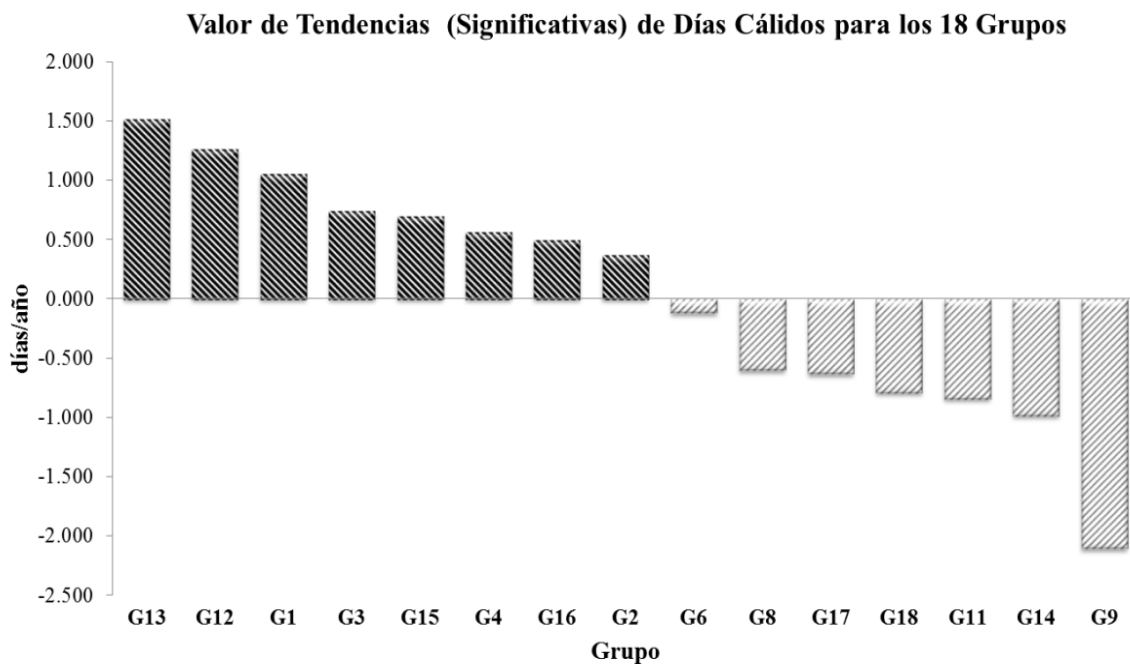


Figura 3.4.2. Gráfica de valores de coeficiente de tendencia significativa en orden descendente, para días cálidos en los 18 grupos de México. Los valores positivos indican incrementos, mientras que los negativos son de decremento.

La figura 3.4.2 muestra en orden descendente los valores de los coeficientes de tendencias significativas para los 18 grupos. Hay tendencias de incremento para 8 grupos y para 7 de decremento, el resto fueron no significativas. La mayor tasa de cambio positiva es para G13 y la más negativa para G9, ambos grupos localizados aproximadamente en el centro del país.

En la tabla 3.4.2 se muestra un resumen de los valores de los coeficientes, así como de *outliers* ajustados y cambios estructurales encontrados para las series de índices de DC.

Tabla 3.4.2. Resumen de valores de los coeficientes del modelo de regresión lineal para los días cálidos

Días Cálidos									
Grupo	Estación	C(i) [días]	CE C	CE Tendencia	Outliers	Tendencia (i) [días/año]	Tendencia(f) [días/año]	Prob(<0.05)	Significancia
1	3028	60.75	D1991=-36.492	D1967=6.037	-----	-4.983	1.054	0.000	SI(+)
2	3062	24.23	-----	-----	D63=22.658 D92=21.951	0.369	0.369	0.003	SI(+)
3	26073	14.28	-----	-----	D00=-35.952 D01=34.307	0.742	0.742	0.000	SI(+)
4	26075	22.64	-----	-----	D90=-34.523	0.563	0.563	0.000	SI(+)
5	8090	37.78	-----	-----	-----	-0.226	-0.226	0.383	NS
6	10027	75.45	D1983=-21.299	D1966=6.165	D73=57.927 D98=27.895	-6.272	-0.117	0.000	SI(-)
7	19024	2.85	D2000=16.355 D2004=-32.060	D1973=2.614	D82=28.901 D88=-28.344	-0.240	2.374	0.312	NS
8	28028	44.11	-----	-----	-----	-0.598	-0.598	0.015	SI(-)
9	14096	61.69	D1989=17.750 D1993=19.945	-----	D68=-28.856 D69=30.249	-2.105	-2.105	0.000	SI(-)
10	6013	25.73	-----	-----	-----	0.209	0.209	0.116	NS
11	14040	54.63	-----	-----	D79=47.382	-0.843	-0.843	0.000	SI(-)
12	11064	11.38	-----	-----	D90=-37.408 D91=31.325 D92=-36.943	1.267	1.267	0.000	SI(+)
13	17004	3.68	-----	-----	D98=37.897 D05=50.252	1.521	1.521	0.000	SI(+)
14	28002	54.88	-----	-----	D80=33.793 D98=41.480	-0.983	-0.983	0.000	SI(-)
15	30179	14.52	-----	-----	D91= 41.913 D98=30.042	0.696	0.696	0.000	SI(+)
16	20134	20.63	-----	-----	D78=52.461	0.495	0.495	0.046	SI(+)
17	7175	20.39	D1991=53.523	-----	D97=128.722 D98=74.351 D02=-31.134 D04=40.123	-0.629	-0.629	0.034	SI(-)
18	31030	50.85	-----	-----	-----	-0.790	-0.790	0.007	SI(-)

Grupo: N, N=1,..18

Estación: Numero de estación seleccionada por grupo

C(i): Media de días cálidos sin cambios, i=inicial

CE C: Cambio estructural (CE) en la media (año (Dnnnn) y valor; nnnn=1990, etc.)

CE Tendencia: Cambio estructural (CE) en tendencia (año (Dnnnn) y valor)

Outliers: Observaciones atípicas (año (Dnn) y valor; nn=90 año 1990, etc.)

Tendencia (i): Valor del coeficiente de tendencia, primer ajuste (sin nuevos coeficientes en la regresión lineal)

Tendencia (f): Valor del coeficiente de tendencia, con nuevo ajuste (introduciendo nuevos coeficientes en la regresión lineal, o bien mismo valor de Tendencia (i) si no hay un nuevo ajuste).

Prob (<0.05): Probabilidad con nivel de confianza del 95%, valor<0.05 es significativa la tendencia.

Significancia: SI(+) es significativa de incremento, SI(-) es significativa de decremento y NS es no significativa, sin cambios significativos.

Algunos de los *outliers* que destacan en los ajustes de las tendencias corresponden a años de "El Niño" intensos, como son los casos de 1982 para G7 y 1998 para G6, G13, G14, G15 y G17. Lo que significa que hubo una gran ocurrencia de días cálidos, aumentó el número de Tmax extremas durante esos años. Para este índice hay pocos cambios estructurales en la media y en la pendiente. En las regiones G1 y G7 hubo un cambio en el comportamiento de la pendiente, primero hubo un decremento de días cálidos seguido de un incremento. Aunque en el caso de G7 la tendencia fue no significativa.

Noches Frías

En la figura 3.4.3 se pueden observar los resultados obtenidos para el índice de noches frías (NF_{n2}). Es el conteo anual de aquellos días cuya Tmin diaria está por debajo de un umbral "n₂", se refiere al comportamiento de la cola inferior de una distribución de Tmin.

En este caso se observa una mayor cantidad de tendencias no significativas, comparadas con los días cálidos (donde solo hubo 3 casos NS). Los grupos donde no hay cambios son: G2, G3, G9, G10, G12, G14, G16 y G17.

Se tienen tendencias de incremento en G5 donde la tasa de cambio es de 0.964 días/año, en este grupo hubo una mayor frecuencia de Tmin diarias por debajo de -5.5°C. En G7 se detectó un cambio estructural en 1984. De 1960-1983 (1983 año de "El Niño") se tuvo un incremento de 1.805 días/año para luego tener una tasa de cambio de 0.339 días/año durante 1984-2006. La ocurrencia de NF disminuyó pero se mantuvo el comportamiento de la tendencia.

Finalmente en G18 se detectó un cambio estructural en la pendiente en 1972. De 1960-1971 la tendencia fue 3.173 días/año y de 1972-2000 tuvo un valor de 0.593 días/año. Hubo un decaimiento pero se conservó el mismo comportamiento de incremento. Aunque aquí el umbral sea de 15.1 °C, la gente que viva en esta región puede resentir el aumento de días por debajo de este umbral, ya que está acostumbrada a temperaturas más cálidas.

Por otra parte, en 7 de los grupos se presenta una disminución de NF: G1, G4, G6, G8, G11, G13 y G15). Mayor ocurrencia de Tmin diarias cálidas.

El mayor decremento de NF se detectó en G1 con una tasa de cambio de -1.301 días/año. Implica una menor ocurrencia de Tmin diarias por debajo de 4.5 °C. Otro caso relevante es G6 donde la tendencia tuvo un valor de -0.955 días/año, lo que implica una menor frecuencia de eventos con temperaturas por debajo de -1.0 °C.

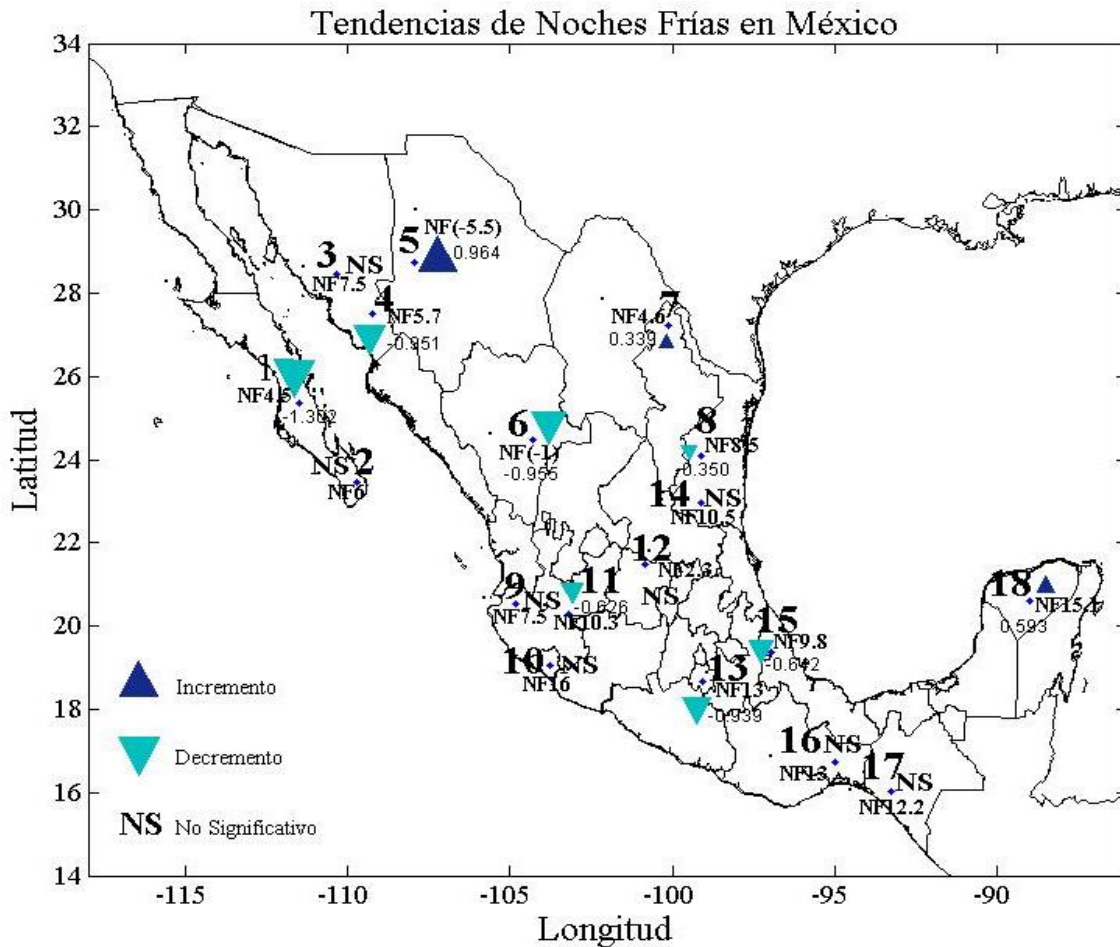


Figura 3.4.3. Comportamiento de las tendencias anuales del índice de noches frías (NF) para los 18 grupos. NF₂ muestra el umbral de T_{min} para las noches frías en cada grupo y debajo de éste el valor de la tendencia significativa, con un nivel de confianza del 95%. El sentido de los triángulos arriba/abajo indica tendencias de incremento/decremento y el tamaño ilustra su magnitud. NS expresa que no hubo cambios significativos en ese grupo.

Un grupo que también destaca es G15, donde en los días cálidos hay un incremento, pero para NF se tiene una disminución significativa. Incluso se detectó un cambio estructural en la pendiente en 1976 (año de "El Niño", pudo implicar T_{min} más cálidas), antes de este cambio la pendiente fue de -1.323 días/año para posteriormente tener un valor de -0.642 días/año. El decremento en el periodo más actual fue menos abrupto que en el periodo anterior. La cantidad de noches por debajo de 9.8 °C fue menos frecuente.

Para este grupo, aunque en T_{min} en promedio no hubo muchos cambios significativos, los cambios en los eventos extremos de NF mostraron una mayor ocurrencia de T_{min} más cálidas.

En la figura 3.4.4 se observan los valores de los coeficientes de tendencias significativas para el caso de las noches frías, están ordenadas de manera decreciente. De las 10 tendencias, sólo 3 tienen incremento, mayor ocurrencia de T_{min} frías. La tasa de cambio con el valor positivo más alto es para G5, mientras que G1 tiene la de mayor decremento, grupos del norte y noreste de México, respectivamente.

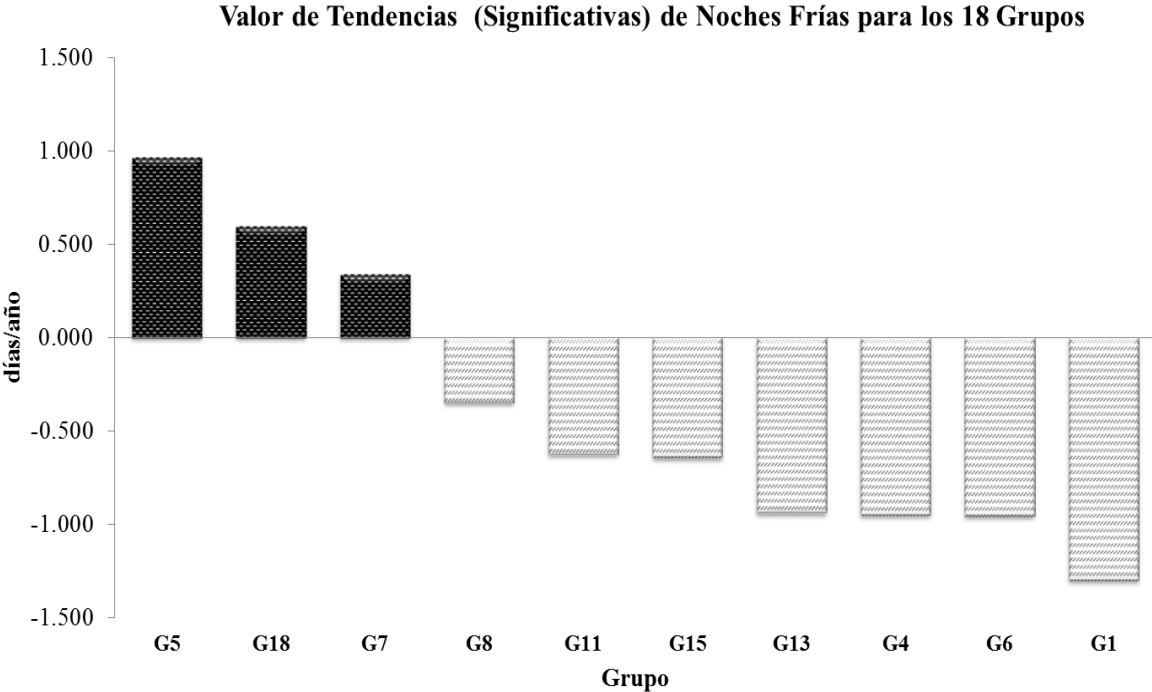


Figura 3.4.4. Gráfica de valores de coeficiente de tendencia (significativa) en orden descendente, para noches frías de los 18 grupos en México. Los valores positivos indican incrementos, mientras que los negativos son de decremento.

En la tabla 3.4.3 se muestra un resumen de los coeficientes de la regresión lineal, así como los *outliers* ajustados y los cambios estructurales encontrados.

Tabla 3.4.3. Resumen de valores de los coeficientes del modelo de regresión lineal para las noches frías

Noches Frías									
Grupo	Estación	C(i) [días]	CE C	CE Tendencia	Outliers	Tendencia (i) [días/año]	Tendencia(f) [días/año]	Prob(<0.05)	Significancia
1	3028	57.85	D1994=21.827	-----	D68=-36.433 D69=-26.131	-1.302	-1.302	0.000	SI(-)
2	3062	29.55	-----	-----	D03=-25.193	0.074	0.074	0.773	NS
3	26073	29.88	-----	-----	D99=24.687 D05=-24.457	0.191	0.191	0.170	NS
4	26075	47.69	D1996=27.261	-----	D66=24.014 D74=24.619 D75=35.570 D87=23.977	-0.951	-0.951	0.000	SI(-)
5	8090	17.44	-----	-----	D64=37.702 D84=33.420	0.964	0.964	0.000	SI(+)
6	10027	57.01	-----	-----	D73=40.407 D81=-19.952 D87=-23.221	-0.955	-0.955	0.000	SI(-)
7	19024	38.67	D1969=-26.354 D1984=33.383	D1984=-1.466	D88=21.201	1.805	0.339	0.000	SI(+)
8	28028	43.38	-----	-----	-----	-0.350	-0.350	0.004	SI(-)
9	14096	9.76	D1979=17.179	D1979=0.890	D02=14.610	0.268	1.158	0.177	NS
10	6013	0.28	D1995=29.823 D2002=-30.338	D1976=0.596 D1995=3.914	D06=-32.282 D07=-15.020 D10=24.766	0.228	4.738	0.354	NS
11	14040	82.24	D1969=-44.351	-----	D60=19.761 D63=-41.360 D83=24.522	-0.627	-0.627	0.000	SI(-)
12	11064	31.50	-----	-----	D78=20.193	0.184	0.184	0.237	NS
13	17004	65.60	D1974=-14.421	-----	D66=34.033	-0.939	-0.939	0.000	SI(-)
14	28002	31.70	D1990=-13.141	-----	D66=19.272 D96=18.250	0.205	0.205	0.257	NS
15	30179	47.48	D1976=9.574	D1976=0.681	D66=38.459 D68=40.105 D70=45.752	-1.323	-0.642	0.025	SI(-)
16	20134	38.17	-----	-----	D78=-25.211	-0.109	-0.109	0.450	NS
17	7175	55.02	D1970=-22.439	-----	-----	-0.144	-0.144	0.493	NS
18	31030	23.31	D1972=-27.777 D1988=-16.490	D1972=-2.579	D60=50.687	3.173	0.593	0.000	SI(+)

Grupo: N, N=1,..18

Estación: Numero de estación seleccionada por grupo

C(i): Media de noches frías sin cambios, i=inicial

CE C: Cambio estructural (CE) en la media (año (Dnnnn) y valor; nnnn=1990, etc.)

CE Tendencia: Cambio estructural (CE) en tendencia (año (Dnnnn) y valor)

Outliers: Observaciones atípicas (año (Dnn) y valor; nn=90 año 1990, etc.)

Tendencia (i): Valor del coeficiente de tendencia, primer ajuste (sin nuevos coeficientes en la regresión lineal)

Tendencia (f): Valor del coeficiente de tendencia, con nuevo ajuste (introduciendo nuevos coeficientes en la regresión lineal, o bien mismo valor de Tendencia (i) si no hay un nuevo ajuste).

Prob (<0.05): Probabilidad con nivel de confianza del 95%, valor<0.05 es significativa la tendencia.

Significancia: SI(+) es significativa de incremento, SI(-) es significativa de decremento y NS es no significativa, sin cambios significativos.

Los grupos G8 y G17 no presentan *outliers* que hayan influido en su ajuste de tendencia. Mientras que en los grupos restantes los *outliers* que se presentaron, mayormente fueron en la década de los setenta y ochenta. También sobresalen los *outliers* ocurridos en 1966, ya que se repiten en G4, G13, G14 y G15. Los valores indicaron que durante ese año hubo una gran ocurrencia de noches frías. Además fue un año de "El Niño", que generalmente provoca inviernos más fríos en México (http://www.atmosfera.unam.mx/editorial/libros/el_nino/cap4.pdf). En 5 de los 18 grupos se tienen cambios en el valor de la tasa de cambio mas no en el signo de ésta. Cuatro de los seis cambios estructurales en la pendiente ocurrieron en la década de los setenta, en particular un cambio en 1976 (año de "La Niña") ocurrió en G10 y G15. Los grupos con cambios en la media y en la pendiente son: G7, G9, G10, G15 y G18.

Noches Cálidas

Las noches cálidas (NC_{n3}) ocurren cuando la T_{min} se encuentra por encima de un "n₃" umbral; es decir, es el comportamiento de la cola superior de una distribución de T_{min}.

En la figura 3.4.5 se observa una menor cantidad de tendencias no significativas para NC, mientras que predominan los cambios significativos sobre todo los positivos.

En G5 hay una una menor frecuencia de T_{min} > 13.2 °C, ya que la tasa de cambio es de -1.768 días/año, en otras palabras las T_{min} son menos cálidas.

En G8 también se tiene una de las tasas de mayor cambio con un valor de -1.848 días/año, la ocurrencia de T_{min} diarias > 24.0 °C disminuye. Otro caso particular es el de G18, aquí se detectó un cambio estructural en 1987 (año de "El Niño"). Durante el primer periodo de 1960-1986 la tasa de cambio fue de 0.660 días/año pero durante 1987-2000 pasó a -14.600 días/año. Este comportamiento de decremento fue extremadamente abrupto. Para verificar que esta tendencia haya continuado, sería necesario tener la serie de datos más actualizada.

En cuanto al aumento de NC, destaca G15 con un incremento significativo de 2.123 días/año, de hecho es el mayor valor de las tasas de cambio de entre todos los grupos. Durante el periodo observado la cantidad de T_{min} diarias por encima de 16.7 °C se incrementó. En este caso hay un contundente aumento de eventos extremos relacionados con T_{min} y T_{max} diarias. Este grupo podría ser uno donde se presentarían mayores impactos con cambio climático, ya que por un incremento de temperatura los extremos se desplazarían a temperaturas extremas aún más cálidas.

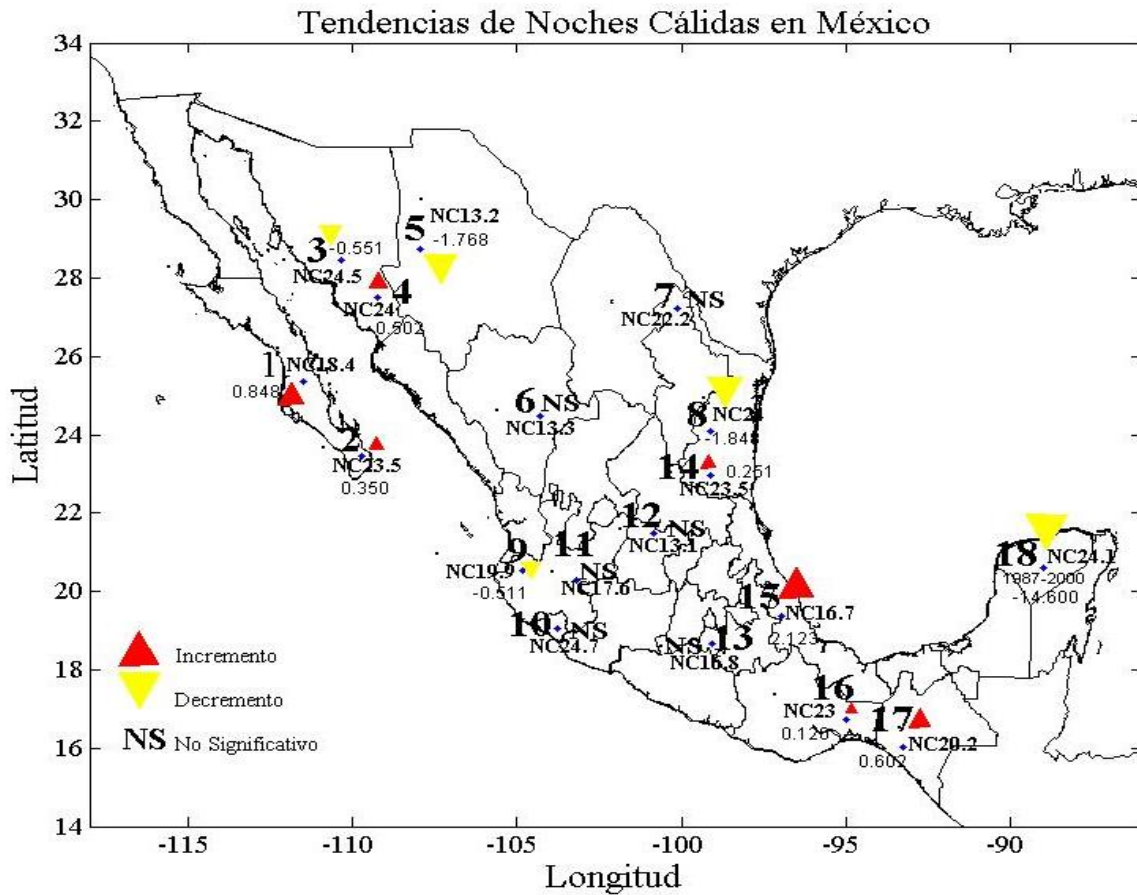


Figura 3.4.5. Comportamiento de las tendencias anuales del índice de noches cálidas para los 18 grupos. NCn_3 muestra el umbral de T_{min} para las noches cálidas en cada grupo y debajo de éste el valor de la tendencia significativa, con un nivel de confianza del 95%. El sentido de los triángulos arriba/abajo indica tendencias de incremento/decremento y el tamaño ilustra su magnitud. NS expresa que no hubo cambios significativos en ese grupo.

Otro de los grupos donde se mostró cambios en los extremos de DC, NF y ahora de NC, es G1. En este grupo las noches cálidas presentan un incremento de 0.848 días/año durante el periodo observado, mayor ocurrencia de T_{min} diarias por encima de 18.4 °C. El mismo comportamiento lo tiene su grupo vecino G2, donde la tendencia es de 0.350 días/año, con un aumento en la frecuencia de T_{min} cálidas ($T_{min} > 23$ °C).

G4 se suma a los casos donde la presencia de temperaturas cálidas extremas se incrementaron, no solo para los extremos de T_{min} sino también para los de T_{max} . En este grupo las NC tienen un aumento significativo de 0.502 días/año, más noches cálidas con una T_{min} diaria > 24.0 °C.

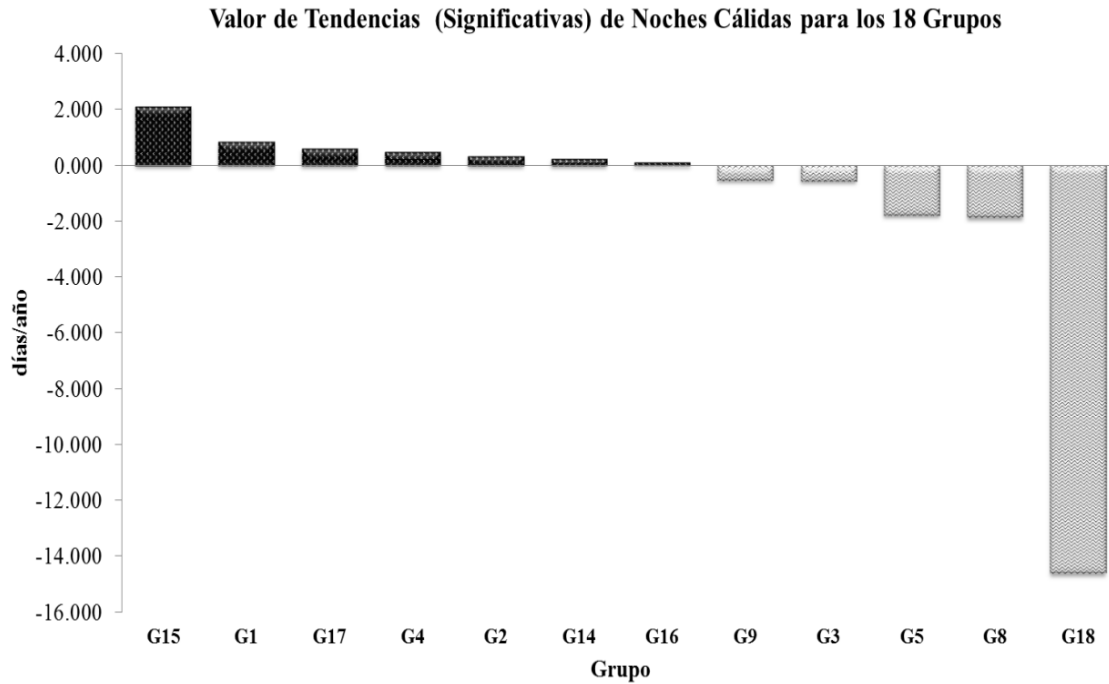


Figura 3.4.6. Gráfica de valores de coeficiente de tendencia (significativa) en orden descendente, para noches cálidas de los 18 grupos en México. Los valores positivos indican incrementos, mientras que los negativos son de decremento.

De igual importancia son aquellos grupos donde no hay cambios durante el periodo observado: G6, G7, G10, G11, G12, G13. En particular en G10 y G12 no se presentaron cambios en los dos indicadores de Tmin.

En la figura 3.4.6 se muestra la gráfica de valores de tendencias significativas en orden descendente. De esta manera se aprecia en qué grupos la tasa de cambio es más positiva o más negativa. Siete de los doce grupos tienen tendencias de incremento de noches cálidas, mayor ocurrencia de Tmin cálidas diarias. En este análisis sobresale G18, pero este comportamiento de tendencia ocurre sólo de 1987-2000, se tendría que revisar qué pudo afectar a la Tmin.

En la tabla 3.4.4 se muestra un resumen los valores de los coeficientes, así como de *outliers* ajustados y cambios estructurales encontrados para las series de índices de NC.

En los outlier ajustados destaca el año de 1998 para las regiones G11, G13, G14, este año fue año de evento de "El Niño". Se puede notar la influencia que tuvo en el incremento de Tmin más cálidas, y por tanto en el aumento en NC.

Tabla 3.4.4. Resumen de valores de los coeficientes del modelo de regresión lineal para las noches cálidas

Noches Cálidas									
Grupo	Estación	C(i) [días]	CE C	CE Tendencia	Outliers	Tendencia (i) [días/año]	Tendencia(f) [días/año]	Prob(<0.05)	Significancia
1	3028	13.31	-----	-----	-----	0.848	0.848	0.000	SI(+)
2	3062	31.52	D1971=-15.183	-----	D99=-20.986 D02=59.964	0.350	0.350	0.026	SI(+)
3	26073	54.47	D1993=19.052	D1993=0.613	-----	-1.163	-0.551	0.000	SI(-)
4	26075	22.89	-----	-----	-----	0.502	0.502	0.000	SI(+)
5	8090	63.13	-----	-----	D87=33.612	-1.768	-1.768	0.000	SI(-)
6	10027	12.11	D1980=14.193 D1991=29.350	D1980=0.715	D83=47.920 D94=-32.111 D06=-58.400	-0.108	0.607	0.415	NS
7	19024	19.79	D1989=54.137	-----	-----	-0.345	-0.345	0.141	NS
8	28028	36.26	D1978=21.330 D1990=29.571	-----	-----	-1.848	-1.848	0.000	SI(-)
9	14096	106.89	D1971=-44.308	D1982=1.738	D65=-22.639 D66=28.611 D83=44.421	-2.249	-0.511	0.000	SI(-)
10	6013	132.93	D1978=-72.574 D1985=-16.118	D1985=1.392 D1998=0.328	D72=-36.443 D73=-36.632	-1.811	-0.091	0.328	NS
11	14040	2.20	D1984=-19.094	D1972=2.437	D93=-22.962 D98=69.780	0.414	2.852	0.261	NS
12	11064	57.59	D1967=-23.065	-----	D61=29.688 D62=40.962	-0.274	-0.274	0.333	NS
13	17004	6.56	-----	D1972=1.735	D98=23.479 D05=52.809 D06=62.999	0.075	1.810	0.426	NS
14	28002	42.95	D1980=33.236 D1984=-17.785	D1980=1.833	D98=41.558	-1.582	0.251	0.000	SI(+)
15	30179	17.52	D1966=-14.720 D1976=-15.161 D1985=-18.057	-----	D96=39.972 D01=-28.644 D02=-18.768	2.123	2.123	0.000	SI(+)
16	20134	26.98	D1967=-38.212	D1967=-6.389	D87=55.766	6.509	0.123	0.000	SI(+)
17	7175	18.72	-----	-----	D94=40.416	0.602	0.602	0.007	SI(+)
18	31030	5.83	D1987=54.750 D1991=46.933 D1994=87.833	D1987=-15.260	D80=31.971 D97=-48.167	0.660	-14.600	0.008	SI(-)

Grupo: N, N=1,..,18

Estación: Numero de estación seleccionada por grupo

C(i): Media de noches cálidas sin cambios, i=inicial

CE C: Cambio estructural (CE) en la media (año (Dnnnn) y valor; nnnn=1990, etc.)

CE Tendencia: Cambio estructural (CE) en tendencia (año (Dnnnn) y valor)

Outliers: Observaciones atípicas (año (Dnn) y valor; nn=90 año 1990, etc.)

Tendencia (i): Valor del coeficiente de tendencia, primer ajuste (sin nuevos coeficientes en la regresión lineal)

Tendencia (f): Valor del coeficiente de tendencia, con nuevo ajuste (introduciendo nuevos coeficientes en la regresión lineal, o bien mismo valor de Tendencia (i) si no hay un nuevo ajuste).

Prob (<0.05): Probabilidad con nivel de confianza del 95%, valor<0.05 es significativa la tendencia.

Significancia: SI(+) es significativa de incremento, SI(-) es significativa de decremento y NS es no significativa, sin cambios significativos.

De los cambios estructurales ocurridos en la tendencia sobresalen G6 donde hay un cambio en el signo de la pendiente. Antes de 1980 se presentó un decremento con una tendecia de -0.110 días/año y posteriormente un incremento no significativo de 0.610 días/año. Otro caso similar y durante el mismo año ocurre en G14. En G18 también hay un cambio de signo en la pendiente, el cual ya se mencionó.

En la tabla 3.4.5. se presenta un resumen de los cambios que se detectaron en el analisis de los eventos climáticos extremos de días calidos (DC), noches frías (NF) y noches cálidas (NC), en los 18 grupos para México. Los signos "+" indican incremento, "-" decremento y "NS" no significativo.

Tabla 3.4.5. Cambios detectados en los índices de eventos climáticos extremos análizados en los 18 grupos en México

Grupo	Estación	Cambios detectados		
		DC	NF	NC
1	3028	+	-	+
2	3062	+	NS	+
3	26073	+	NS	-
4	26075	+	-	+
5	8090	NS	+	-
6	10027	-	-	NS
7	19024	NS	+	NS
8	28028	-	-	-
9	14096	-	NS	-
10	6013	NS	NS	NS
11	14040	-	-	NS
12	11064	+	NS	NS
13	17004	+	-	NS
14	28002	-	NS	+
15	30179	+	-	+
16	20134	+	NS	+
17	7175	-	NS	+
18	31030	-	+	-

Grupo: N=1...18

Estación: Clave de estación

DC: Días Cálidos, NF: Noches Frías, NC: Noches Cálidas

"+": Tendencia de incremento

"-": Tendencia de decremento

"NS": Tendencia no significativa, sin cambios.

Se aprecia la dirección del comportamiento (sólo incremento/decremento o una combinación incremento-decremento) que están siguiendo los eventos extremos en cada grupo, ya sean cálidos o fríos. Así, se puede señalar que aún sin cambio climático los grupos podrían ser vulnerables por tener una mayor ocurrencia de días con temperaturas extremas sólo cálidas, sólo frías. O bien tener los dos extremos, un mayor número de eventos cálidos y al mismo tiempo también fríos. El único grupo donde no se presentaron cambios significativos en los tres indicadores fue en G10 (Colima), este grupo en particular tendría más tiempo para tolerar algún aumento de temperatura en un futuro.

4 Resultados en Proyecciones de Temperatura Mensual y Eventos Climáticos Extremos

En el capítulo anterior se expusieron los resultados de las tendencias de Tmax y Tmin mensuales y los eventos climáticos extremos para datos observados. A continuación se presentarán los resultados con cambio climático que se obtuvieron en esta investigación. Es importante señalar que los estudios en este campo aún son objeto de debate, sobre todo en el análisis de eventos climáticos extremos, por la dificultad de tener datos diarios proyectados y la confiabilidad de los mismos.

Los modelos utilizados para realizar el análisis de temperaturas máxima y mínima mensuales fueron el GFDL-CM3 y el MPI-ESM-LR para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Los horizontes fueron 2015-2039 (cercano) y 2075-2099 (lejano) para el caso mensual y 2055-2099 para el diario. Todos los datos se descargaron directamente de la página del CMIP5.

Los análisis mostraron que para RCP8.5 en el horizonte lejano, en la mayoría de los grupos analizados, en las proyecciones de Tmin mensual hubo tendencias significativas de incremento. Mientras que los eventos climáticos extremos mostraron un aumento de eventos cálidos y una disminución de fríos.

4.1 Temperatura Mensual

El primer análisis realizado fue para proyectar el comportamiento de las tendencias de Tmax y Tmin mensuales. Las tendencias se ajustaron con el modelo de regresión lineal que se utilizó en el análisis con datos observados.

4.1.1 Comparación entre Climatologías: Lo Observado vs Histórico del Modelo

Para hablar sobre proyecciones futuras en una región, es preciso considerar la validez de las simulaciones, comparándolas con observaciones. De esta manera se tendrá confiabilidad de que los resultados obtenidos de algún escenario sean válidos, como se llevó a cabo en la Cuarta Comunicación Nacional de México (Conde & Gay, 2008).

Hay que considerar que los escenarios como tal no son proyecciones certeras, poseen un rango de incertidumbre la cual expresa el grado de desconocimiento de un determinado valor (IPCC, 2007). Por tanto, la confiabilidad va disminuyendo conforme se quiere tener más detalle en las simulaciones de los modelos, porque se va adicionando la falta de conocimiento del sistema

climático para ser reproducido. Como en el caso de los eventos extremos, los cuales requieren de simulaciones diarias y procesos más regionales. Sin embargo la información disponible que se posee al momento, da pie para hacer un primer análisis para proyecciones relacionadas con eventos extremos para México.

En esta investigación se realizó una comparación entre las series de datos observadas (climatología 1961-1990) e histórica (salidas de los modelos GFDLCM3 y MPI-ESM-LR). Esta comparación incluyó el cálculo de una desviación estándar para la climatología base observada y de los modelos. De esta manera se obtuvo un rango de validez (valor (61-90) \pm desviación estándar (σ o dvs)) para los valores de la climatología de los modelos. Así, las series 61-90 históricas se descartaban si la mayor parte de los valores y su incertidumbre salían del rango dado en lo observado y/o si no seguían un comportamiento similar a la climatología observada. Dando así, un significado a la sobreestimación o subestimación de valores de lo histórico (simulaciones) respecto al promedio 1961-1990 observado.

Para los 18 grupos en las figuras 4.1.1 y 4.1.2 se muestra el comportamiento de las climatologías 1961-1990 de Tmax y Tmin, observado e histórico.

En Tmax se observan casos donde los valores históricos subestiman lo observado, como en G2, G4, G6, G10, G11, G13 y G18. Caso contrario ocurre en G15 y G17, donde el modelo MPI-ESM-LR sobreestima los valores de Tmax. Para el sureste de México se tiene un comportamiento totalmente diferente a la climatología 1961-1990. Así se concluyó que en esta zona del país los modelos reproducen pobremente lo observado, mientras que en la zona norte lo hacen mejor, como ya lo habían señalado Cavazos *et al.* (2012b).

En Tmin en algunos grupos los valores de lo histórico también están por encima del promedio 61-90 observado, tal es el caso de G1, G2, G15, G17 y G18. Igualmente hay subestimación en G10, G13 y G16.

En este primer resultado, los dos modelos son débiles en la zona sureste. En el caso de la Península de Yucatán es posible que los modelos caractericen esa zona como océano (los océanos se calientan más lentamente que la superficie terrestre durante el día), ya que la Tmax esta subestimada y la Tmin sobreestimada. En algunos grupos, los modelos no representan un descenso de Tmin que se produce en los meses de verano, en la mayoría de los casos en julio. Este descenso puede estar relacionado con un incremento de precipitación sobre todo en las zonas de centro y sureste de México. Lo que estaría indicando que, efectivamente, los modelos no son buenos para simular la interacción de los sistemas que están presentes en latitudes donde se localiza México (Cavazos *et al.*, 2012b), como la influencia de los ciclones tropicales, la ZITC, el ENSO, y más regionalmente el monzón mexicano o la canícula.

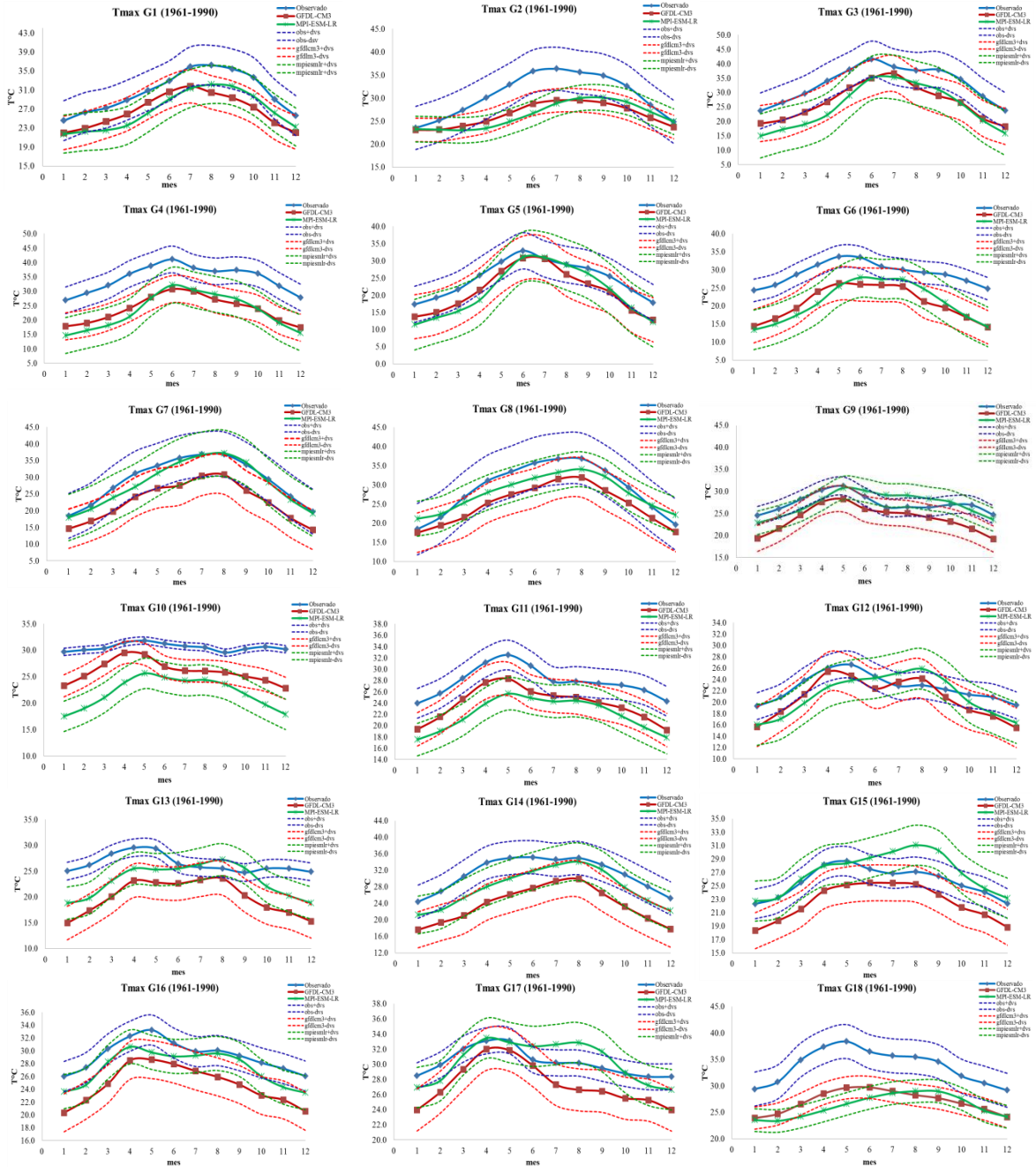


Figura 4.1.1. Comparación entre climatologías de temperatura máxima, lo observado versus históricos de los modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR.

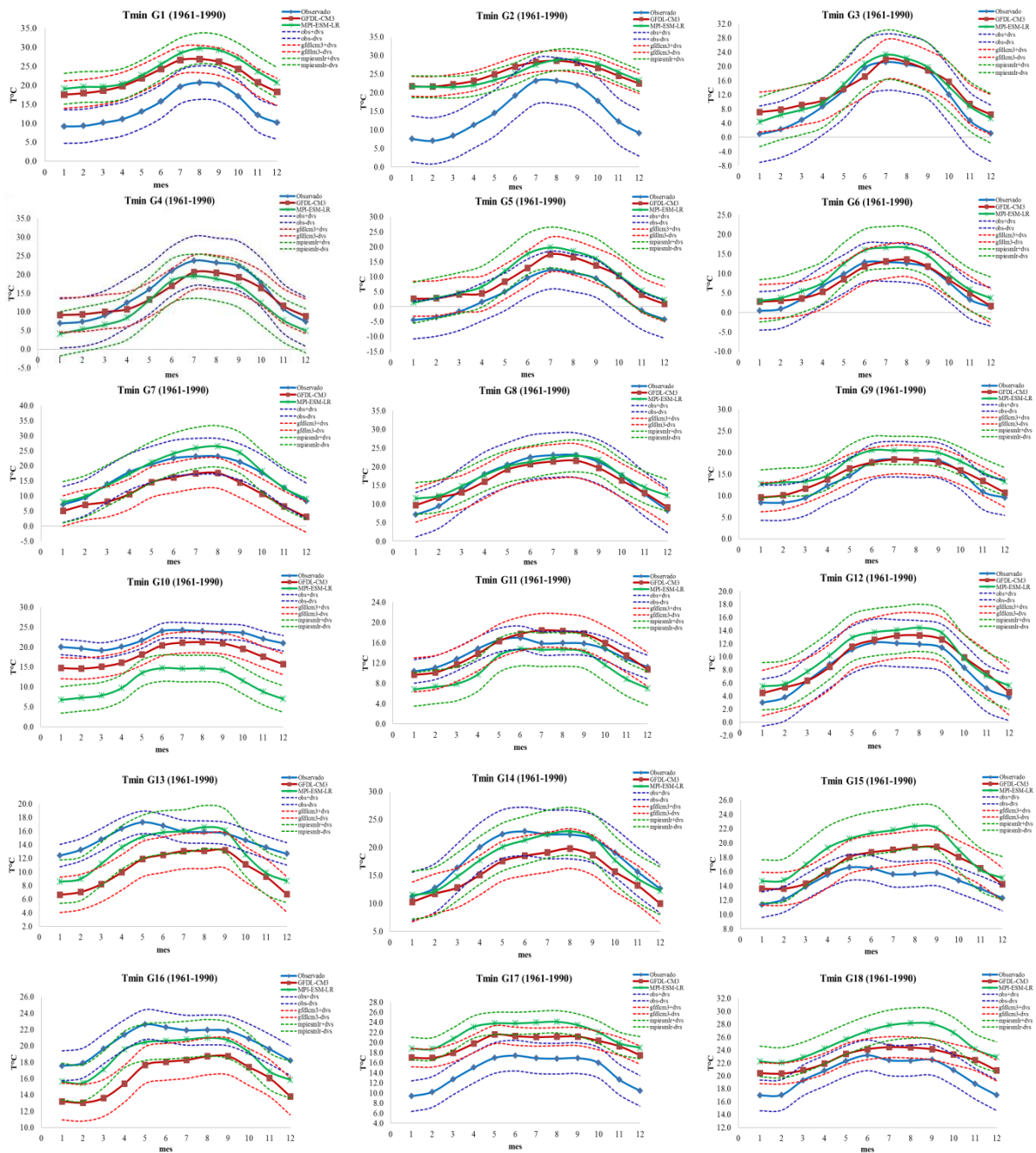


Figura 4.1.2. Comparación entre climatologías de temperatura mínima, lo observado versus históricos de los modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR.

En general se puede decir que los modelos no son capaces de reproducir la climatología observada en su totalidad, salvo algunos casos, en su mayoría corresponden a Tmin. Porque en ocasiones los valores históricos de los modelos están por encima y por debajo de lo actual, sobrestimación y subestimación de valores, respectivamente. Los modelos representan el

comportamiento de los meses de enero a junio y de septiembre a diciembre, no así los meses intermedios (de verano).

Los modelos han podido reproducir lo observado en algunos casos, lo cual es una gran ventaja, ya que los modelos de circulación general estrictamente no son capaces de representar climatologías a nivel puntual. Puesto que los GCM no pueden simular de manera precisa fenómenos a una escala regional que influyan en el clima de la zona a analizar.

Sin embargo estos modelos fueron elegidos porque en estudios anteriores se ha probado que son los que mejor reproducen el clima en México (Conde & Gay, 2008). Además el análisis con estos modelos se puede comparar con estudios posteriores, ya que es probable que se incluyan en investigaciones para México.

Así se cumple con las condiciones de: i) actualidad de simulaciones ya que se están utilizando las salidas más recientes, ii) validez porque a pesar de ser GCM reproducen la climatología de lo observado en más de la mitad de los grupos iii) comparabilidad para estudios posteriores y iv) estos modelos se pueden usar para evaluaciones de impacto, ya que en México anteriormente se han utilizado (Conde & Gay, 2008).

Los grupos donde los modelos reprodujeron con mayor confiabilidad la climatología observada son los siguientes:

a) Tmax:

GFDLCM3: G1, G3, G5, G7, G8, G9, G11, G12, G14, G15, G16 y G17

MPI-ESM-LR: G1, G3, G5, G7, G8, G9, G14, G15 y G16.

b) Tmin:

GFDLCM3: G3, G4, G5, G6, G7, G8, G9, G10, G11, G12, G14 y G15.

MPI-ESM-LR: G3, G4, G5, G6, G7, G8, G9, G11, G12, G14, G16 y G18.

En los siguientes análisis se utilizarán únicamente las estaciones que corresponden a cada uno de los grupos seleccionados.

4.1.2 Proyecciones Mensuales para Tmax y Tmin

Para realizar las proyecciones futuras mensuales de las variables de Tmax y Tmin, las salidas de los modelos debían reproducir lo observado. Por lo tanto se hizo una comparación entre las series mensuales observadas homogéneas y las históricas de cada modelo. Lo anterior para cada uno de los grupos ya seleccionados y así tener confiabilidad en las proyecciones. Si bien los modelos reprodujeron la climatología de cada uno de los grupos seleccionados, no ocurrió lo mismo para las series mensuales de cada grupo versus las series históricas mensuales de cada modelo.

Las series de los modelos se seleccionaron si cumplían dos condiciones: 1) que la mayor cantidad de valores y su rango de incertidumbre ($\pm\sigma$) de la serie del modelo, estuviera dentro del rango de $\pm\sigma$ de la serie mensual observada; 2) la variabilidad interanual de la serie del modelo debía ser por lo menos en un 50% igual a la observada. Lo que significa que mientras los valores de lo observado eran de incremento (decremento), el comportamiento de los valores del modelo tenía que ser igual. Lo anterior se hizo con un conteo de coincidencias en el signo de las anomalías del modelo respecto a lo observado. Las anomalías (históricas y observadas) se calcularon respecto al promedio 1961-1990 de cada serie ($x_i - \bar{x}$). Así, con la primer condición se descartaron aquellas series históricas cuyos valores estuvieron muy sobreestimados o subestimados, aunque cumplieran con la segunda condición, ocurrió en 30 casos.

De esta manera se garantizó que los modelos no tuvieran valores muy sobreestimados o subestimados y que siguieran un comportamiento similar respecto a lo observado. Validando así, las salidas históricas de los modelos, para cumplir con el criterio de validez de los modelos (Conde & Gay, 2008). En este caso no todas las series mensuales (enero, abril, julio y octubre) fueron reproducidas por los modelos, sólo algunas de ellas presentaron un comportamiento similar e incluso valores muy cercanos a lo observado. Lo cual refleja el grado de incertidumbre al tener una mayor resolución temporal, en este caso por mes. Fue un nuevo filtro para tener proyecciones lo más confiables posibles, seleccionadas de manera sistemática.

En la tabla 4.1.1 se indica con el recuadro sombreado los meses que los modelos cumplieron con las dos condiciones de selección. Un total de 28 casos para Tmax y 27 para Tmin serán parte del análisis. En la figura 4.1.3 se muestra en el mapa la ubicación de los grupos resultantes para este análisis.

Tabla 4.1.1. Meses para los cuales los modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR reproducen lo observado*

GFDL-CM3	Tmax				Tmin			
	enero	abril	julio	octubre	enero	abril	julio	octubre
G1	■							
G3	■					■		■
G4						■		■
G5								
G6					■		■	■
G7								
G8						■	■	
G9		■					■	■
G11						■		
G12		■	■	■	■			
G14					■			
G15			■					
G16		■						
G17				■				
MPI-ESM-LR								
G3							■	
G4								
G6								■
G7	■		■	■	■			■
G8	■		■	■				■
G9	■	■	■	■				
G11						■		
G12								■
G14	■		■	■		■	■	
G15	■	■	■	■				
G16	■		■		■		■	

*Los recuadros sombreados indican los meses disponibles para cada modelo.

Para Tmax hay una mayor selección de meses con el modelo MPI-ESM-LR que con GFDL-CM3, aunque con este último se seleccionaron dos grupos más para el análisis. Lo contrario a lo anterior ocurrió con Tmin, ya que con el modelo GFDL-CM3 se tienen más casos para analizar. Es decir, que el modelo MPI-ESM-LR fue mejor para reproducir Tmax observada y GFDL-CM3 para Tmin.

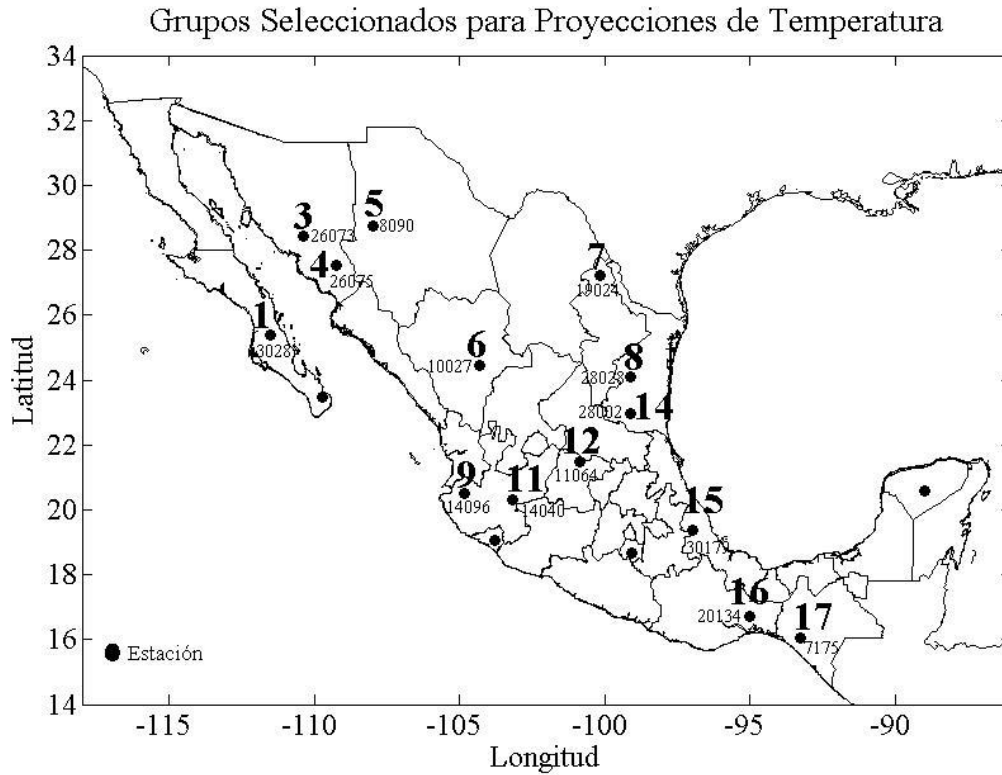


Figura 4.1.3. Grupos seleccionados para el análisis de temperatura bajo el contexto de cambio climático.

Ahora se presentarán los resultados obtenidos de las tendencias que seguirían, las posibles proyecciones para dos de las trayectorias RCPs y los horizontes 2015-2039 y 2075-2099.

El escenario más relevante fue el RCP8.5, debido a que se presentaron mayores cambios y/o incrementos en temperatura respecto a RCP4.5.

a) Temperatura Máxima

Ahora se muestran los resultados para la variable de Tmax, de los cuales se hicieron proyecciones para los grupos G1, G3, G7, G8, G9, G12, G14, G15, G16 y G17.

Escenario RCP8.5

En la figura 4.1.4 se observan las proyecciones de tendencias para Tmax de los grupos respectivos. Se tiene un mayor número de tendencias significativas de incremento para el horizonte lejano 2075-2099. El aumento es mayor en el modelo MPI-ESM-LR que para el modelo GFDL-CM3. De acuerdo al MPI-ESM-LR en 5 de los 6 grupos, el mes de enero tendría mayores aumentos de Tmax. Para G9 con los dos modelos el mes de abril podría tener incrementos significativos, con una tasa de cambio mayor con MPI-ESM-LR que con GFDL-CM3.

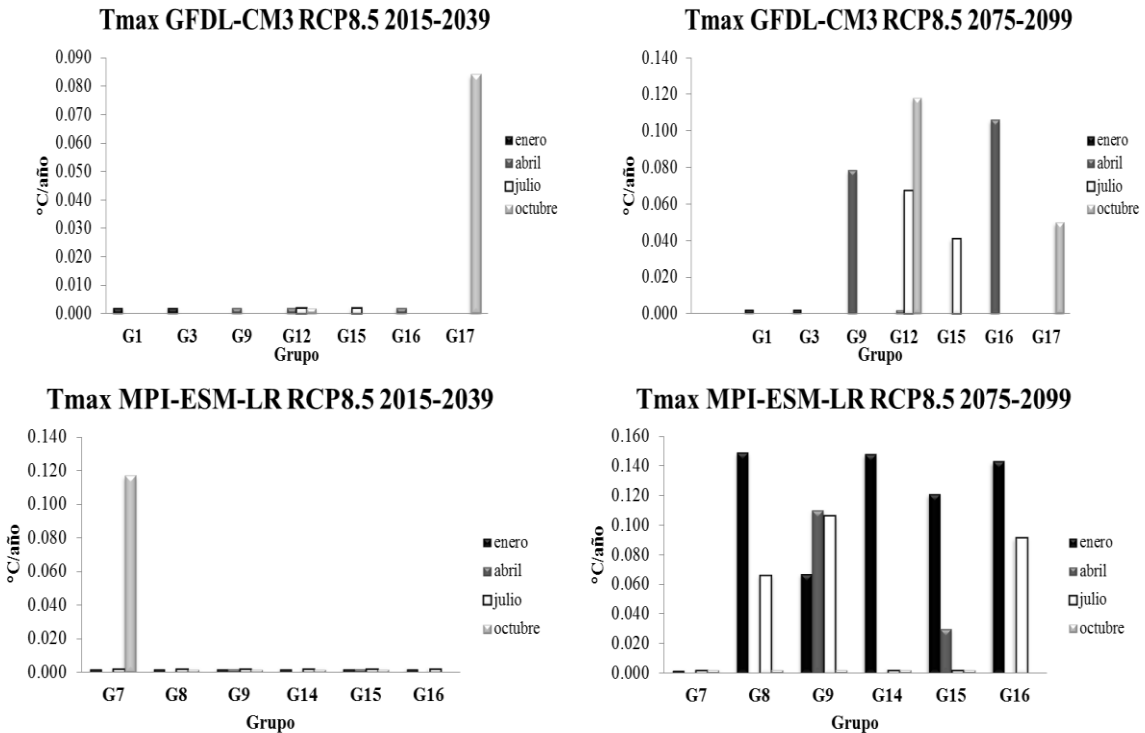


Figura 4.1.4. Gráficas de coeficiente de tendencia (°C/año) para Tmax mensual en los grupos seleccionados, escenario RCP8.5, horizontes 2015-2039 y 2075-2099, y modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR.

En la tabla 4.1.2 se muestran las tendencias del periodo observado y lo proyectado para los grupos seleccionados.

Tabla 4.1.2. Tendencias ajustadas para RCP8.5 de Tmax mensual con los modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR

GFDL-CM3	Tmax											
	Observado				2015-2039				2075-2099			
RCP8.5	enero	abril	julio	octubre	enero	abril	julio	octubre	enero	abril	julio	octubre
G1	-0.016	-0.050	NS	NS	NS				NS			
G3	0.069	NS	0.036	NS	NS				NS			
G9	NS	NS	NS	0.142		NS				0.079		
G12	0.026	NS	0.085	0.036		NS	NS	NS		NS	0.067	0.118
G15	0.100	0.069	0.107	0.096			NS				0.041	
G16	NS	NS	NS	NS		NS				0.106		
G17	0.106	0.108	0.043	NS				0.084				0.050

MPI-ESM-LR	Tmax											
	Observado				2015-2039				2075-2099			
RCP8.5	enero	abril	julio	octubre	enero	abril	julio	octubre	enero	abril	julio	octubre
G7	0.096	NS	-0.090	-0.017	NS		NS	0.117	NS		NS	NS
G8	NS	-0.041	-0.026	-0.048	NS		NS	NS	0.149		0.066	NS
G9	NS	NS	NS	0.142	NS	NS	NS	NS	0.067	0.110	0.106	NS
G14	NS	NS	-0.205	NS	NS		NS	NS	0.148		NS	NS
G15	0.100	0.069	0.107	0.096	NS	NS	NS	NS	0.121	0.030	NS	NS
G16	NS	NS	NS	NS	NS		NS		0.143		0.091	

Relevantes son los cambios de comportamiento de las tendencias negativas de la parte observada, donde en lo proyectado pasan a una tasa de cambio positiva. Reflejándose así el aumento de temperatura proyectado. Como se puede observar en el horizonte cercano, predominan las tendencias no significativas. Lo anterior puede significar que el incremento de Tmax puede ser constante en los primeros años para luego acelerarse hacia 2099.

Escenario RCP4.5

Para este escenario (figura 4.1.5.) los resultados varían un poco más, no se concentran en un horizonte específico, como en el caso del RCP8.5. Probablemente por tener un forzamiento radiativo menor, puede haber más variaciones en la temperatura, incluso con decrementos, como en el caso del MPI-ESM-LR (2015-2039). Incluso se pueden apreciar dos tendencias negativas en el horizonte lejano, la primera de ellas para G1 y G9. En ambos casos hubo una disminución de temperatura durante todo 2075-2099. En G1 se tuvo un cambio estructural en 2081 y en G9 en 2082, a partir de estos años disminuyó la tasa de cambio de Tmax, pero conservó el comportamiento. Lo que puede verse como el inicio de una estabilización de Tmax.

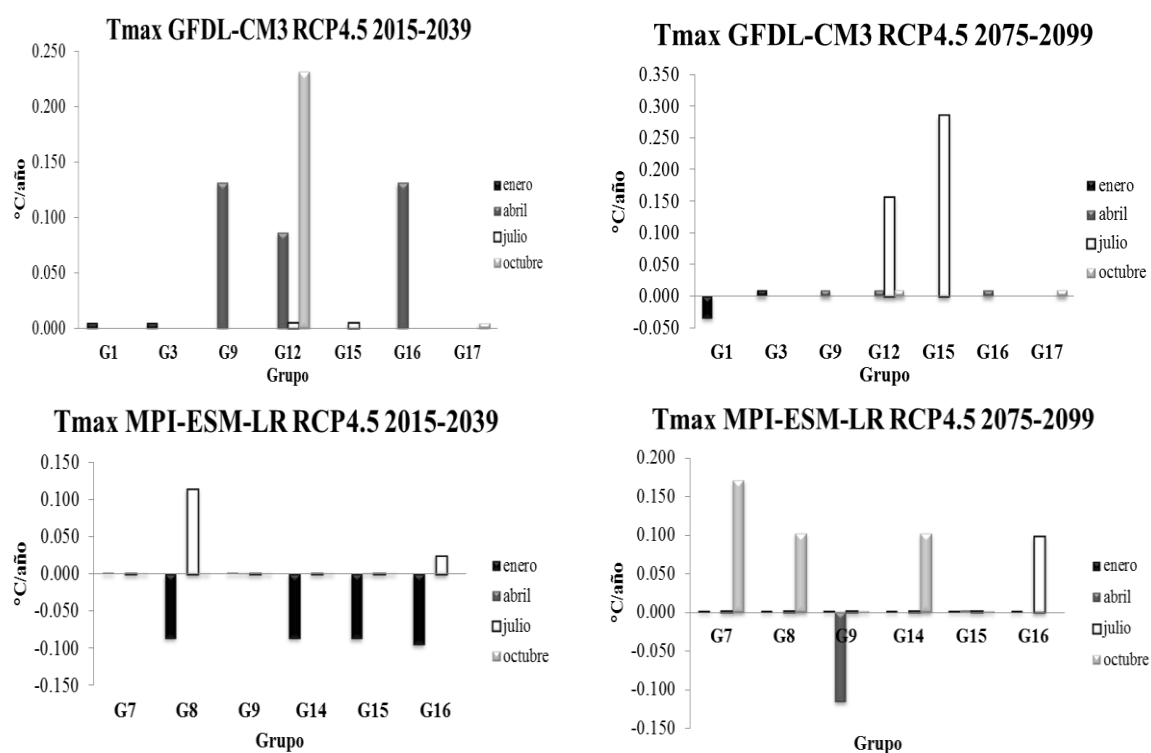


Figura 4.1.5. Gráficas de coeficiente de tendencia ($^{\circ}\text{C}/\text{año}$) para Tmax mensual en los grupos seleccionados, escenario RCP4.5, horizontes 2015-2039 y 2075-2099, y modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR.

En la tabla 4.1.3 se tienen las tendencias del periodo observado y lo proyectado, predominaron las tendencias no significativas.

Tabla 4.1.3. Tendencias ajustadas para RCP4.5 de Tmax mensual con los modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR

GFDL-CM3	Tmax											
	Observado				2015-2039				2075-2099			
	enero	abril	julio	octubre	enero	abril	julio	octubre	enero	abril	julio	octubre
RCP4.5												
G1	-0.016	-0.050	NS	NS	NS				-0.034			
G3	0.069	NS	0.036	NS	NS				NS			
G9	NS	NS	NS	0.142		0.131				NS		
G12	0.026	NS	0.085	0.036		0.086	NS	0.232		NS	0.157	NS
G15	0.100	0.069	0.107	0.096			NS				0.286	
G16	NS	NS	NS	NS		0.131				NS		
G17	0.106	0.108	0.043	NS				NS				NS

MPI-ESM-LR	Tmax											
	Observado				2015-2039				2075-2099			
	enero	abril	julio	octubre	enero	abril	julio	octubre	enero	abril	julio	octubre
RCP4.5												
G7	0.096	NS	-0.090	-0.017	NS		NS	NS	NS		NS	0.171
G8	NS	-0.041	-0.026	-0.048	-0.086		0.114	NS	NS		NS	0.102
G9	NS	NS	NS	0.142	NS	NS	NS	NS	NS	-0.116	NS	NS
G14	NS	NS	-0.205	NS	-0.086		NS	NS	NS		NS	0.102
G15	0.100	0.069	0.107	0.096	-0.087	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
G16	NS	NS	NS	NS	-0.095		0.025		NS		0.098	

De acuerdo a todos los resultados anteriores, se tuvieron mayores cambios de incremento para el escenario RCP8.5 en Tmin para el horizonte lejano. Lo cual se esperaba por ser el escenario menos moderado y con mayor incremento de temperatura para un horizonte de 2100, no así para el RCP4.5 donde la cantidad de cambios significativos fue menor.

Se mostraron mejores resultados para Tmin puesto que fue mejor simulada por los modelos, lo contrario ocurrió para Tmax, cuyos resultados no fueron tan sobresalientes, por la misma falta de grupos para el análisis.

b) Temperatura Mínima

Tanto para RCP8.5 y RCP4.5 las tendencias significativas de las series proyectadas para Tmin en su mayoría son de incremento.

Escenario RCP8.5

En la figura 4.1.6 se muestran las gráficas de los valores del coeficiente de tendencia significativos ($^{\circ}\text{C}/\text{año}$) de los horizontes lejano y cercano para los grupos seleccionados. Para este escenario las tendencias significativas son de incremento, a excepción de G6 para el horizonte cercano. Una mayor cantidad de incrementos de Tmin se concentran para el modelo GFDL-CM3 y el periodo 2075-2099. Para GFDL-CM3 es de notarse los casos de los grupos G3 (octubre), G8 (julio) y G9 (julio), donde en el horizonte cercano y lejano persiste una tasa de cambio de incremento. Lo anterior ocurre para MPI-ESM-LR pero únicamente para G11, la cual es mayor para 2075-2099, es decir que el incremento de Tmin se acelera.

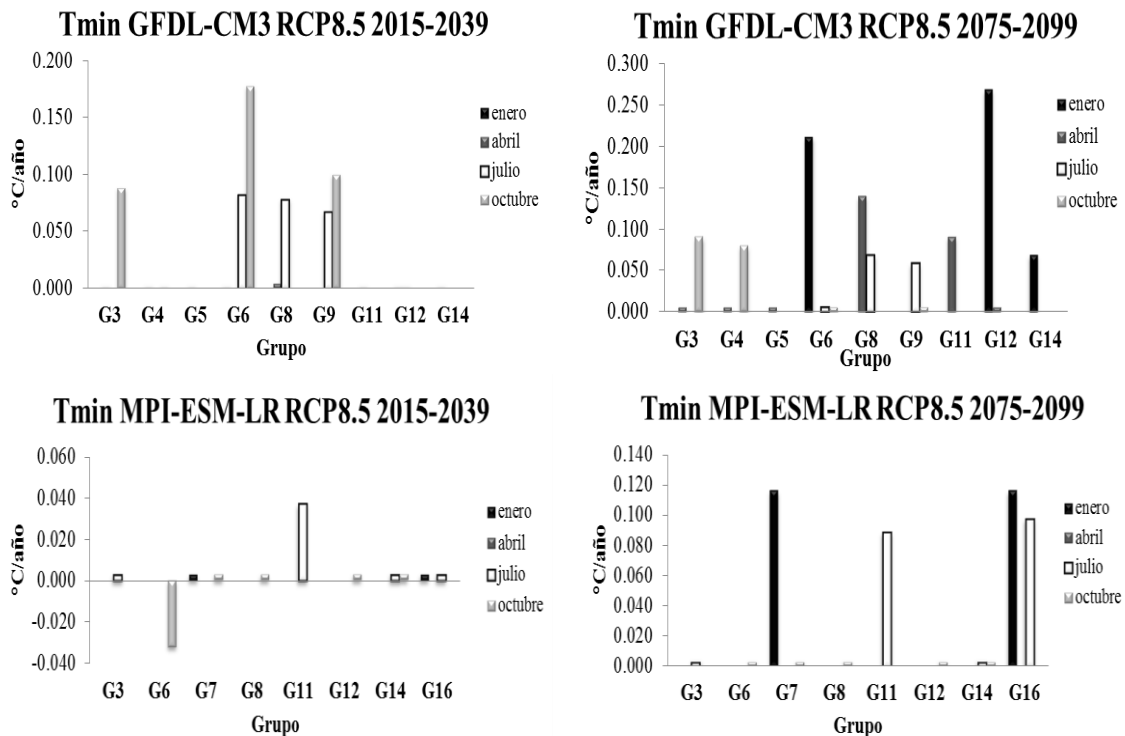


Figura 4.1.6 Gráficas de coeficiente de tendencia ($^{\circ}\text{C}/\text{año}$) para Tmin mensual en los grupos seleccionados, escenario RCP8.5, horizontes 2015-2039 y 2075-2099, y modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR.

En la tabla 4.1.4 se muestra los valores de las tendencias en los casos observados, horizonte cercano y horizonte lejano de los meses analizados. Las unidades de los coeficientes de tendencia son °C/año.

Tabla 4.1.4. Tendencias ajustadas para RCP8.5 de Tmin mensual con los modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR

GFDL-CM3	Tmin											
	Observado				2015-2039				2075-2099			
	RCP8.5	enero	abril	julio	octubre	enero	abril	julio	octubre	enero	abril	julio
G3	NS	-0.027	-0.023	NS		NS		0.088		NS		0.091
G4	NS	-0.061	0.029	-0.076		NS		NS		NS		0.080
G5	-0.197	-0.094	-0.046	-0.050		NS				NS		
G6	NS	NS	0.033	NS	NS		0.082	0.178	0.212		NS	NS
G8	NS	-0.041	-0.026	-0.048		0.004	0.078			0.140	0.068	
G9	-0.048	-0.053	-0.062	-0.082			0.067	0.100			0.058	NS
G11	0.049	0.053	0.094	0.055		NS				0.091		
G12	-0.021	-0.011	NS	NS	NS	NS			0.269	NS		
G14	0.045	NS	NS	NS	NS				0.069			

MPI-ESM-LR	Tmin											
	Observado				2015-2039				2075-2099			
	RCP8.5	enero	abril	julio	octubre	enero	abril	julio	octubre	enero	abril	julio
G3	NS	-0.027	-0.023	NS			NS				NS	
G6	-0.197	-0.094	-0.046	-0.050				-0.032				NS
G7	NS	NS	0.033	NS	NS			NS	0.116			NS
G8	NS	-0.041	-0.026	-0.048				NS				NS
G11	0.049	0.053	0.094	0.055			0.037				0.088	
G12	-0.021	-0.011	NS	NS				NS				NS
G14	0.045	NS	NS	NS			NS	NS			NS	NS
G16	NS	NS	-0.028	NS	NS		NS		0.116		0.097	

Aunque hay varios casos donde la tendencia proyectada no es significativa, en algunos de los meses se aprecia un cambio de comportamiento, de decremento en lo observado a incremento en lo proyectado. Incluso cambios de significativos a no significativos, los cuales también son importantes. La transición de una tendencia negativa de la serie observada a una de incremento, podría ser el resultado de un comportamiento de incremento "moderado".

El modelo GFDL-CM3 es el que presenta una mayor cantidad de cambios significativos en el horizonte cercano, respecto a MPI-ESM-LR. Esto se puede deber a que este modelo presenta

una mayor variación, incluso los cambios podrían ser parte del ruido del modelo por una menor estabilidad en las simulaciones.

Escenario RCP4.5

Este escenario es moderado y tendría la mitad del efecto que el escenario RCP8.5. Estas tendencias (figura 4.1.7) muestran una menor cantidad de cambios significativos comparados con los obtenidos para RCP8.5. En el modelo GFDL-CM3 hubo más variaciones en el horizonte cercano, propio del ruido del modelo, para estabilizarse en el horizonte lejano. Se destaca G9 con un comportamiento negativo durante todo el periodo de 2075-2099.

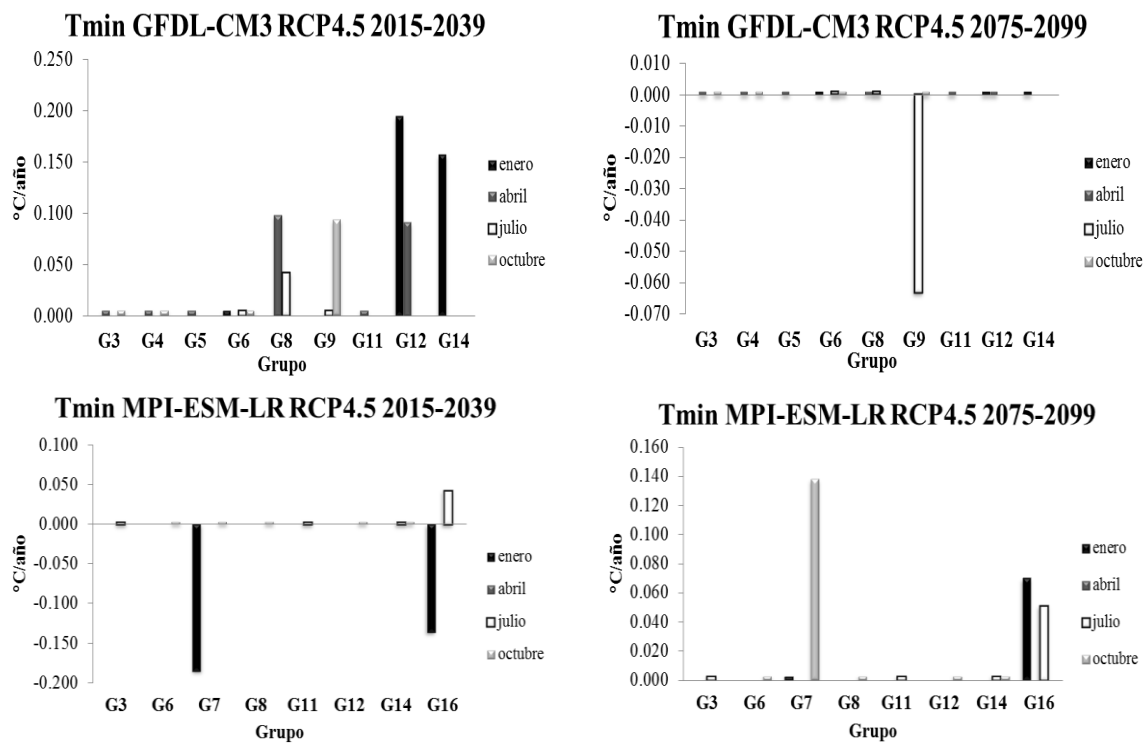


Figura 4.1.7. Gráficas de coeficiente de tendencia ($^{\circ}\text{C}/\text{año}$) para Tmin mensual en los grupos seleccionados, escenario RCP4.5, horizontes 2015-2039 y 2075-2099, y modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR.

En la tabla 4.1.5 se observan los posibles cambios en las tendencias con un escenario RCP4.5. Se pueden tener cambios de tendencias negativas en lo observado a positivas en lo proyectado, como son los casos de G8, G9, G12 (GFDL-CM3) y G16 (MPI-ESM-LR).

Tabla 4.1.5. Tendencias ajustadas para RCP4.5 de Tmin mensual con los modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR

GFDL-CM3	Tmin											
	Observado				2015-2039				2075-2099			
RCP4.5	enero	abril	julio	octubre	enero	abril	julio	octubre	enero	abril	julio	octubre
G3	NS	-0.027	-0.023	NS		NS		NS		NS		NS
G4	NS	-0.061	0.029	-0.076		NS		NS		NS		NS
G5	-0.197	-0.094	-0.046	-0.050		NS				NS		
G6	NS	NS	0.033	NS	NS		NS	NS	NS		NS	NS
G8	NS	-0.041	-0.026	-0.048		0.098	0.042			NS	NS	
G9	-0.048	-0.053	-0.062	-0.082			NS	0.094			-0.063	NS
G11	0.049	0.053	0.094	0.055		NS				NS		
G12	-0.021	-0.011	NS	NS	0.195	0.091			NS	NS		
G14	0.045	NS	NS	NS	0.157				NS			

MPI-ESM-LR	Tmin											
	Observado				2015-2039				2075-2099			
RCP4.5	enero	abril	julio	octubre	enero	abril	julio	octubre	enero	abril	julio	octubre
G3	NS	-0.027	-0.023	NS			NS				NS	
G6	-0.197	-0.094	-0.046	-0.050				NS				NS
G7	NS	NS	0.033	NS	-0.185			NS	NS			0.138
G8	NS	-0.041	-0.026	-0.048				NS				NS
G11	0.049	0.053	0.094	0.055			NS				NS	
G12	-0.021	-0.011	NS	NS				NS				NS
G14	0.045	NS	NS	NS			NS	NS			NS	NS
G16	NS	NS	-0.028	NS	-0.136		0.042		0.070		0.051	

En general, para los grupos seleccionados, los resultados más relevantes se mostraron para el escenario RCP8.5 y el horizonte lejano, en comparación con el RCP4.5 y el horizonte cercano; ya que hubo una mayor cantidad de tendencias significativas de incremento.

En Tmax en el periodo de 2075-2099, los grupos G12, G15 (ambos GFDL-CM3) y G16 (MPI-ESM-LR) se proyecta un aumento significativo de temperatura para el mes de julio, para RCP4.5 y RCP8.5. Es decir durante este mes se tendría un aumento más acelerado de Tmax tanto en un escenario moderado como en uno más extremo. Incluso en G16 ocurriría algo similar para Tmin, ya que enero y julio presentan tendencias de incremento para los dos escenarios.

4.2 Eventos Climáticos Extremos con Cambio Climático

Eventos extremos y cambio climático es un tema de frontera, pues no se tiene una metodología específica para abordarlo. Esta investigación es un primer esfuerzo por incluir el análisis de los eventos extremos en el contexto de cambio climático en México. Para lo cual se decidió tomar un horizonte más lejano y mucho más largo, para poder observar de una mejor manera el cambio en tales eventos.

El cálculo de los índices se hizo utilizando directamente las salidas diarias de los modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR con RCP4.5 y RCP8.5 para el periodo 2055-2099. No se les dio ningún tratamiento previo, ni se utilizó algún método de reducción de escala (con los cuales se incrementa la incertidumbre).

Se pretendió determinar si las salidas diarias de los modelos servirían para realizar un análisis de eventos extremos y sobre todo qué confiabilidad se podía tener en cuanto a las proyecciones. El primer paso de la metodología fue comparar los resultados de los índices observados, con aquellos resultantes de las series históricas de los modelos. Como en el caso de proyecciones mensuales, las salidas de los modelos no se consideraron validas en todos los grupos. Sin embargo con la selección sistemática realizada, se tuvo que el desempeño de los modelos fue lo suficientemente robusto como para proseguir con las proyecciones de eventos climáticos extremos en condiciones de cambio climático.

4.2.1 Comparación entre Índices Observados e Históricos

Esta comparación se hizo con el periodo completo de cada una de las series de los índices observadas, para el periodo 1960-2005 (registro final de las series históricas de los modelos). Sin embargo hubo casos donde esto no fue posible, puesto que en algunos grupos las series observadas eran más cortas. El objetivo de utilizar toda la extensión de las series y no solo el periodo 1961-1990, fue porque en los análisis de eventos extremos se requiere de la mayor cantidad de registros posibles.

La selección se hizo con los mismos criterios que en el caso mensual (representatividad de la variabilidad y por rango de valores), pero ahora aplicados a las series de los índices. En la tabla 4.2.1 se encuentran los grupos seleccionados para cada uno de los índices con los diferentes modelos. En la figura 4.2.1 se muestra de manera espacial los grupos que fueron seleccionados.

Tabla 4.2.1. Grupos seleccionados para las proyecciones de eventos climáticos extremos

GFDL-CM3	DC	NF	NC
	G3	G6	G6
	G5	G8	G9
	G12	G11	
MPI-ESM-LR			
	G3	G6	G8
	G5	G7	G14
	G15	G12	
		G14	

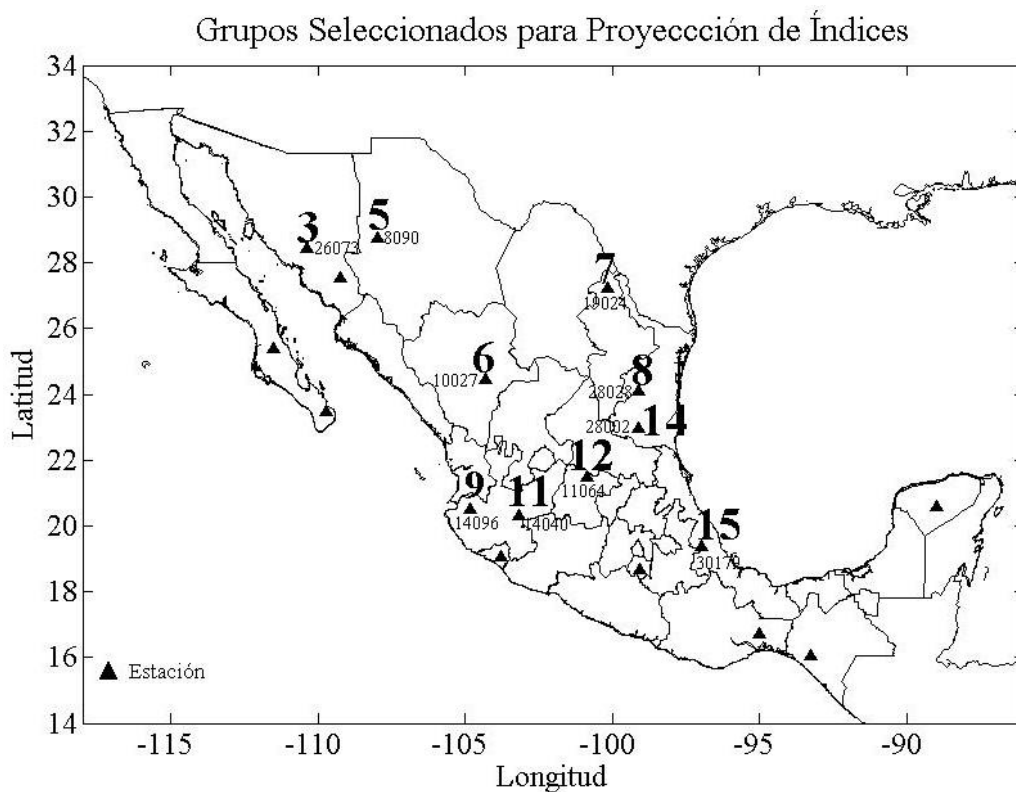


Figura 4.2.1. Grupos seleccionados para el análisis de eventos climáticos extremos bajo el contexto de cambio climático.

Con datos diarios, un menor número de grupos fueron seleccionados para realizar los análisis planteados (10 grupos), esto se justifica ya que en series diarias puede existir mucha más variabilidad. Considerando que las salidas de los modelos pueden no representar lo observado por la baja resolución espacial que tienen. No son capaces de reproducir fenómenos a escala regional, los cuales influyen en los eventos extremos.

Una vez que se eligió qué series se podían analizar con cambio climático para obtener resultados creíbles, el siguiente paso fue el obtener histogramas de frecuencia. Así de esta manera determinar posibles cambios en eventos extremos con proyecciones de modelos. Los intervalos de los histogramas se hicieron de tamaños similares para poder hacer comparaciones entre resultados. A continuación se muestran los resultados que se obtuvieron para los 10 grupos seleccionados.

4.2.2 Proyección en Índices de Eventos Climáticos Extremos

Ahora se presentan los resultados que se obtuvieron al analizar los eventos climáticos extremos de días cálidos, noches frías y noches cálidas, en el contexto de cambio climático. Los umbrales que se utilizaron fueron los mismos que se calcularon en la parte observada, para poder hacer comparaciones entre lo actual y el futuro.

a) Días Cálidos

En la figura 4.2.2 y 4.2.3 se muestran histogramas de frecuencia para los modelos GFDL-CM3 y MPI_ESM-LR respectivamente. Representan el número de años que hay con una cierta cantidad de días cálidos para G3, G5, G12 y G15 (según cada caso). Se incluye lo observado y las proyecciones de los modelos con RCP4.5 y RCP8.5.

En los grupos, se tiene un corrimiento hacia una mayor cantidad de días cálidos en un año. Es decir, hay más años con una mayor cantidad de días cálidos que en lo observado. Se puede notar que el incremento de días cálidos es menor para el escenario RCP4.5 y mayor para el RCP8.5, como será de esperarse.

Con el modelo GFDL-CM3 se tiene un mayor número de ocurrencia de días cálidos para G3 y G5, en comparación con MPI-ESM-LR. Lo que significa que con GFDL-CM3 hay un mayor número de Tmax diarias cálidas; incluso aquí el máximo de los intervalos pueden llegar hasta 200 días (el 55% de días del año) y con MPI-ESM-LR el máximo que se alcanzaría sería 160 (el 44% de días del año).

Para G12 (GFDL-CM3) los DC27.5 tienen un corrimiento mayor que en los otros grupos con este mismo modelo. Aquí podrían ocurrir hasta 240 días con Tmax > 27.5°C, de acuerdo con RCP8.5, este grupo corresponde a la parte del centro de México (Altiplano Central). Con G15 (MPI-ESM-LR) ocurre algo similar, ya que también hay una ocurrencia de días cálidos que puede llegar hasta los 219 días con Tmax diaria > 32 °C. Cabe recordar que para este grupo el indicador tuvo una tendencia de incremento, incluso de Tmax mensual. Es posible que este grupo tenga un aumento de temperatura persistente.

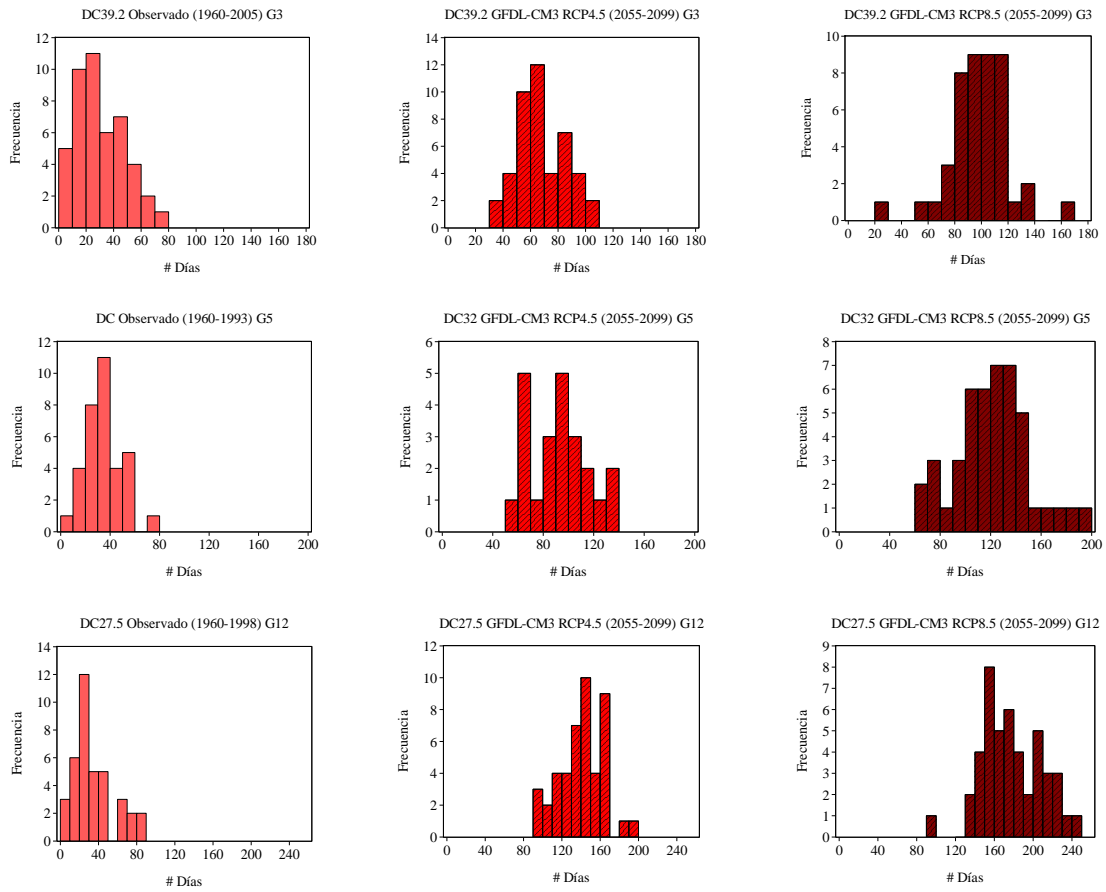


Figura 4.2.2. Histogramas de días cálidos para los grupos G3, G5 y G12, lo actual y lo proyectado con el modelo GFDL-CM3.

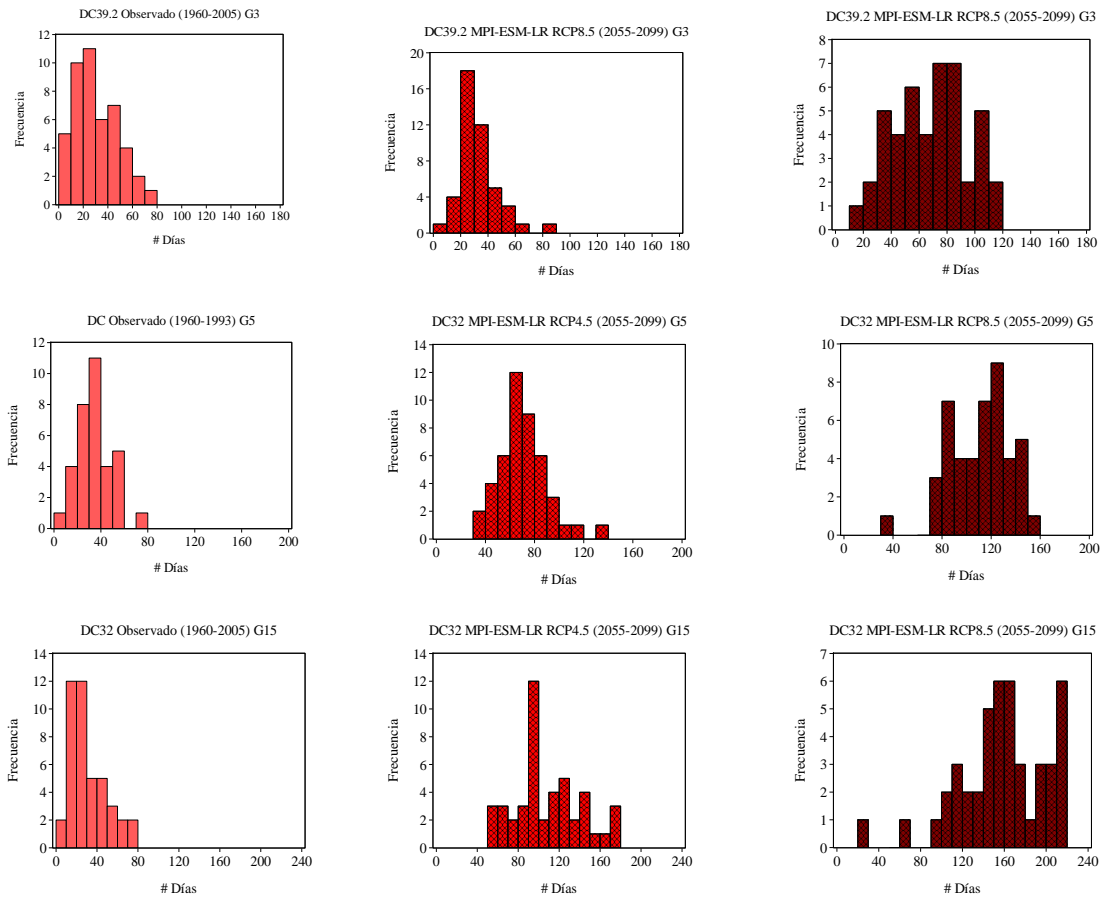


Figura 4.2.3. Histogramas de días cálidos para los grupos G3, G5 y G15, lo actual y lo proyectado con el modelo MPI-ESM-LR.

En la tabla 4.2.2 se aprecia de una mejor manera el cambio entre los intervalos: mínima cantidad de DC, intervalo con mayor frecuencia de años y máxima cantidad de DC. En algunos casos hubo más de un intervalo para el máximo de ocurrencia de años.

Destaca el desplazamiento de los intervalos superiores de los histogramas proyectados respecto a los observados, los cuales sobrepasan la cantidad de 100 días cálidos, en algunos casos hasta los 200. Mientras que la parte observada el intervalo superior no rebasa la cantidad de 100 DC. Los valores de los intervalos más moderados ocurren para G3 con el modelo MPI-ESM-LR, donde hay un traslape entre intervalos.

Tabla 4.2.2. Cambios en intervalos de número de días cálidos para el periodo de 2055-2099 con RCP4.5 y RCP8.5

Intervalos G3 DC39.2	Observado (1960-2005) #años	Intervalos G3 DC39.2	GFDL-CM3 RCP4.5 (2055-2099) #años	Intervalos G3 DC39.2	GFDL-CM3 RCP8.5 (2055-2099) #años
[0,10)	5	[30,40)	2	[20,30)	1
[20,30)	11	[60,70)	12	[90,100)[100,110)[110,120)	9
[70, 80)	1	[100, 110)	2	[160,170)	1
Intervalos G5 DC32	Observado (1960-1993) #años	Intervalos G5 DC32	GFDL-CM3 RCP4.5 (2055-2099) #años	Intervalos G5 DC32	GFDL-CM3 RCP8.5 (2055-2099) #años
[0,10)	1	[20,30)	1	[60,70)	2
[30,40)	11	[60,70)	11	[130,140)	7
[70,80)	1	[130,140)	2	[190,200)	1
Intervalos G12 DC27.5	Observado (1960-1998) #años	Intervalos G12 DC27.5	GFDL-CM3 RCP4.5 (2055-2099) #años	Intervalos G12 DC27.5	GFDL-CM3 RCP8.5 (2055-2099) #años
[0,10)	3	[100,110)	3	[90,100)	1
[20,30)	12	[140,150)	10	[150,160)	8
[80,90)	2	[190,200)	1	[240, 250)	1
Intervalos G3 DC39.2	Observado (1960-2005) #años	Intervalos G3 DC39.2	MPI-ESM-LR RCP4.5 (2055-2099) #años	Intervalos G3 DC39.2	MPI-ESM-LR RCP8.5 (2055-2099) #años
[0,10)	5	[0,10)	1	[10,20)	1
[20,30)	11	[20,30)	18	[70,80)[80,90)	7
[70, 80)	1	[80,90)	1	[110,120)	2
Intervalos G5 DC32	Observado (1960-1993) #años	Intervalos G5 DC32	MPI-ESM-LR RCP4.5 (2055-2099) #años	Intervalos G5 DC32	MPI-ESM-LR RCP8.5 (2055-2099) #años
[0,10)	1	[30,40)	2	[30,40)	1
[30,40)	11	[60,70)	12	[120, 130)	9
[70,80)	1	[130, 140)	1	[150, 160)	1
Intervalos G15 DC32	Observado (1960-2005) #años	Intervalos G5 DC32	MPI-ESM-LR RCP4.5 (2055-2099) #años	Intervalos G5 DC32	MPI-ESM-LR RCP8.5 (2055-2099) #años
[0,10)	2	[50,60)	3	[20,30)	1
[10,20)[20,30)	12	[90,100)	12	[150,160)[160,170)	6
[70,80)	2	[170,180)	3	[210, 220)	6

b) Noches Frías

En las figuras 4.2.4 y 4.2.5, se muestran los histogramas para el indicador de noches frías para los modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR respectivamente. Los grupos analizados son G6, G7, G8, G12 y G14. En algunos de los grupos se muestran histogramas de las series observadas para diferentes periodos, lo que indica los cambios estructurales que ocurrieron para esas series.

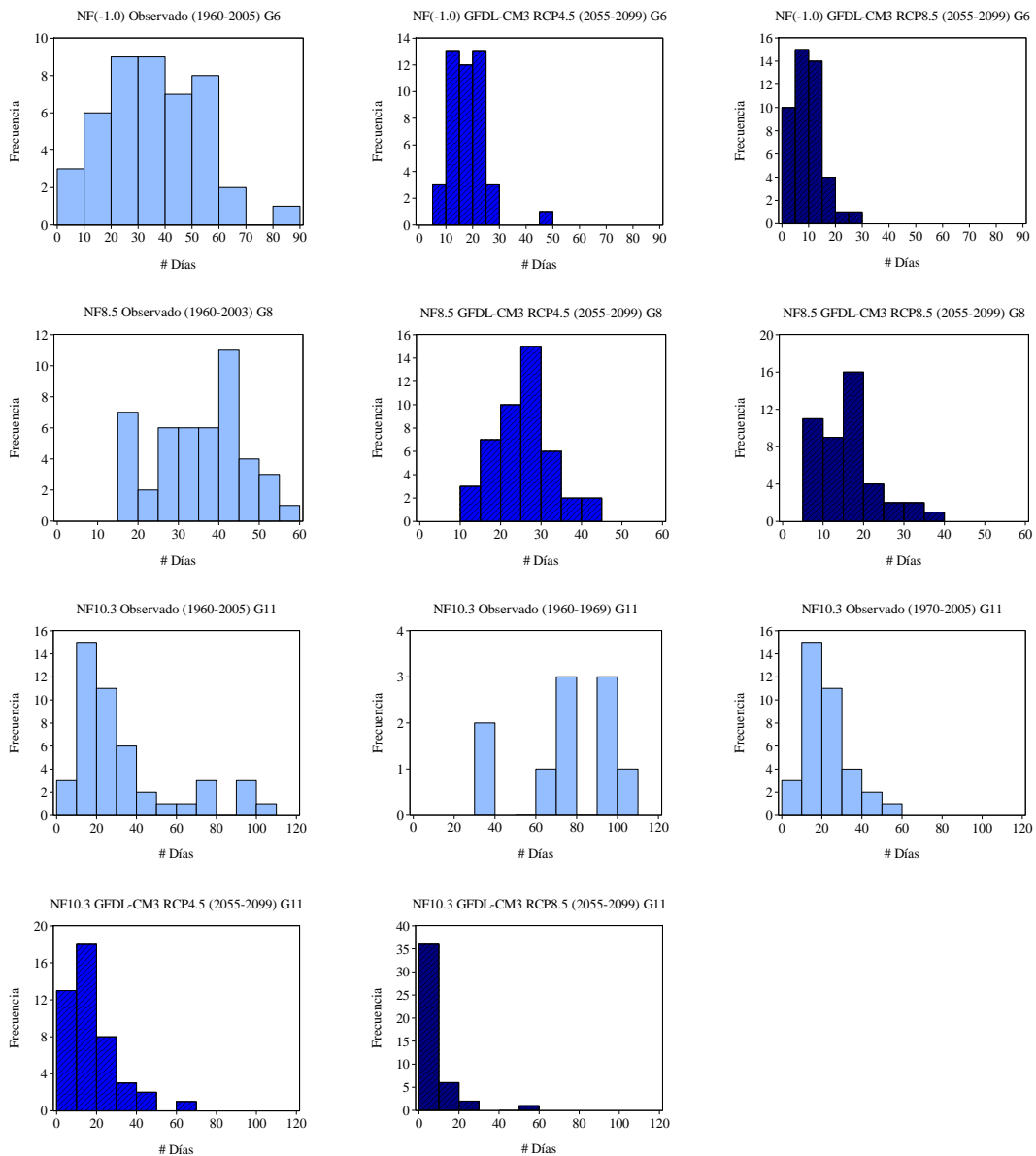


Figura 4.2.4. Histogramas de noches frías para G6, G8 y G11, lo actual y lo proyectado con el modelo GFDL-CM3.

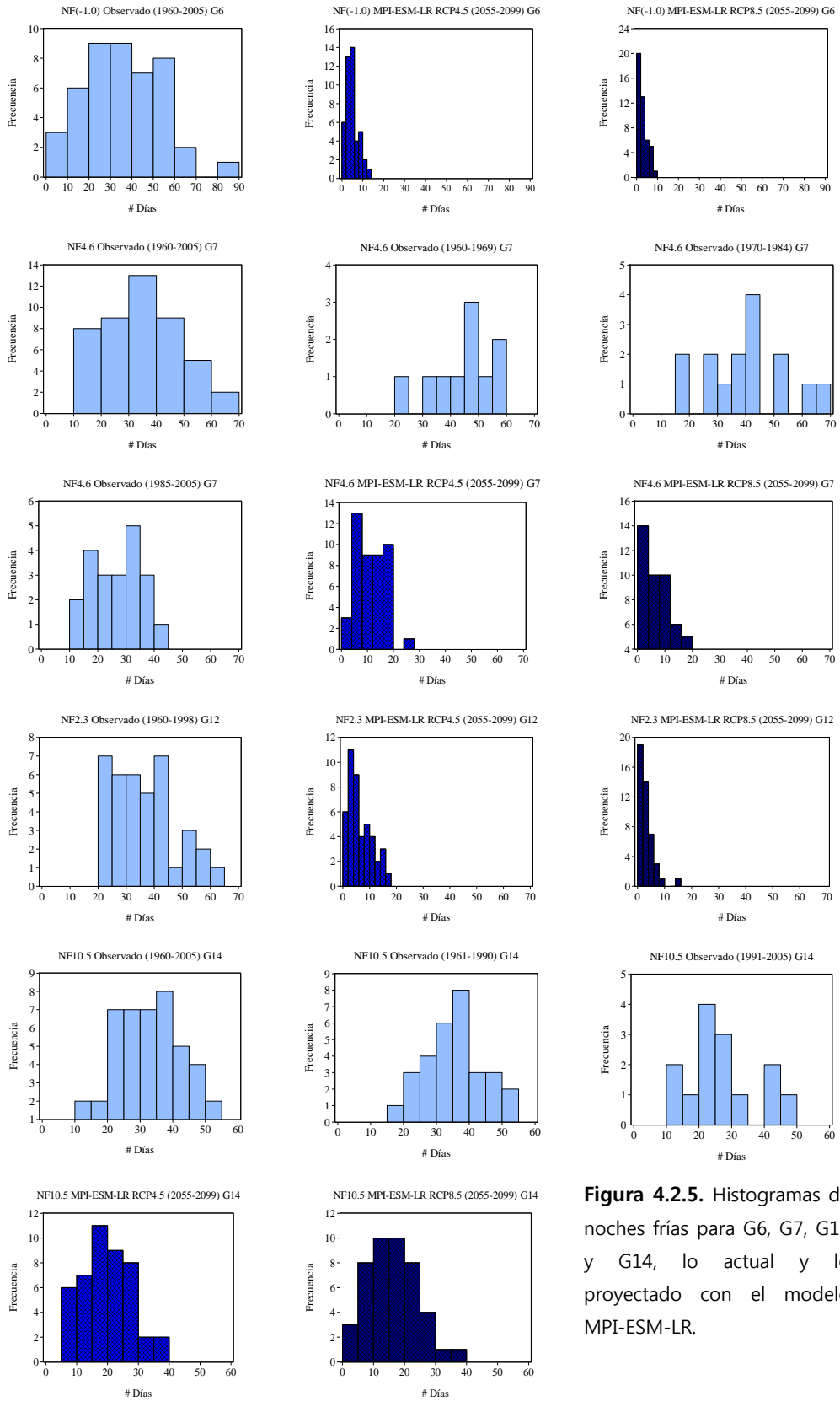


Figura 4.2.5. Histogramas de noches frías para G6, G7, G12 y G14, lo actual y lo proyectado con el modelo MPI-ESM-LR.

Los efectos contrarios a DC ocurrieron para NF, las cuales disminuirán por un aumento en temperatura. Así, la exposición a una menor cantidad de T_{min} frías podría ser benéfica en algunos casos, como en la disminución del número de heladas.

En efecto, para los grupos analizados hay un desplazamiento hacia una menor cantidad de noches frías pero un aumento de frecuencia de años. La disminución de NF es mayor para los escenarios RCP8.5. Para G6 con GFDL-CM3 se muestran intervalos mayores de ocurrencia de noches frías, incluso con RCP8.5. Por otro lado con MPI-ESM-LR la ocurrencia de NF(-1) se concentra en el intervalo [0, 10). Lo que significa que hay una menor cantidad de T_{min} < -1.0 °C para el modelo MPI-ESM-LR que para GFDL-CM3.

En G14 (MPI-ESM-LR) los histogramas no cambian mucho entre RCP4.5 y RCP8.5, y coincide con los pocos cambios que se tuvieron en T_{min} mensual. Es decir, este grupo no tendría grandes cambios en NF. En G8 (GFDL-CM3) ocurre algo similar, ya que no se muestra una disminución de NF8.5 muy relevante, se puede apreciar un corrimiento de sólo 5 días en los intervalos entre los escenarios RCP4.5 y RCP8.5.

En el caso de G12 también hay una disminución de NF2.3 (MPI-ESM-LR), aunado con lo ocurrido para DC27.5 (GFDL-CM3), en este grupo se tendría una mayor ocurrencia de temperaturas extremas cálidas y una disminución de temperaturas extremas frías.

En la tabla 4.2.3 se muestran los intervalos: mínima cantidad de NF, intervalo con mayor frecuencia de años y máxima cantidad de NF.

Se tiene un desplazamiento hacia intervalos de un menor número de noches frías, incluso se presenta un traslape en intervalos. Hay un mayor acotamiento entre los valores de los intervalos, debida al hecho de la disminución de estos eventos y por la propia definición del indicador, ya que no puede haber cantidades negativas. También se puede notar que hay poca diferencia entre los intervalos de RCP4.5 respecto a RCP8.5, no hay un drástico cambio de NF entre escenarios.

Tabla 4.2.3. Cambios en intervalos de número de noches frías para el periodo de 2055-2099 con RCP4.5 y RCP8.5

Intervalos G6 NF(-1)	Observado (1960-2005) #años	Intervalos G6 NF(-1)	GFDL-CM3 RCP4.5 (2055-2099) #años	Intervalos G6 NF(-1)	GFDL-CM3 RCP8.5 (2055-2099) #años
[0,10)	3	[5,10)	3	[0,5)	10
[20,30)[30,40)	9	[10,15][20,25)	13	[5,10)	15
[80,90)	1	[45,50)	1	[25,30)	1
Intervalos G8 NF8.5	Observado (1960-2003) #años	Intervalos G8 NF8.5	GFDL-CM3 RCP4.5 (2055-2099) #años	Intervalos G8 NF8.5	GFDL-CM3 RCP8.5 (2055-2099) #años
[15,20)	7	[10,15)	3	[5,10)	11
[40,45)	11	[25, 30)	15	[15,20)	16
[55,60)	1	[40,45)	1	[35,40)	1
Intervalos G11 NF10.3	Observado (1970-2005) #años	Intervalos G11 NF10.3	GFDL-CM3 RCP4.5 (2055-2099) #años	Intervalos G11 NF10.3	GFDL-CM3 RCP8.5 (2055-2099) #años
[0,10)	3	[0,10)	13	[0,10)	36
[10,20)	15	[10,20)	18	[0,10)	36
[50,60)	1	[60,70)	1	[50,60)	1
Intervalos G6 NF(-1)	Observado (1960-2005) #años	Intervalos G6 NF(-1)	MPI-ESM-LR RCP4.5 (2055-2099) #años	Intervalos G6 NF(-1)	MPI-ESM-LR RCP8.5 (2055-2099) #años
[0,10)	3	[0,2)	6	[0,2)	20
[20,30)[30,40)	9	[4,6)	14	[0,2)	20
[80,90)	1	[12,14)	1	[8,10)	1
Intervalos G7 NF4.6	Observado (1985-2005) #años	Intervalos G7 NF4.6	MPI-ESM-LR RCP4.5 (2055-2099) #años	Intervalos G7 NF4.6	MPI-ESM-LR RCP8.5 (2055-2099) #años
[10,15)	2	[0,4)	3	[0,4)	14
[30,35)	5	[4,8)	13	[0,4)	14
[40,45)	1	[24,28)	1	[16,20)	5
Intervalos G12 NF2.3	Observado (1960-1998) #años	Intervalos G12 NF2.3	MPI-ESM-LR RCP4.5 (2055-2099) #años	Intervalos G12 NF2.3	MPI-ESM-LR RCP8.5 (2055-2099) #años
[20,25)	7	[0,2)	6	[0,2)	19
[40,45)	7	[2, 4)	11	[0,2)	19
[60,65)	1	[16,18)	1	[14,16)	2
Intervalos G14 NF10.5	Observado (1991-2005) #años	Intervalos G14 NF10.5	MPI-ESM-LR RCP4.5 (2055-2099) #años	Intervalos G14 NF10.5	MPI-ESM-LR RCP8.5 (2055-2099) #años
[10,15)	2	[5,10)	6	[0,5)	3
[20,25)	4	[15, 20)	11	[10,15][15, 20)	10
[45,50)	1	[35,40)	2	[35,40)	1

c) Noches Cálidas

En las figuras 4.2.6 y 4.2.7 se muestran los histogramas de noches cálidas para los grupos seleccionados y los modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR respectivamente. Para este indicador también se proyecta un aumento en el número de noches cálidas, se espera un mayor número de T_{min} cálidas. En algunos casos se incluyen histogramas divididos por periodos, esto porque durante el periodo observado se detectaron cambios estructurales.

Los intervalos proyectados para RCP8.5 superan por mucho aquellos de la parte observada, lo que muestra un aumento importante en la ocurrencia de T_{min} cálidas.

Los mayores aumentos resultaron en el grupo G9 (GFDL-CM3) con RCP8.5, se pueden llegar a tener hasta 255 noches cálidas durante un año, es decir habría esta cantidad de noches con T_{min} > 19.9 °C. Le sigue el número de noches cálidas en G6, podrían ocurrir 211 eventos con T_{min} > 13.3 °C.

Los grupos G8 y G14 con el modelo MPI-ESM-LR, pueden llegar a tener hasta 200 noches cálidas. Es decir más de la mitad del año se experimentarían T_{min} mayores a 23.5 °C en G14 y mayores a 24 °C en G8. Comparado con aproximadamente la cuarta parte de NC que se tuvieron en el periodo observado, el incremento es considerablemente superior.

En la tabla 4.2.4 se muestran los intervalos: mínima cantidad de NC, intervalo con mayor frecuencia de años y máxima cantidad de NC.

Caso contrario a las noches frías, las noches cálidas presentan un mayor desplazamiento de lo proyectado respecto a lo observado. Sólo en G14 (MPI-ESM-LR) hay un traslape de intervalos entre lo actual y los dos escenarios. Destaca el intervalo [250, 260) para G9 (GFDL-CM3), el cual es el de mayor valor entre los grupos analizados; es posible que durante un año ocurra entre 250 y 260 noches cálidas, aproximadamente tres cuartas partes del año.

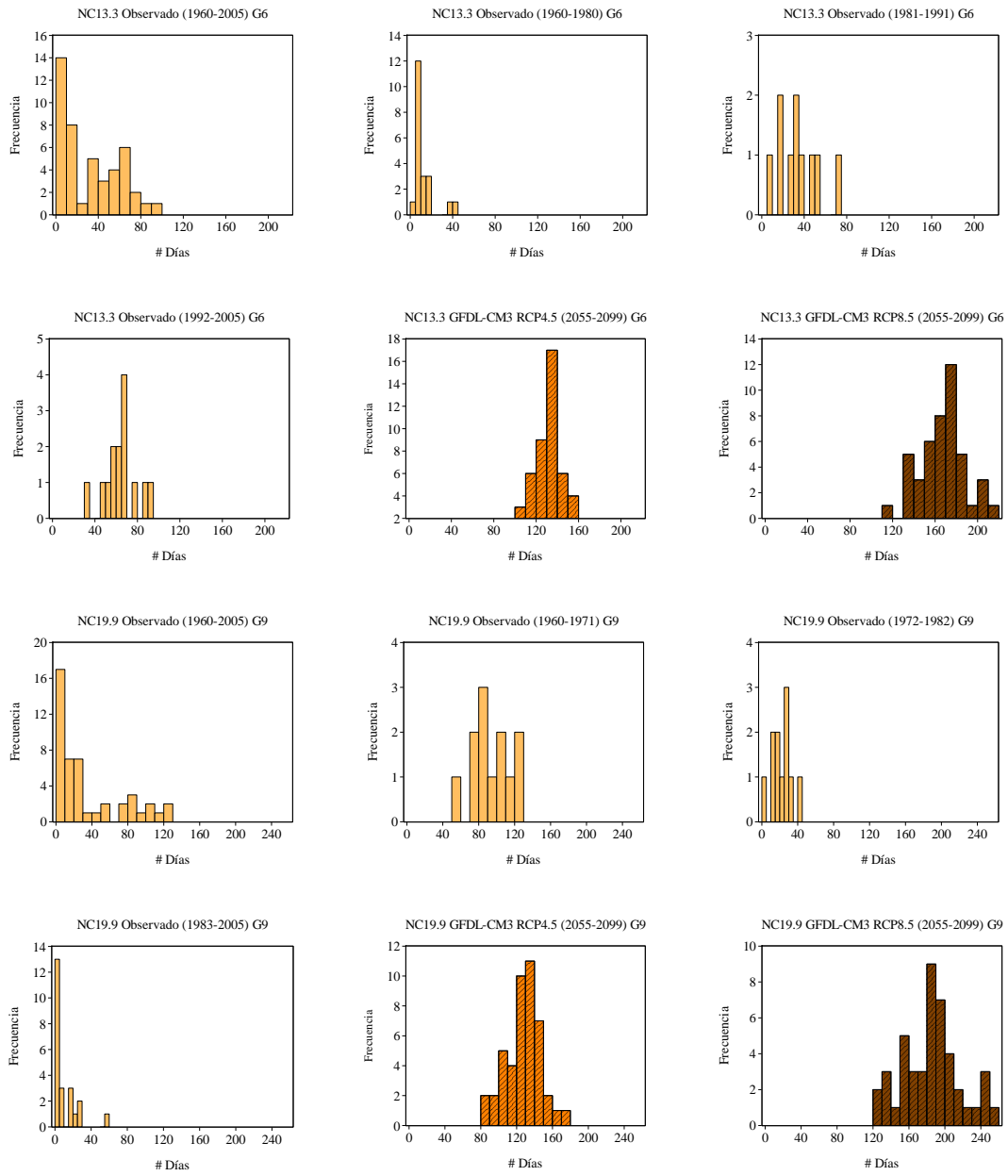


Figura 4.2.6. Histogramas de noches cálidas para G6 y G9, observado y lo proyectado con el modelo GFDL-CM3.

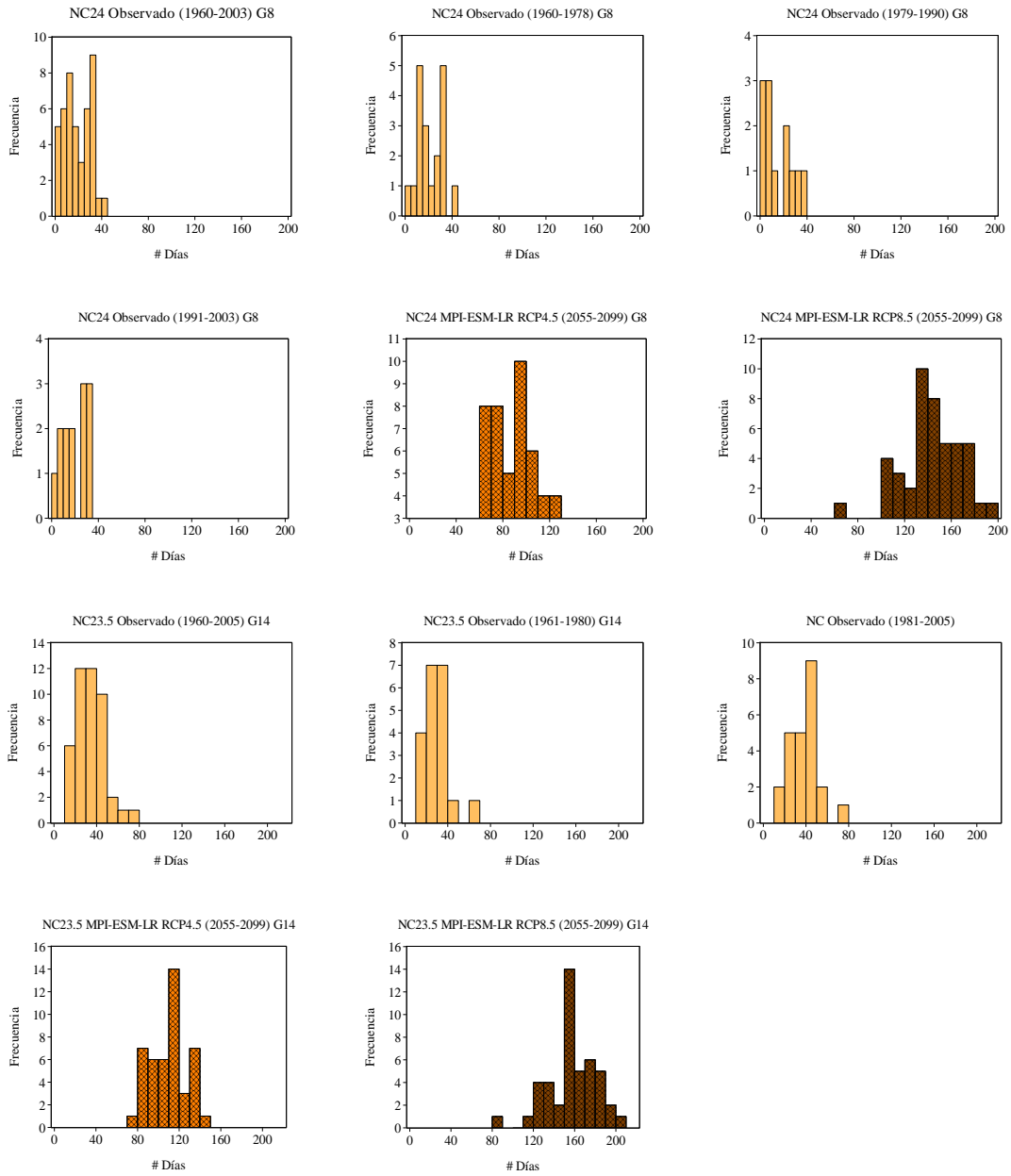


Figura 4.2.7. Histogramas de noches cálidas para G8 y G14, lo observado y lo proyectado con el modelo MPI-ESM-LR.

Tabla 4.2.4. Cambios en intervalos de número de noches cálidas para el periodo de 2055-2099 con RCP4.5 y RCP8.5

Intervalos G6 NC13.3	Observado (1992-2005) #años	Intervalos G6 NC13.3	GFDL-CM3 RCP4.5 (2055-2099) #años	Intervalos G6 NC13.3	GFDL-CM3 RCP8.5 (2055-2099) #años
[30,35)	1	[100,110)	3	[110,120)	1
[65,70)	4	[130,140)	17	[170,180)	12
[90,95)	1	[150,160)	4	[210,220)	1
Intervalos G9 NC19.9	Observado (1983-2005) #años	Intervalos G9 NC19.9	GFDL-CM3 RCP4.5 (2055-2099) #años	Intervalos G9 NC19.9	GFDL-CM3 RCP8.5 (2055-2099) #años
[0,5)	13	[80,90)	2	[120,130)	2
[0,5)	13	[130,140)	11	[180,190)	9
[55,60)	1	[170,180)	1	[250,260)	1
Intervalos G8 NC24	Observado (1991-2003) #años	Intervalos G8 NC24	MPI-ESM-LR RCP4.5 (2055-2099) #años	Intervalos G8 NC24	MPI-ESM-LR RCP8.5 (2055-2099) #años
[0,5)	1	[60,70)[70,80)	8	[60,70)	1
[25,30)	3	[90,100)	10	[130,140)	10
[30,35)	3	[120,130)	4	[190,200)	1
Intervalos G14 N23.5	Observado (1981-2005) #años	Intervalos G14 N23.5	MPI-ESM-LR RCP4.5 (2055-2099) #años	Intervalos G14 N23.5	MPI-ESM-LR RCP8.5 (2055-2099) #años
[10,20)	2	[70,80)	1	[80,90)	1
[40,50)	9	[110,120)	14	[150,160)	14
[70,80)	1	[140,150)	1	[200,210)	1

Por medio de este análisis, se determinó que efectivamente el aumento en la temperatura incrementaría el número de noches y días cálidos y por tanto habría un decremento en noches frías. Con esto la población podría estar expuesta a temperaturas cálidas más extremas y menos frías. Los posibles impactos asociados a estos cambios, estarían en función de la región analizada, el sector impactado y la capacidad de respuesta social a esos cambios.

4.3 Posibles Impactos por Cambios en Temperatura

Para relacionar impactos específicos en sectores (salud, agricultura, hídrico, etc.), medio ambiente, biodiversidad entre otros, es necesario análisis más detallados, ya que no sólo una variable como la temperatura puede influir en estos. En este caso sólo se mostrarán algunos ejemplos relacionados con los resultados obtenidos, ya que no es parte del objetivo de esta tesis.

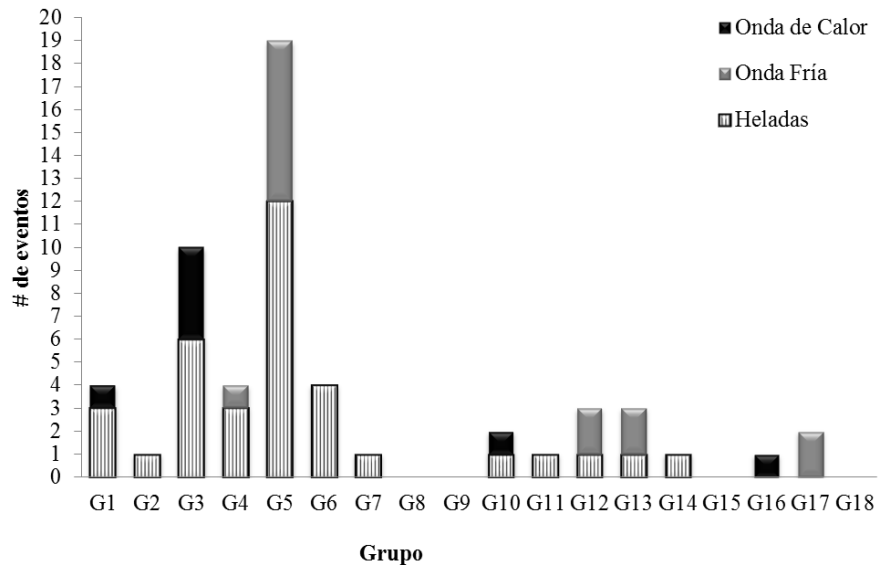


Figura 4.3.1. Cantidad de eventos registrados en el inventario histórico de desastres-Desinventar para los 18 grupos analizados.

En la figura 4.3.1 se muestran la cantidad de eventos registrados en el inventario histórico de desastres *Desinventar* (<http://online.desinventar.org/>) a partir de 1970 para ondas de calor, ondas de frío y heladas, estos dos últimos eventos relacionados generalmente con la presencia de frentes fríos. Los eventos graficados son aquellos ocurridos en el municipio correspondiente a la ubicación de cada estación meteorológica seleccionada por grupo. Desafortunadamente estos datos son escasos en cuanto a información, ya que únicamente engloban los desastres registrados en esta base. Por lo que éstos no se pudieron relacionar directamente con los resultados obtenidos de detección de tendencias, sus cambios estructurales y *outliers* significativos considerados en el modelo de regresión lineal. Sin embargo, eventos como las heladas y ondas de frío y sus desastres podrían haber aumentado, ya que en las tendencias mensuales de T_{min} mensual se observó una disminución para los grupos del norte y centro del país, los más susceptibles a estos eventos.

Particularmente en G3 destaca el evento de ondas de calor las cuales ocurrieron en el año de 1993, se presentaron temperaturas cálidas que provocaron 2 ondas de calor y 1 sequía durante

los meses de junio y agosto, debido al fenómeno de "El Niño". Lo que coincide con el cambio estructural de 1993 para este indicador, con cambio en la media y en la tendencia. Es probable que las T_{min} cálidas hayan sido más sensibles a este incremento y por tanto hubo el aumento en noches cálidas.

Como se puede observar sobresalen los eventos de heladas para los grupos ubicados en el norte del país. Destaca G5, donde hubo una ocurrencia de 12 heladas, 7 ondas frías y 1 nevada registrados; sin embargo no se pudieron relacionar con resultados de este estudio. Lo anterior debido a que la serie observada analizada fue para el periodo de 1960-1993 y los eventos, en su mayoría, ocurrieron en la década de los 2000s. Sin embargo en este grupo se detectó una tendencia de aumento de noches frías y una disminución de T_{min} mensual en enero y octubre (meses fríos), por lo que se puede decir que en esta región es posible que este comportamiento haya continuado hasta un periodo más actual. Es decir, una mayor presencia de temperaturas extremas frías ocasionadas por una mayor frecuencia de frentes fríos o bien por una mayor intensidad de los mismos, lo cual sería una pregunta por responder, la cual surge de la detección del incremento de NF para este grupo. Los impactos por el aumento de temperaturas frías podría llevar a una mayor incidencia de enfermedades respiratorias, muertes por hipotermias, o incluso indirectamente con la inhalación de monóxido de carbono de fogones no controlados. Tan sólo en el periodo de 1985-2005, se presentaron 933 decesos en Chihuahua (G5) (Matías *et al.*, 2014).

Asimismo, en el ajuste de tendencias sobresalieron casos de "El Niño" de 1998, se presentaron en grupos G11, G13, G14, G15, G17 como *outliers* de aumento para temperaturas diarias cálidas, correspondientes a días y noches cálidos. Cabe mencionar, que durante este año se presentaron una gran cantidad de incendios en el país con un total de 14,445 (CONAFOR, 2014). En su mayoría estuvieron relacionados con la sequía y altas temperaturas provocadas por este fenómeno durante los meses críticos como marzo, abril y mayo. Estos incendios afectaron bosques tropicales de Chiapas (G17) y Oaxaca (Sosa *et al.*, 2004). Sin embargo, en general, los incendios estas más directamente relacionados con una escasa precipitación y baja humedad relativa, y sobre todo por causas antropógenicas (Villers-Ruiz *et al.*, 2012). Si a las condiciones anteriormente mencionadas se les incluye el aumento de temperatura que se puede estar experimentado, los grupos que podrían verse afectados son G12, G13, G15 y G17. Con cambio climático con los escenarios RCP4.5 o RCP8.5, los cuales indican el aumento de frecuencia de temperaturas diarias extremas cálidas en G12 y G15, podría incrementar la ocurrencia de incendios en estos grupos. Lo anterior, siempre y cuando haya una disminución de precipitación, lo cual se tendría que analizar.

Otro sector que se podría ver afectado por cambios en la temperatura es el agrícola. Hay varios factores que pueden ocasionar pérdidas en los cultivos, entre ellos las plagas. Estas dependen

de las condiciones climáticas para su desarrollo; como lo demostró Ramos (2013) para el cultivo de maíz en el estado de Guanajuato (G12). Plagas como la gallina ciega y gusano cogollero, disminuyen únicamente ante la presencia de T_{min} extremas frías. Mientras que el chapulín de la milpa es muy sensible a temperaturas bajas, es decir hay más mortandad aún sin la presencia de T_{min} muy frías. Por lo que el riesgo para los cultivos sería alto ante la presencia de temperaturas cálidas que favorezcan el desarrollo de las plagas.

De manera general, de acuerdo con los resultados de tendencias de temperatura y eventos extremos para G12, podría favorecerse el desarrollo de esas plagas, puesto que hay un aumento significativo de T_{max} anual, mensual (enero, julio y octubre) y días cálidos para ese grupo y no hay cambios significativos en T_{min} ni sus eventos extremos. Con cambio climático es posible tener resultados similares puesto que estos apuntan hacia temperaturas más cálidas, incluso hay un aumento de T_{min} (GFDL-CM3) para RCP4.5 en el horizonte cercano. Lo anterior siempre y cuando no se sobrepase el umbral de desarrollo de cada plaga y el cultivo.

5

Discusión y Conclusiones

5.1 Discusión de Resultados

Los resultados que se obtuvieron confirman la idea de que no hay un aumento de temperatura generalizado y homogéneo en el planeta, por lo que se requieren estudios regionales específicos. La detección de cambios en una región es la base para poder evaluar impactos, como los señalados en el Reporte del Grupo II del IPCC (IPCC, 2014). En este reporte no se muestran evidencias de impactos para México, en gran parte por falta de estudios relacionados al tema. La importancia de esta tesis radica en ser una base para los futuros estudios de impactos, ya que se maneja la detección de cambios como el punto de partida para poder hacer atribución de cambios en el clima.

En el análisis de eventos climáticos extremos es necesario contar con datos diarios confiables, sin embargo en muchas de las estaciones en México, no se cuenta con un estricto control de calidad de los mismos. Por lo que es un problema a resolver y al que se enfrentan las investigaciones de tipo climático. Aunado a lo anterior, la falta de metadatos de las estaciones meteorológicas dificulta la decisión de descartar o aceptar inhomogeneidades (artificiales o naturales) en las series de datos. Por lo que en esta investigación y otras (por ejemplo, Salas, 2008; Conde *et al.*, 2011a, y Conde *et al.*, 2011b), se ha lidiado con esta falta de disponibilidad, a través de la selección de los mejores registros y establecer regionalizaciones acorde al objetivo de cada investigación (Von Luxburg *et al.*, 2012).

Para detectar cambios en la temperatura, se utilizó un modelo de regresión lineal, diferente al regularmente se emplea y que se puede ajustar con Excel, por ejemplo. El modelo utilizado en este estudio incluye la detección de cambios estructurales en las series. Los cambios en las series pueden ser en el comportamiento en la tendencia, brincos por cambios en el promedio de la serie o ambos casos. Cuando no son detectadas estas discontinuidades, entonces la tendencia ajustada puede ser poco confiable, ya que con un solo modelo se están caracterizando dos o más segmentos con diferentes características climáticas. Al incluir en el modelo de regresión lineal cambios estructurales, es posible describir su comportamiento por medio de una tendencia antes y después del cambio. Lo anterior garantiza una correcta especificación del modelo. Así, el modelo propuesto para ajustar tendencias es un modelo sencillo pero que proporciona más información acerca de nuestra serie a analizar.

Así con un análisis de tendencias se detectaron cambios de aumento y disminución de Tmax y Tmin; lo mismo ocurrió para el caso de los eventos extremos. En algunos casos no se detectaron cambios. Esto es posible ya que a nivel regional pueden influir otros factores dando una respuesta de aumento o decremento de temperatura. Hay que considerar que en los

eventos extremos aunque se tenga una tendencia de decremento o que no estén cambiando, no se debe descartar la presencia de temperaturas muy extremas.

Hubo casos donde los cambios fueron en el promedio de temperatura y en sus extremos, otros solamente en los extremos o bien únicamente en promedio. Efectivamente un promedio no se comporta de la misma manera que los casos extremos, pues describen comportamientos diferentes de una serie de datos.

En Tmax y Tmin mensuales se observó un tipo de patrón en el comportamiento de las tendencias: disminución-aumento. En el norte del país (G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7, G8 y G14) se tuvo en la mayoría de los casos una disminución de Tmax y Tmin. En el centro del país (G9, G10, G11, G12 y G13) se tuvieron más variaciones con opuestos de tendencias, esto es, mientras que Tmax aumentaba la Tmin disminuía y viceversa. Para regiones más al sur como G15, G17 y G18, en la mayor parte de los meses analizados sus tendencias de Tmax y Tmin fueron de incremento. Este tipo de división de comportamientos, de manera general, se puede deber a la influencia orográfica en cada zona, así como de fenómenos meteorológicos regionales. Por ejemplo, en el norte los frentes fríos y ondas polares son los que mayormente influyen en estas regiones. Mientras que en el sur además de los nortes influyen las tormentas y ciclones tropicales, en la región del centro hay una influencia por ambas partes.

En eventos extremos, los umbrales calculados para definir los índices de clima extremo fueron exclusivos de cada grupo. Si los índices se definieran con un mismo umbral para todas las regiones, los resultados que se obtendrían podrían ser comparables pero no representativos, ya que las variaciones de temperatura varían de región a región.

Se detectó un aumento de días cálidos en grupos vecinos, para el norte de México en G1, G2, G3 y G4, hacia el sur G13, G15 y G16. Decrementos en G8 y G14 (regiones que incluyen el estado de Tamaulipas) y en el litoral del Pacífico en los estados de Jalisco y Nayarit G9 y G11. Más al sur-sureste ocurrió un decremento en G17 y G18 (Chiapas y la Península de Yucatán, respectivamente). El comportamiento de aumento o disminución de días cálidos, se concentró entre grupos vecinos. Incluso se da una alternancia entre comportamientos. Lo anterior se puede deber a la influencia de efectos regionales, como las características orográficas de cada región. Incluso la tendencia puede estar influenciada por la presencia de fenómenos más regionales como "El Niño", lo que provoca un aumento de temperatura y por tanto conducir a un incremento de Tmax extremas.

En los dos índices para temperatura mínima, noches frías y noches cálidas, se detectaron varios cambios, en su mayoría distribuidos en la zona norte del país. Cambios consistentes con un aumento de Tmin diaria extrema ocurrieron en G1, G4, más al sur en G15. Lo anterior se puede entender como un desplazamiento de una distribución de temperatura donde las colas de los extremos se corren hacia temperaturas cálidas. En G5 la tendencia que dominó fue la de decremento de Tmin diaria, desplazamiento hacia una mayor ocurrencia de temperaturas frías.

Mientras que en otros grupos los cambios fueron opuestos, es decir, incremento-decremento incluso cambio-no cambio. El último caso se puede describir como un cambio en la simetría de una distribución de temperatura, donde sólo una de sus colas cambia mientras que la otra permanece casi constante. Tendencias no significativas predominaron en la parte central del territorio para noches cálidas.

En G15 (que incluye Veracruz) se detectaron cambios hacia un aumento en el promedio y en sus extremos, para Tmax y Tmin. En G1 y G4 el aumento sólo fue hacia eventos extremos más cálidos. En el caso opuesto G5 presentó aumento en la cantidad de Tmin frías. No hubo cambios en los eventos extremos para G10 (Colima).

Estos cambios pueden proporcionarnos una idea de los posibles impactos que puedan ocurrir, sin aún considerar cambio climático. Es decir, los impactos en función del comportamiento de las tendencias.

Las tendencias detectadas para los tres indicadores coinciden en parte con las obtenidas por el Met Office (2011). Para días cálidos hay coincidencia de incremento en G3 (parte oeste de Sonora), G4 (sur de Sonora, norte de Sinaloa), G13 (Morelos) y G15 (región central de Veracruz). También hay concordancia de decremento en G14 (sur de Tamaulipas). Para noches frías destacan las coincidencias que existen en la disminución de NF en G15, el aumento en la zona de la Península de Yucatán (G18) y las tendencias no significativas en la zona de G12 (Guanajuato), G16 (Oaxaca) y G17 (Chiapas). Con noches cálidas sobresale la tendencia de decremento en G9 (Jalisco) sobre el litoral del Pacífico, el incremento en G14 (sur de Tamaulipas), G15 (Veracruz) y G4 (sur de Sonora y norte de Sinaloa). Incluso el decremento que hay en la Península de Yucatán.

Por otra parte la disminución de días cálidos, noches cálidas e incluyendo tendencias negativas para Tmin mensual en G9 (parte oeste de Jalisco con frontera a Nayarit), concuerdan con el patrón de enfriamiento en el estado de Nayarit cerca de las costas del Pacífico encontrado por Salas (2008).

Los resultados que se obtuvieron son confiables, ya que hubo coincidencias al compararse con otros estudios que emplean diferentes métodos de análisis (Met Office, 2011).

Algunos de los cambios estructurales y *outliers* detectados en los ajustes de tendencias correspondieron a años con fenómenos de "El Niño" o "La Niña", los cuales pudieron influir en el aumento o disminución de temperatura y por tanto también de eventos climáticos extremos. Aunque no necesariamente estos fenómenos pueden incidir en los eventos extremos, como lo mostró López (2009). El autor realizó un estudio de caso para el análisis de eventos climáticos extremos y su relación con "El Niño" o "La Niña". No encontró una relación directa entre aumento/disminución de eventos ante estos fenómenos. Incluso en años neutrales también se

presentó una mayor cantidad de eventos extremos, sin embargo años con fenómenos de "El Niño" intenso destacaron como lo fue 1998.

En el análisis de tendencias las series de tiempo estadísticamente tienen que ser estacionarias y se ha trabajado con este supuesto; sin embargo a través del tiempo y con cambio climático puede no cumplirse. Por tanto las tendencias observadas no se podrían extrapolar. Hacer proyecciones con cambio climático conduce a estudiar un clima con condiciones diferentes, en este caso un mayor forzamiento radiativo sobre el planeta. Por tanto en este estudio se hizo un análisis de posibles tendencias con escenarios futuros para dos horizontes uno cercano y uno lejano. De igual manera se hizo el cálculo de índices de eventos climáticos extremos futuros.

Sabiendo que el cambio climático está en proceso, la no estacionaridad aquí se estudia considerando dos tipos de series, la observada y otra para el futuro.

Para realizar proyecciones con cambio climático, está la discusión de qué cantidad de modelos utilizar, si modelo por modelo es viable (Tebaldi & Knutti, 2010) o si un ensamble de modelos es la solución (Reichler & Kim, 2008). Por otra parte se tiene la propuesta de Conde & Gay (2008), quienes utilizan una selección de modelos basada en la guía del IPCC (IPCC-TGICA, 2007). Si bien ellos no utilizan un ensamble de modelos, toman en cuenta un amplio rango de incertidumbre en su selección, porque al momento de promediar salidas de modelos se considera podría perderse o mezclar físicas de modelos diferentes. En esta tesis se tomaron como base dos de los modelos seleccionados por Conde & Gay (2008), por los criterios de: i) actualidad de simulaciones, ii) validez, iii) comparabilidad para estudios posteriores, iv) representatividad de incertidumbre y v) utilidad en evaluaciones de impacto.

Cabe señalar que las proyecciones con escenarios de cambio climático, no puede ser utilizadas como pronósticos y tomarse totalmente como ciertas. Sobre todo cuando se trata de eventos extremos, ya que se debe tener salidas diarias con mucha más variaciones que los datos mensuales. Incluso porque aún los modelos no son capaces de simular en su totalidad fenómenos meteorológicos de escala regional, los cuales influyen en los eventos extremos.

Por tanto, las metodologías para proyectar cambios futuros en eventos extremos son un gran esfuerzo considerando las limitantes que se tienen, y no se deben de descartar, ya que es un tema de frontera.

Las salidas de los modelos GFDL-CM3 y MPI-ESM-LR se validaron para los 18 grupos con criterios sistemáticos para ser utilizadas en el análisis. Como era de esperarse el número de grupos seleccionados fue disminuyendo conforme la escala de temporal de las salidas históricas de los modelos se incrementaba. Es decir para el caso diario la confiabilidad de los modelos disminuyó comparado al caso mensual o de comparación con climatología, sin embargo las pocas series resultantes de la selección son robustas y por tanto las proyecciones que se obtuvieron. Hay que considerar que los análisis no se pueden generalizar para todo México,

pero son viables para los casos particulares de los sitios seleccionados. Las ausencias más notables de casos para analizar fueron para los grupos localizados sobre la Península de Baja California y el sureste de México, incluyendo la Península de Yucatán. Es decir, los modelos tienen deficiencias para reproducir el clima en estas regiones, estos mismos resultados fueron encontrados por Cavazos *et al.* (2012b).

Desafortunadamente no se logró hacer muchas comparaciones entre las proyecciones de los modelos para un mismo grupo, variable e/o índice, ya que la selección de los modelos tuvo muchas variaciones. Por ejemplo, en el caso mensual se tuvo una mayor cantidad de casos para Tmax con el modelo MPI-ESM-LR y para Tmin con GFDL-CM3. Aunque no se puede afirmar que con el modelo GFDL-CM3 la Tmin o Tmax son subestimada/sobreestimada de mayor manera que con MPI-ESM-LR y viceversa.

En el ajuste de tendencias mensuales futuras, hubo un mayor número de tendencias de incremento para el escenario RCP8.5 y el horizonte lejano (2075-2099). Para Tmax el incremento es más acelerado con el modelo MPI-ESM-LR que con GFDL-CM3. Lo contrario ocurre para Tmin, en este caso el aumento es mayor para GFDL-CM3.

Al comparar las proyecciones de los escenarios se tuvieron tendencias no significativas, por una transición de tendencia de decremento a una de incremento positiva. Con una tasa de cambio cuyo valor no fue lo suficientemente grande para ser significativa.

Los cambios en signo de las tendencias nos pueden indicar lo que se podría esperar en un futuro para un horizonte cercano y uno lejano en los grupos analizados.

También hay que destacar que estos análisis con salidas tomando los modelos individuales proporcionan información más amplia, que tal vez con un promedio entre modelos no se hubiese tenido. Si se usarán los 23 modelos con todas las combinaciones posibles (escenarios y horizontes), se tendría un "abanico" más amplio de resultados, el cual indicaría la incertidumbre de las proyecciones.

Para el cálculo de los índices de eventos extremos se aplicaron las salidas de datos diarios sin ningún tipo de reducción de escala en los datos. Se pudo comprobar qué tan válidos eran para los análisis de eventos extremos. Considerando los resultados de comparación entre lo observado y lo histórico del modelo en el caso mensual, se esperaba pocos resultados alentadores y efectivamente este fue el caso. Para días cálidos se utilizaron G5, G3, G12 (todos GFDL-CM3), G3, G5, y G15 (todos MPI-ESM-LR); para noches frías G6, G8, G11 (todos GFDL-CM3), G6, G7, G12 y G14 (todos MPI-ESM-LR); finalmente para noches cálidas G6, G9 (todos GFDL-CM3), G8 y G14 (todos MPI-ESM-LR). Lo cual comprueba lo dicho por Sillmann & Roeckner (2008) y el IPCC (2012), la confianza dependerá del tipo de evento, la región, la cantidad y calidad de datos de observación, el nivel de comprensión de los procesos climáticos regionales y la confiabilidad de las simulaciones por modelos. De lo contrario habría una cantidad homogénea entre la selección de los grupos.

Los histogramas de frecuencia, mostraron incrementos hacia un mayor número de eventos de días y noches cálidas (extremos más calientes) y una menor cantidad de noches frías (extremos menos fríos). Es decir, tanto con un escenario RCP4.5 y uno RCP8.5 se proyecta tener una mayor cantidad de eventos extremos cálidos y menos fríos para un horizonte de 2055-2099.

El grupo que destaca por el incremento de días cálidos es G12 (GFDL-CM3), donde podrían ocurrir hasta 240 días con $T_{max} > 27.5$ °C, de acuerdo con RCP8.5. Este grupo corresponde a la parte del centro de México (Altiplano Central), y donde una mayor ocurrencia de temperaturas extremas diarias tendrían un gran impacto en la población si no hay adaptación. Con G15 (MPI-ESM-LR) ocurre algo similar, ya que también hay una ocurrencia de días cálidos que puede llegar hasta los 219 días con T_{max} diaria > 32 °C. Este caso es particular ya que en los análisis de clima observado y proyección de tendencias mensuales, se observa un "definitivo" aumento de T_{max} .

Para noches frías hay pocas variaciones entre las proyecciones de RCP4.5 respecto a RCP8.5 con ambos modelos. Hay un mayor acotamiento en el dominio de los histogramas, probablemente por la propia definición del indicador, ya que no puede haber cantidades negativas ni aumentos. Destaca G14 (MPI-ESM-LR), donde las NF no hay un cambio sobresaliente entre RCP4.5 y RCP8.5, y coincide con los pocos cambios que se tuvieron en T_{min} mensual observada.

Contrario a los resultados de noches frías, las noches cálidas presentan un mayor desplazamiento de lo proyectado respecto a lo observado. Los mayores aumentos resultaron en el grupo G9 (GFDL-CM3) con RCP8.5, se pueden llegar a tener hasta 255 noches cálidas durante un año. Es decir habría esa cantidad de noches con $T_{min} > 19.9$ °C, aproximadamente tres cuartas partes del año. Le sigue el caso de G6, donde podrían ocurrir hasta 211 eventos en un año con $T_{min} > 13.3$ °C.

Los resultados mostrados concuerda con lo encontrado por Conde (2012), donde en su análisis, aunque es con índices calculados con promedios mensuales, sobresale un aumento de meses extra cálidos $T_{max} > 35$ °C, sobre todo en la parte norte del país. Este análisis fue un primer intento de plantear eventos extremos en el contexto de cambio climático. Pero fue poco acertado calcular índices con temperaturas mensuales, ya que para el análisis de eventos extremos son requeridos datos diarios por todo lo mostrado en esta tesis.

Para hablar de impactos en sectores o el medio ambiente, es necesario hacer estudios más detallados, ya que hay dependencia de más factores y variables y no sólo de temperatura, como en la cantidad de incendios forestales (Sosa *et al.*, 2004; Villers-Ruiz *et al.*, 2012), plagas (Ramos, 2013), distribución de biodiversidad (<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/437/arriaga.html>), etc.

Sin embargo esta investigación podría dar una primera aproximación de los impactos que se podría esperar. Por ejemplo, como riesgos de plagas en aquellos estados donde temperaturas

extremas están ocurriendo o se espera ocurran con cambio climático: G3 (sur de Sonora), G4 (sur de Sonora y norte de Sinaloa), G12 (Guanajuato), G13 (Morelos), G15 (centro de Veracruz) y G16 (sur de Oaxaca). Aumento de ondas de calor en el norte del país, por el incremento de días cálidos en G1, G2, G3 y G4. Disminución de heladas por el decremento de T_{min} y noches frías en G6, G8, G11, G13, G15 y G4.

En este caso la variable de temperatura es una variable homogénea que permitió mostrar una metodología robusta de detección de cambios en eventos extremos y su contexto de cambio climático, la cual se podría aplicar con otras variables como la precipitación.

5.2 Conclusiones

Con esta investigación se cumplió con el objetivo de la tesis detectar cambios observados y mostrar posibles proyecciones (en el contexto de cambio climático), para eventos climáticos extremos de temperatura y registros de temperaturas extremas (máxima y mínima) mensuales para diferentes regiones en México.

Las conclusiones de este trabajo son las siguientes:

- La detección es la pauta para poder plantearse preguntas acerca de lo que está ocurriendo en algunas regiones de México. Lo que incluye, cuál puede ser el origen de los cambios detectados, qué fenómenos de tipo meteorológico pueden explicar los cambios. Sin detección no habría una atribución.
- La metodología cubrió un análisis con datos observados y otro en el contexto de cambio climático. Permitted tener resultados presentes y posibles futuros.
- La metodología planteada tiene la ventaja de poder realizar análisis de tendencias cuando aplicando una regionalización cuando no se tiene mucha disponibilidad de datos o la falta de calidad de ellos.
- La regionalización dependerá del tipo de investigación y lo que se tenga por objetivo.
- Si bien no se pueden generalizar los resultados con la selección de una estación por región, cada uno de los grupos de estaciones está bien representado. Porque el análisis se basó en la calidad de datos observados y no en la cantidad, para que los resultados fueran lo más completos y robustos posible en cada una de los 18 grupos.
- De acuerdo al análisis con datos observados, se detectó en qué regiones de México hay cambios significativos y en cuáles no hubo cambios, tanto en T_{max} y T_{min}, así como en los índices de eventos climáticos extremos.
- Hay que considerar que si bien en algunas regiones las tendencias no son significativas en algunos índices, esto no implica que no puedan ocurrir extremos muy cálidos o muy fríos (temperaturas muy extremas).

- Se detectaron tendencias de decremento para T_{min} mensual en la mayor parte de la zona norte del país, para algunas regiones del sur hubo incrementos de T_{max} y T_{min} mensuales.
- Cambios significativos, ya sea de aumento y disminución para los tres índices ocurren en los grupos que abarcan Baja California Sur, Sonora, Tamaulipas, Jalisco, Veracruz y Península de Yucatán, lo que significa que hay un cambio en los eventos climáticos extremos en estas regiones.
- El grupo G5 localizado sobre el estado de Chihuahua tiene un mayor decremento en T_{min} y un aumento de noches frías. Para esta zona hubo una mayor frecuencia de T_{min} cada vez más frías.
- Los grupos G1 (norte de Baja California) y G15 (centro de Veracruz), tuvieron una mayor frecuencia de T_{max} y T_{min} diarias más cálidas. Los eventos extremos presentaron una disminución de noches frías, un aumento de noches cálidas y de días cálidos.
- Los grupos en los cuales no se detectaron cambios en eventos extremos fueron: días cálidos: G5, G7 y G10; NC: G6, G7, G10, G11, G12 y G13; noches frías: G2, G9, G10, G12, G14, G16 y G17. Puede ser poco probable que ocurran días con T_{min} y T_{max} con valores extremos poco usuales.
- Aún sin cambio climático los grupos podrían presentar impactos de acuerdo a la dirección del comportamiento de los eventos extremos, por tener una mayor ocurrencia de días con temperaturas extremas sólo cálidas o sólo frías. O bien que ocurran los dos extremos, un mayor número de eventos cálidos y al mismo tiempo también fríos.
- Algunas regiones bajo condiciones de cambio climático, podrían presentar mayores impactos por estar expuestos actualmente a cambios en temperatura. Sobre todo en aquellos lugares donde el promedio de temperatura y sus extremos presentan incrementos.

En el contexto de cambio climático:

- La validez de las salidas de los modelos disminuye conforme aumenta la escala temporal de los mismos.
- El modelo GFDL-CM3 reprodujo de mejor manera la T_{min} mensual y el MPI-ESM-LR la T_{max} mensual.
- En una gran parte de casos la falta de validez de los modelos ante lo observado se debió a la subestimación y/o sobreestimación de valores.
- Los modelos en gran medida no tuvieron un buen desempeño en la Península de Baja California y la Península de Yucatán.

- En la mayor parte de los grupos no todas las tendencias ajustadas para los modelos y periodos analizados, fueron significativas y de incremento. La mayor cantidad de incrementos se tuvieron con el RCP8.5 en el horizonte lejano.
- En los grupos donde hubo una tendencia no significativa, es posible que se tenga mayor tiempo para adaptarse a los cambios.
- Análisis con salidas tomando modelos individuales proporcionan mayor información que con un promedio entre modelos.
- En los grupos analizados, se mostró un aumento en días cálidos y noches cálidas, y una disminución en noches frías, como se esperaba.
- Las proyecciones más dramáticas con RCP8.5 fueron para días cálidos y noches cálidas durante el periodo de 2055-2099, obviamente los eventos relacionados con la cola superior de una distribución de Tmax y Tmin respectivamente. Para días cálidos destaca G12 (GFDL-CM3) donde podrían ocurrir hasta 240 días con Tmax > 27.5°C y G15 (MPI-ESM-LR) donde el número de eventos podría alcanzar hasta los 219 días con Tmax diaria > 32 °C. Para noches cálidas en G9 se pueden llegar a tener hasta 255 noches cálidas durante un año, es decir se tendría esta cantidad de noches con Tmin>19.9 °C. Los grupos G8 y G14 con el modelo MPI-ESM-LR, pueden llegar a tener hasta 200 noches cálidas, mientras que en el periodo observado sólo se tuvo como máximo la cuarta parte de esta cantidad.
- Menores cambios entre escenarios ocurrieron con las noches frías.
- Si bien las salidas de los modelos tal cual se presentan no reproducen los índices observados en todos los grupos. Los resultados presentados son confiables, se cumplieron con las condiciones para que así lo fueran. Los índices convergen hacia una mayor frecuencia de eventos extremos cálidos en las regiones analizadas para México.
- En general las salidas de los modelos no pueden representar en su totalidad la variabilidad en todas las regiones para México. Probablemente por la baja resolución de los modelos y porque aún persiste mucha incertidumbre en la escala temporal que se maneja. Aun así, los resultados aquí obtenidos son una primera aproximación del uso de proyecciones de datos diarios y el procedimiento que se siguió para desarrollar este análisis proporciona confiabilidad en los resultados obtenidos.

Trabajo a futuro

- Realizar el mismo análisis para la variable de precipitación y relacionarla con los resultados de temperatura.
- Incluir más estaciones para el análisis de los eventos climáticos extremos.
- Hacer análisis con otros índices sobre todo mensuales, ya que únicamente se incluyeron índices anuales.

- En el caso de los índices de umbrales, definir estos de acuerdo a un sector específico, por ejemplo para agricultura cuyos umbrales son importantes para el desarrollo de cultivos, como el maíz, café, etc. De esta manera poder determinar los impactos que podría tener un aumento o disminución de eventos climáticos extremos (temperatura y precipitación).
- Aplicar el método de Teoría de Valores Extremos, método que también se utiliza para analizar los eventos extremos.
- En el contexto de cambio climático, utilizar otros modelos, horizontes y escenarios, para un análisis más completo, y así cubrir un rango más amplio de incertidumbre.

Apéndice 1

A continuación se describe en qué consiste cada una de las pruebas utilizadas para la validación del modelo de regresión lineal utilizado en esta investigación, de acuerdo a sus supuestos relacionados.

A1. No Autocorrelación

Se asume que los residuales no están correlacionados uno con otro. Si los residuales están correlacionados con otro, entonces se dice que hay "autocorrelación" o que están "correlacionados serialmente" (Brooks, 2008).

a) Correlograma-Q y Correlograma- Residuales al Cuadrado (Pulido & Pérez, 2008)

El correlograma es una gráfica que dibuja series de correlación entre el residuo actual y el residuo con diferentes retrasos temporales. En este caso la hipótesis nula es H_0 : No hay autocorrelación, por tanto la serie es estacionaria y la hipótesis alternativa H_a : Si hay autocorrelación, por tanto la serie no es estacionaria. Para aceptar H_0 es necesario que la probabilidad sea mayor a 5%, es decir $\text{prob} > 0.05$.

El correlograma de residuales al cuadrado, como su nombre lo indica, son los residuos al cuadrado y nos proporciona información acerca de la varianza. La hipótesis nula sería H_0 : no hay autocorrelación en la varianza y la hipótesis alternativa H_a = Si hay autocorrelación en la varianza. Para aceptar H_0 es necesario que la probabilidad sea mayor a 5%, es decir, $\text{prob} > 0.05$.

b) Prueba Breusch-Godfrey (Gujarati, 2003)

Es una prueba general para la autocorrelación, la cual permite: a) variables regresoras no aleatorias, como valores rezagados de la variable regresada y aparecer como variable explicativa; b) esquemas autorregresivos de orden mayor; c) promedios movibles de términos de error con ruido blanco de orden superior.

$$\text{Sea } y_t = \beta_0 + \beta_1 x_t + u_t \quad (\text{A1.1})$$

Supóngase que el término de error u_t sigue el esquema autorregresivo de orden p de la siguiente manera,

$$u_t = \rho_1 u_{t-1} + \rho_2 u_{t-2} + \dots + \rho_p u_{t-p} + \varepsilon_t \quad (\text{A1.2})$$

Donde ε_t es un término de error de ruido blanco, y cuya hipótesis nula a probar es

$H_0 = \rho_1 = \rho_2 = \dots = \rho_p = 0$, es decir, no existe correlación serial de ningún orden. Se utiliza una regresión auxiliar:

$$\hat{u}_t = \alpha_0 + \alpha_1 x_t + \hat{\rho}_1 \hat{u}_{t-1} + \hat{\rho}_2 \hat{u}_{t-2} + \dots + \hat{\rho}_p \hat{u}_{t-p} + \varepsilon_t \quad (\text{A1.3})$$

Es decir es la regresión del valor estimado de u_t sobre x_t observada y sus valores rezagados $\hat{u}_{t-1}, \hat{u}_{t-2}, \dots, \hat{u}_{t-p}$

Para A1.2 se obtiene el coeficiente de determinación (R^2). Si el tamaño de la muestra es lo suficientemente grande, entonces $(n-p)R^2 \sim \chi_p^2$. Es decir, asintóticamente, $n-p$ veces el valor de R^2 obtenido en la regresión auxiliar, sigue la distribución ji-cuadrada con p grados de libertad. Si en una aplicación $(n-p)R^2$ excede el valor crítico ji-cuadrada al nivel de significancia seleccionado, se puede rechazar la hipótesis nula, en cuyo caso, por lo menos una ρ en (A1.3.) significativamente diferente de cero.

Una desventaja de esta prueba es que el valor de p , la longitud del rezago, no puede especificarse *a priori*. Es inevitable un grado de experimentación con el valor de p .

A2. Normalidad

Los residuales se deben de distribuir de manera normal.

a) Prueba Jarque-Bera

Como los residuales del modelo no son observables, el estudio de la normalidad se lleva a cabo con los residuos estimados. Si la hipótesis se cumple, la distribución empírica de dichos residuos (estimados) debería presentar características similares a las de la distribución normal. En esta prueba se plantea en H_0 la existencia de normalidad en los residuales y en la H_a la no normalidad (Carrascal, 2001). El estadístico Jarque-Bera está dado por:

$$JB = n \left[\frac{S^2}{6} + \frac{(K-3)^2}{24} \right] \quad (\text{A2.1})$$

Donde n es el tamaño de la muestra, S es el coeficiente de asimetría y K es el coeficiente de curtosis. Para una variable que se distribuye normalmente se tiene que $S = 0$ y $K = 3$; por lo tanto, la prueba Jarque-Bera constituye una prueba de hipótesis conjunta de que S y K son 0 y 3, respectivamente. En dicho caso se espera que el valor estadístico de (A2.1) sea igual a cero. La distribución asintótica que sigue el estadístico, bajo H_0 , es una ji-cuadrada con 2 grados de libertad. Si el valor de p (probabilidad) calculado del estadístico JB es suficientemente bajo en una aplicación, lo cual sucedería si el valor del estadístico difiere en gran medida de cero, se puede rechazar H_0 . Pero si el valor de p es alto, lo cual pasa cuando el valor del estadístico está cercano a cero, no se rechaza la suposición de normalidad (Gujarati, 2003).

A3. Homoscedasticidad

a) Prueba White (Carrascal, 2001)

Se basa en la regresión de los errores mínimos cuadrados al cuadrado estimados, que son el indicativo de la varianza de los residuales, frente a un término independiente, los regresores, sus cuadrados y sus productos cruzados dos a dos (o de segundo orden).

Así partiendo del modelo

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + u_i \quad (\text{A3.1})$$

La regresión auxiliar es:

$$\hat{u}_i^2 = \alpha_0 + \alpha_1 x_{1i} + \alpha_2 x_{2i} + \alpha_3 x_{1i}^2 + \alpha_4 x_{2i}^2 + \alpha_5 x_{1i} x_{2i} + v_i \quad (\text{A3.2})$$

El estadístico que se propone para realizar el contraste es $\lambda = NR^2$, donde el R^2 es el coeficiente de determinación de la regresión auxiliar. Este estadístico se distribuye asintóticamente, bajo la hipótesis nula, como una $\chi^2(p)$ donde p es el número de variables incluidas en la regresión auxiliar, exceptuando el término independiente. Este contraste reside en que si los residuales fueran homoscedásticos, las variables incluidas en la regresión auxiliar no deberían tener ningún poder explicativo sobre los residuos estimados al cuadrado y por tanto, el R^2 debería ser pequeño. Por ello si el valor muestral del estadístico es suficientemente alto como para que la probabilidad de rechazar la hipótesis nula siendo cierta sea menor al 5%, se rechazará la hipótesis nula de homoscedasticidad .

b) Prueba ARCH (Gujarati, 2003)

Es la prueba de heteroscedasticidad autorregresiva condicional, la cual analiza la autocorrelación que pueda existir en la varianza.

Para lo cual consideremos el modelo con k variables:

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 x_{1t} + \dots + \beta_k x_{kt} + u_t \quad (\text{A3.3})$$

y supóngase que al ser condicional respecto a la información disponible en el tiempo $(t - 1)$, el término de perturbación está distribuido como $u_t \sim N[0, (\alpha_0 + \alpha_1 u_{t-1}^2)]$, es decir u_t se distribuye de manera normal con media cero y $var(u_t) = (\alpha_0 + \alpha_1 u_{t-1}^2)$, esto es, la varianza de u_t sigue un proceso ARCH(1).

La varianza de u en el tiempo t es dependiente de la perturbación al cuadrado en el tiempo $(t - 1)$. La varianza del error podría depender no sólo del término de error al cuadrado, sino también de diversos términos de error al cuadrado rezagados dados de la siguiente manera:

$$var(u_t) = \sigma_t^2 = \alpha_1 u_{t-1}^2 + \alpha_2 u_{t-2}^2 + \dots + \alpha_p u_{t-p}^2 \quad (\text{A3.4})$$

sin autocorrelación en la varianza de los residuales, se tiene la hipótesis nula $H_0 = \alpha_1 = \dots = \alpha_p = 0$, en cuyo caso $var(u_t) = \alpha_0$ por lo que se tendría un efecto ARCH.

Para probar la hipótesis nula se usa la relación auxiliar

$$\hat{u}_t^2 = \hat{\alpha}_0 + \hat{\alpha}_1 \hat{u}_{t-1}^2 + \hat{\alpha}_2 \hat{u}_{t-2}^2 + \dots + \hat{\alpha}_p \hat{u}_{t-p}^2 \quad (\text{A3.5})$$

Así, H_0 se puede obtener al calcular nR^2 , donde R^2 es el coeficiente de determinación obtenido de la regresión auxiliar, suponiendo que $nR^2 \sim \chi_p^2$, es decir, para muestras grandes nR^2 sigue una distribución ji-cuadrada, cuyos grados de libertad son iguales al número de términos autorregresivos de la regresión auxiliar. Si la ji-cuadrada que se calculó es mayor que la del valor crítico entonces se rechaza la hipótesis nula.

A4. Estabilidad en los parámetros

a) Estadístico CUSUM

Se construye a partir de la suma acumulada de los residuos recursivos, los cuales son los errores de predicción un periodo hacia adelante en cada etapa de la estimación recursiva. Esta última consiste en la estimación secuencial del modelo especificado para distintos tamaños muestrales. Así si el número de parámetros del modelo es $K + 1$, la primer muestra utilizada para estimarlo sería de dicho tamaño y las posteriores se irían añadiendo una a una todas las observaciones hasta llegar al total de datos. En cada estimación se obtiene un vector de estimaciones que permite a su vez calcular la predicción correspondiente. De este modo, con las sucesivas estimaciones, se generan las series de los llamados residuos recursivos. La idea general en este tipo de estimaciones es que si no hay un cambio estructural, las estimaciones de los parámetros se mantendrán constantes al ir aumentando la muestra secuencialmente y los residuos no se desviarán ampliamente de cero.

Entonces para la CUSUM la suma acumulada de los residuos recursivos está dada por:

$$W_t = \frac{\sum_{\tau=K+2}^t W_\tau}{s} \quad t = K + 2, \dots, T \quad (\text{A4.1})$$

donde s es el error estándar de la regresión estimada con todas las observaciones disponibles.

Bajo la hipótesis de estabilidad estructural, el estadístico CUSUM tiene media cero, por lo que las sumas acumuladas que se alejen de dicho valor indican existencia de inestabilidad. El análisis se realiza representando los residuos W_t , frente al tiempo junto con las bandas de confianza obtenidas a partir de las rectas que unen los siguientes puntos:

$$[K + 1, \pm a(T - K - 1)] \text{ y } [T, \pm 3a(T - K - 1)] \quad (\text{A4.2})$$

siendo a un valor que esta tabulado para diferentes niveles de confianza. Para un nivel de confianza del 95% se tiene que $a = 0.948$. La hipótesis nula de estabilidad estructural se rechaza si el valor del estadístico W_t , sale fuera de las bandas, es decir, si es estadísticamente distinto de cero (Carrascal, 2001).

b) Estadístico CUSUMQ

Este estadístico se utiliza para contrastar la estabilidad del modelo con sumas acumuladas de los cuadrados de los residuos recursivos:

$$S_t = \frac{\sum_{\tau=K+2}^t w_{\tau}^2}{\sum_{\tau=K+2}^T w_{\tau}^2} \quad t = K + 2, \dots, T \quad (\text{A4.3})$$

Bajo la hipótesis nula de estabilidad de los parámetros, S_t tiene una esperanza igual a

$$E(S_t) = \frac{t-K-1}{T-K-1} \quad (\text{A4.4})$$

cuyo valor esta entre 0 y 1 para $t = K + 1$ y $t = T$, respectivamente.

El contraste se realiza representando los residuos S_t frente a t , junto con sus bandas de confianza, calculadas como $E(S_t) \pm C$, donde el valor crítico C , se puede encontrar en tablas estadísticas (Carrascal, 2001).

A5. Cambio estructural

a) Prueba Quandt-Andrews

Una de las hipótesis que se supone cumple el modelo de regresión especificado es que los coeficientes se mantienen constantes para todo el periodo muestral. Sin embargo, es posible que existan submuestras para las que el comportamiento del modelo sea diferente en su estructura, siendo necesario contrastar esta posibilidad.

En 1960 Chow propuso un método para identificar cambios estructurales en los parámetros de un modelo de regresión lineal.

$$\text{Sea } y_t = \beta_1 x_t + u_t \quad (\text{A5.1})$$

El cual indica que la relación entre y_t y x_t ha sido constante a través del tiempo; sin embargo esto puede no ser así, por lo que los parámetros podrían cambiar. Suponemos que la longitud de la serie se puede expresar como $T = t_1 + t_2$ y que hubo un cambio estructural en t_1 , entonces el modelo A5.1 estaría representado como

$$y_t = \beta_1 x_t + u_{t,1} \quad \text{para } t \leq t_1 \quad (\text{A5.2})$$

$$y_t = \beta_2 x_t + u_{t,2} \quad \text{para } t > t_1 \quad (\text{A5.3})$$

La prueba de Chow tiene como hipótesis

$$H_0: \beta_1 = \beta_2$$

$$H_a: \beta_1 \neq \beta_2$$

La hipótesis nula señala que no hay cambio en los parámetros del periodo bajo análisis y por lo tanto el modelo A5.1 es correcto. El estadístico F permite probar H_0 bajo el supuesto de normalidad de la variable dependiente, y se calcula de la siguiente manera:

$$F_c = \frac{\hat{u}'\hat{u} - (\hat{u}'_1\hat{u}_1 + \hat{u}'_2\hat{u}_2)/k}{(\hat{u}'_1\hat{u}_1 + \hat{u}'_2\hat{u}_2)/-2k} \sim F(k, t - 2k) \quad (\text{A5.4})$$

Esta prueba requiere que se conozca la fecha del cambio estructural, sin embargo en ocasiones esto no es posible. Por tanto Quandt propuso calcular el estadístico de Chow mostrando

cambios en cada periodo de la muestra y seleccionar aquél con el valor más alto para ser la fecha del cambio estructural, pero no da criterios estadísticos para esta selección. Pero en 1993 Andrews proporcionó valores críticos para este procedimiento.

Andrews examinó un modelo general incluyendo los parámetros β_t y planteó las siguientes hipótesis sobre estabilidad de los parámetros:

$$H_0: \beta_t = \beta_0 \quad \forall t \geq 1 \quad \text{para } \beta_0 \in B \subset R^p$$

$$H_a(\pi): \beta_t = \begin{cases} \beta_1(\pi) & \text{para } t = 1 \dots T\pi \\ \beta_2(\pi) & \text{para } t = T\pi - 1 \end{cases} \quad \text{para } \beta_1(\pi), \beta_2(\pi) \in B \subset R^p \quad \text{donde } \pi \in (0,1)$$

Así, π es una fracción que al ser multiplicada por el indicador de tiempo T , segmenta la serie. La hipótesis alterna es la que plantea que los parámetros sean distintos en esas particiones, por lo que depende de π . Si la fecha de cambio estructural (πT) es conocida, la prueba estándar de Chow se puede utilizar para someter las pruebas de hipótesis. Sin embargo cuando se desconoce π , la distribución de dicha prueba no es la F ni la ji-cuadrada, debido a que el parámetro π no aparece en la hipótesis nula. Entonces Andrews derivó la distribución asintótica para:

$$\sup_{\pi \in \Pi} W_T(\pi), \sup_{\pi \in \Pi} LM_T(\pi) \text{ y } \sup_{\pi \in \Pi} LR_T(\pi) \quad \pi \in [0,1]$$

donde *sup* es el valor más alto del estadístico calculado en el intervalo de tiempo examinado. Los valores críticos (asintóticos) para los tres estadísticos están en tablas (<http://www.eumed.net/rev/tlatemoani/09/wt.html>).

A6. Forma Funcional

a) Prueba Ramsey-RESET

Los errores de especificación debidos a la formulación incorrecta de una expresión lineal para el modelo de regresión pueden ser estudiados utilizando la prueba RESET propuesta por Ramsey en 1969. Se trata de un contraste general para detectar errores de especificación de un modelo, sirve para detectar, además de una forma lineal incorrecta, cualquier error de omisión o la presencia de correlaciones entre variables explicativas y los residuales.

El planteamiento parte de la idea de que cualquier función no lineal puede ser aproximada mediante el uso de un polinomio de orden adecuado, lo que equivaldría, en el modelo de regresión, a introducir términos de potencias y productos cruzados de las variables explicativas. Por ello, si se supone que en el modelo puede haber un error en la forma funcional, la prueba propone la incorporación de diversas potencias de la variable endógena estimada inicialmente ($\hat{y}^2, \hat{y}^3, \hat{y}^4, \dots$) que en la práctica no son más que potencias y productos cruzados de los regresores (Carrascal, 2001).

$$\text{Se efectúa la regresión } y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \beta_2 \hat{y}_i^2 + \beta_3 \hat{y}_i^3 + u_i \quad (\text{A6.1})$$

Donde \hat{y}_i^2 y \hat{y}_i^3 , son regresores adicionales que pueden ser introducidos porque hay una relación entre \hat{u}_i y \hat{y}_i , los estimados. Se obtienen dos coeficientes de determinación, R_0^2 para el

modelo original de regresión ($y_t = \beta_0 + \beta_1 x_t + u_t$) y un segundo R_1^2 para el modelo de la ecuación A6.1. Entonces se puede utilizar la prueba F , para saber si el incremento en R^2 al utilizar A6.1 es estadísticamente significativo, de la siguiente manera

$$F = \frac{(R_1^2 - R_0^2) / \# \text{ de regresores nuevos}}{(1 - R_1^2) / (n - \# \text{ de parámetros en el modelo nuevo})} \quad (\text{A6.2})$$

Si el valor de F calculado es significativo, por ejemplo al nivel de 5%, se puede aceptar la hipótesis de que el modelo está mal especificado (Gujarati, 2003).

Apéndice 2

Con *RClimDex* los índices en una base mensual son calculados si en un mes no hay más de 3 días faltantes, valores anuales no se calculan si en un año hay 15 días faltantes. Para índices con umbral, el umbral se calcula si por lo menos el 70% de los datos están presentes.

A continuación se muestra cómo se define en *RClimDex* cada índice de temperatura.

FD0: Sea Tn_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j , se cuenta el número de días cuando $Tn_{ij} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$

SU25: Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i periodo j , se hace el conteo del número de días cuando $Tx_{ij} > 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

ID0: Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j , se cuenta el número de días cuando $Tx_{ij} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$

TR20: Sea Tn_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j , se realiza el conteo del número de días cuando $Tn_{ij} > 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

GSL: Sea T_{ij} la temperatura media en el día i en el periodo j , se cuenta el número de días entre la primera ocurrencia de por lo menos 6 días consecutivos con $T_{ij} > 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, y la primera ocurrencia después de 1o de julio (1o enero en el hemisferio sur) de por lo menos 6 días consecutivos con $T_{ij} < 5\text{ }^{\circ}\text{C}$

TXx: Sea Tx_{mj} la temperatura máxima diaria en el mes m , periodo j . La máxima temperatura máxima diaria cada mes es $TXx_{mj} = \max(Tx_{mj})$

TNx: Sea Tn_{mj} la temperatura mínima diaria en el mes m , periodo j . La máxima temperatura mínima diaria cada mes es $TNx_{mj} = \max(Tn_{mj})$

TXn: Sea Tx_{mj} la temperatura máxima diaria en el mes m , periodo j . La mínima temperatura máxima diaria cada mes es $TXn_{mj} = \min(Tx_{mj})$

TNn: Sea Tn_{mj} la temperatura mínima diaria en el mes m , periodo j . La mínima temperatura mínima diaria en cada mes es $TNn_{mj} = \min(Tn_{mj})$

Tn10p: Sea Tn_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j y sea $Tn_{in}10$ el día en el calendario del 10o percentil centrado en una ventana de 5 días. El porcentaje del tiempo es determinado, donde $Tn_{ij} < Tn_{in}10$.

Tx10p: Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea $Tx_{in}10$ el día en el calendario del 10o percentil centrado en una ventana de 5 días. El porcentaje del tiempo es determinado donde $Tx_{ij} < Tx_{in}10$.

Tn90p: Sea Tn_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j y sea $Tn_{in}90$ el día en el calendario del 90o percentil centrado en una ventana de 5 días. El porcentaje del tiempo es determinado, donde $Tn_{ij} > Tn_{in}90$.

Tx90p: Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea $Tx_{in}90$ el día en el calendario del 90o percentil centrado en una ventana de 5 días. El porcentaje del tiempo es determinado, donde $Tx_{ij} > Tx_{in}90$.

WSDI: Sea Tx_{ij} la temperatura máxima diaria en el día i en el periodo j y sea $Tx_{in}90$ el día en el calendario del percentil 90o centrado en una ventana de 5 días. Entonces el número de días por periodo se suma donde en intervalos de por lo menos 6 días consecutivos se tiene $Tx_{ij} > Tx_{in}90$.

CSDI: Sea Tn_{ij} la temperatura mínima diaria en el día i en el periodo j y sea $Tn_{in}10$ el día en el calendario del percentil 10o centrado en una ventana de 5 días. Entonces el número de días por periodo se suma donde en intervalos de por lo menos 6 días consecutivos ocurre que $Tn_{ij} < Tn_{in}10$.

DTR: Sean Tx_{ij} y Tn_{ij} las temperaturas diarias máximas y mínimas, respectivamente, en el día i y en el periodo j . Si K representa el número de días en j entonces $DTR_j = \frac{\sum_{i=1}^K (Tx_{ij} - Tn_{ij})}{K}$

Bibliografía

Aguilar E., T. C. Peterson, P. Ramírez Obando, R. Frutos, J. A. Retana, M. Solera, J. Soley, I. González García, R. M. Araujo, A. Rosa Santos, V. E. Valle, M. Brunet, L. Aguilar, L. Álvarez, M. Bautista, C. Castañón, L. Herrera, E. Ruano, J. J. Sinay, E. Sánchez, G. I. Hernández Oviedo, F. Obed, J. E. Salgado, J. L. Vázquez, M. Baca, M. Gutiérrez, C. Centella, J. Espinosa, D. Martínez, B. Olmedo, C. E. Ojeda Espinoza, R. Núñez, M. Haylock, H. Benavides and R. Mayorga, 2005: Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and Northern South America, 1961-2003. *J. Geophys. Res.* **110**, D23107, doi:10.1029/2005JD006119.

Aguilar E., A. Aziz Barry, M. Brunet, L. Ekan, A. Fernandes, M. Massoukina, J. Mbah, A. Mhanda, D. J. do Nascimento, T. C. Peterson, O. Thamba Umba, M. Tomou and X. Zhang, 2009: Changes in Temperature and Precipitation Extremes in Western Central Africa, Guinea Conakry, and Zimbabwe, 1955-2006. *J. Geophys. Res.* **114**.

Alexander L. V., X. Zhang, T. C. Peterson, J. Caesar, B. Gleason, A. Klein Tank, M. Haylock, D. Collins, B. Trewin, F. Rahimzadeh, A. Tagipour, P. Ambenje, K. Rupa Kumar, J. Revadekar, G. Griffiths, L. Vincent, D. Stephenson, J. Burn, E. Aguilar, M. Brunet, M. Taylor, M. New, P. Zhai, M. Rusticucci and J.L. Vazquez-Aguire, 2006: Global Observed Changes in Daily Climate Extremes of Temperature and Precipitation. *Geophys. Res.* **111**, 22 pp.

Bartholy J., and R. Pongracz, 2007: Regional Analysis of Extreme Temperature and Precipitation Indices for the Carpathian Basin from 1946 to 2001. *Global and Planetary Change.* **57**, 83-95.

Beniston M. and D.B. Stephenson, 2004: Extreme Climatic Events and Their Evolution Under Changing Climatic Conditions. *Global and Planetary Change*, ed. Elsevier, 9 pp.

Beniston M., D.B. Stephenson, O.B. Christensen, C.A.T. Ferro, C. Frei, S. Goyette, K. Halsnaes, T. Holt, K. Jylä, B. Koffi, J. Palutikof, R. Schöll, T. Semmler and K. Woth, 2006: Future Extreme Events in European Climate: An Exploration of Regional Climate Model Projections. *Clim. Change.* **81**, 71-95.

Brooks Chris, 2008: *Introductory Econometrics for Finance*. Second Edition. Cambridge University Press, New York, 648 pp.

Brunet M., O. Saladie, P. Jones, J. Sigró, E. Aguilar, A. Moberg, D. Lister, A. Walther, D. López and C. Almarza, 2006: The Development of a New Dataset of Spanish Daily Adjusted Temperature Series (SDATS) (1850–2003). *Int. J. Climatol.* **26**, 1777-1802.

Caesar J., Alexander L. and Vose R., 2006: Large-Scale Changes in Observed Daily Maximum and Minimum Temperatures: Creation and Analysis of a New Gridded Data Set. *J. Geophys. Res.* **111**, 10 pp.

Caesar J., L. V. Alexander, B. Trewin, K. Tse-ring, L. Sorany, V. Vuniyayawa, N. Keosavang, A. Shimana, M. M. Htay, J. Karmacharya, D. A. Jayasinghearachchi, J. Sakkamart, E. Soares, L. T. Hung, L. T. Thuong, C. T. Hue, N. T. T. Dung, P. V. Hung, H. D. Cuong, N. M. Cuong and S. Sirabaha, 2011: Changes in Temperature and Precipitation Extremes over the Indo-Pacific Region from 1971 to 2005. *Int. J. Climatol.* **31**, 791-801.

Carrascal A.U., G.Y. González and P. B. Rodríguez, 2001: *Análisis Económico con EViews*. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. 338 pp.

Cavazos T., P. Grau, E. Valenzuela, A. Salinas, G. Colorado, R. Prieto, B. Martínez, R. Romero y E. Morales, 2012a: *Participación del CICESE, el IMTA y el CCA-UNAM en el Desarrollo del Proyecto de Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como Parte de los Productos de la Quinta Comunicación Nacional. Primer Reporte*. 22 de marzo de 2012. 12 pp.

Cavazos T., P. Grau, E. Valenzuela, A. Salinas, G. Colorado, R. Prieto, Maya M.E., J.G. Rosario de la Cruz y B. Martínez, 2012b: *Participación del CICESE, el IMTA y el CCA-UNAM en el Desarrollo del Proyecto de Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como Parte de los Productos de la Quinta Comunicación Nacional. Segundo Reporte*. 11 de mayo de 2012. 19 pp.

Comrie A.C. and E.C. Glenn, 1998: Principal components-based regionalization of precipitation regimes across the southwest United States and northern Mexico, with an application to monsoon precipitation variability. *Climate Research*, **10**: 201–215.

CONAFOR, 2014: Incendios Forestales. Serie de Fascículos. *Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED)*. 47 pp.

Conde C., 2003: *Cambio y Variabilidad Climáticos. Dos Estudios de Caso en México*. México: [Tesis Dr. en C.]: Universidad Nacional Autónoma de México.

Conde, C., B. Martínez, O. Sánchez, F. Estrada, A. Fernández, J. Zavala y C. Gay, 2008: Escenarios de Cambio Climático (2030 y 2050) para México y Centro América. Temperatura y Precipitación. [Documento en línea]. Disponible desde internet en <http://www.atmosfera.unam.mx/gcclimatico/index>

Conde C. y C. Gay (Coordinadores), 2008. *Guía para la Generación de Escenarios de Cambio Climático a Escala Regional*. Como parte del proyecto: "Generación de Escenarios de Cambio Climático a Escala Regional, al 2030 y 2050; Evaluación de la Vulnerabilidad y Opciones de Adaptación de los Asentamientos Humanos, La Biodiversidad y Los Sectores Ganadero, Forestal y Pesquero, Ante Los Impactos de la Variabilidad y El Cambio Climáticos; y Fomento De Capacidades y Asistencia Técnica a Especialistas Estatales que Elaborarán Programas Estatales de Cambio Climático", como parte de los trabajos realizados para la Cuarta Comunicación nacional de México ante la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. Noviembre de 2008. 104 pp.

Conde, C., E. Ospina, E. Luyando, O. Sánchez, A.E. Peña del Valle, F. López, G. Rosales, M. Casasola. 2011a. Informe Final Historia del clima de la Ciudad de México: Efectos observados y perspectivas. Entregado al Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México. 41 pp.

Conde, C., E. Ospina, O. Sánchez, F. López, G. Grijalva, A. Romo, J. Ramírez. 2011b. Reporte Final: 1) Análisis Sistémico de la Información Histórica del Clima, y 2) Desarrollo de Escenarios para los años 2015, 2020, 2030, 2040, 2050, 2060, 2070 y 2090. En: Estrategia Estatal de Cambio Climático en el estado de Michoacán (Primera etapa). Entregado a la Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Michoacán. 78 pp.

Conde C., 2012: *Participación del CICESE, el IMTA y el CCA-UNAM en el Desarrollo del Proyecto de Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como Parte de los Productos de la Quinta Comunicación Nacional*. Reporte sobre Índices Climáticos. Temperaturas Extremas. 21 pp.

Donat M., J. Sillmann, S. Wild, Alexander L. V., Lippmann T. and Zwiers F., 2014: Consistency of Temperature and Precipitation Extremes across Various Global Gridded In Situ and Reanalysis Datasets. *Amer. Meteorol. Soc.*, **27**, 5019-5035.

Douglas A., 1993. Mexican Temperature, Precipitation and Drought Data Base Documentation, 13 pp.

Easterling D.R., T. Peterson and T. R. Karl, 1996: Notes and Correspondence: On development and use of homogenized climate dataset. *J. Climate*, **9**, 1429-1434.

Englehart P. J., and A. V. Douglas, 2002: Mexico's summer rainfall patterns: An analysis of regional modes and changes in their teleconnectivity, *Atmósfera*. **15**, 147-164.

Englehart P. J., and A. V. Douglas, 2004: Characterizing regional scale monthly and seasonal temperature variations over Mexico. *Int. J. Climatol*, **24**, 1897-1909.

Englehart P. J., and A. V. Douglas, 2005: Changing behavior in the diurnal range of surface air temperatures over Mexico. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L01701.

Estrada F., A. Martínez-Arroyo, A. Fernández-Eguiarte, E. Luyando and C. Gay., 2009: Defining climate zones in México City using multivariate analysis. *Atmósfera*, **22**(2), 175-193.

Frich P., L.V. Alexander, P. Della-Marta, B. Gleason, M. Haylock, A.M. Klein Tank and T. Peterson, 2002: Observed Coherent Changes in Climate Extremes During the Second Half of the Twentieth Century. *Climate. Res.* **19**, 193-212.

GARCIA E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. *Instituto de Geografía*, UNAM. 220 pp.

Gujarati Damodar N., 2003. Econometría. Cuarta Edición, Mc Graw Hill Interamericana, México, 972 pp.

INE, 1997. México. Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. México, 150 pp. [Disponible en <http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/c-clima.pdf>]

IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA .

IPCC, 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on

Climate Change [Field C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.

IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stoker T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 pp.

IPCC, 2014: Summary for policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1-32.

IPCC-TGICA, 2007: *General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 2.* Prepared by T.R. Carter on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment, 66 pp.

Klein Tank and G.P. Können, 2003: Trends in Indices of Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe, 1946–99. *J. Climate*. **16**, 3665-3680.

López F., 2009: Metodología para el análisis de eventos extremos de temperatura. Un estudio de caso en Apizaco Tlaxcala. Tesis para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Tierra, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, 170 pp.

López-Díaz F., C. Conde and O. Sánchez, 2013: Analysis of indices of extreme temperature events at Apizaco, Tlaxcala, Mexico: 1952-2003. *Atmósfera*, 26(3), 349-358.

Von Luxburg U., B. Williamson and I. Guyon, 2012: "Clustering: Science or Art?". *Journal of Machine Learning Research*, **27**, 65-80.

Magaña V., J.L. Pérez, C. Conde, C. Gay y S. Medina, 1997: El Fenomeno de El Niño y la Oscilación del Sur (ENOS) y sus Impactos en México. Departamento de Meteorología General. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, 18 pp.

Magaña V., J. Pérez, J. Vázquez, E. Carrisoza y J. Pérez, 1999: *El Niño y el Clima*. Capítulo 2 de libro: Los Impactos de El Niño en México. México: UNAM, IAI SG. 23–62.

Met Office, 2011. Climate: Observations, projections and impacts. Mexico. 149 pp.

Matías R., M.G., O. A. Fuentes M. y F. García F., 2014: Heladas. Serie de Fascículos. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 37 pp.

Moss R., M. Babiker, S. Brinkman, E. Calvo, T. Carter, J. Edmonds, I. Elgizouli, S. Emori, L. Erda, K. Hibbard, R. Jones, M. Kainuma, J. Kelleher, J. F. Lamarque, M. Manning, B. Matthews, J. Meehl, L. Meyer, J. Mitchell, N. Nakicenovic, B. O'Neill, R. Pichs, K. Riahi, S. Rose, P. Runci, R. Stouffer, D. van Vuuren, J. Weyant, T. Wilbanks, J. P. van Ypersele, and M. Zurek, 2008: Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. *Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva, 132 pp.

Myatt G. y Johnson W., 2009: *Making sense of data II: a practical guide to data visualization, advanced data mining methods, and applications*. Edit. Wiley, 290 pp.

Peterson T.C., 2005: Climate Change Indices. WMO Bulletin April 2005.

Pineda-Martínez L. F., N. Carbajal and E. Medina-Roldán, 2007: Regionalization and classification of bioclimatic zones in the central-northeastern region of Mexico using principal component analysis (PCA). *Atmosfera* 20(2).133-145.

Pineda L. F., 2009: Modelación Numérica de la Dispersión de Material Particulado Atmosférico y Regionalización Climática en México. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias Aplicadas en la Opción de Ciencias Ambientales. DCA-IPICYT.

Pulido Sn. R. A. y G. J. Pérez, 2008: *Modelos Económicos: Guía para la Elaboración de Modelos Económicos con EViews*. Ediciones Piramide, 218 pp.

Ramos G. G.E., 2013: *Estudio Espacio-Temporal de Riesgos por plaga de Maíz en el Estado de Guanajuato, México*. Tesis para obtener el grado de Maestro en Geografía Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Geografía Ambiental, 160 pp.

Reichler T. and J. Kin, 2008: How Well Do Coupled Models Simulate Today's Climate? *American Meteorological Society*, 303-311.

Reyes Coca S., 2001: *Introducción a la Meteorología*. Universidad Autónoma de Baja California, 464 pp.

Rusticucci M. and M. Barrucand, 2004: Observed Trends and Changes in Temperature Extremes over Argentina. *Climate*. **17**, 4099-4107.

Rusticucci M., J. Marengo, O. Penalba and M. Renom, 2009: An Intercomparison of Model Simulated in Extreme Rainfall and Temperature Events During the Last Half of the Twentieth Century. Part 1: Mean Values and Variability. *Clim. Change*, 16 pp.

Salas, F. M.A., 2008: ASSESSING THE VARIABILITY OF LONG-TERM MEXICAN INSTRUMENTAL RECORDS AND THE ENSO MODULATING FORCE. Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy at the University of East Anglia. 341 pp.

Salas-Flores, M.A., A. Salas-Cruz, C. Gay y R. Patiño, 2011: Regionalización de la Temperatura Media en México Utilizando Componentes Principales. Documento *in extenso*, Congreso OMMAC 2011, 11 pp. <http://www.ommac.org/congreso2011/document/extenso/Ext2011062.pdf>

Sillmann J. and E. Roeckner, 2008: Indices for Extreme Events in Projections of Anthropogenic Climate Change. *Clim. Change*. **86**, 83-104.

Sillmann J., V. V. Kharin, F. W. Zwiers, X. Zhang and D. Bronaugh, 2013: Climate Extremes Indices in the CMIP5 Multimodel Ensemble: Part 2. Future Climate Projections, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 2473–2493, doi:10.1002/jgrd.50188.

Sosa E. R., H. Bravo A., P. Sánchez A. y M. Jaimes P., 2004: El impacto de los incendios forestales en la calidad del aire. En: *Incendios forestales en México. Métodos de evaluación* (L. Villers Ruiz y J. López Blanco, Eds.). Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Ciencias de la Atmósfera, México, 75-93.

Taylor K., Ronald J. Stouffer and Gerald A. Meehl. 18 December 2009. *A Summary of the CMIP5 Experiment Design*. http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/docs/Taylor_CMIP5_design.pdf

Tebaldi C., K. Haohow, J. Arblaster, and G. Meehl, 2006: Going to extremes. An intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. *Clim. Change*. **79**, 185–211.

Tebaldi C., and R. Knutti, 2010: *Climate Models and Their Projections of Future Changes*. Chapter 3 of *Climate Change and Food Security Advances in Global Change Research 37*, Springer Science + Business Media, 31-56.

Van Vuuren D., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G. C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J.-F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S. J. Smith and S.K. Rose, 2011: The representative concentration pathways: an overview. *Clim. Change*. **109**, 5–31. DOI 10.1007/s10584-011-0148-z.

Villers-Ruiz L., E. Chuvieco e I. Aguado, (2012). Aplicación del Índice Meteorológico de Incendios Canadiense en un Parque Nacional del Centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, **3**(11), 25-40.

Vincent L. A., T. C. Peterson, V. R. Barros, M. B. Marino, M. Rusticucci, G. Carrasco, E. Ramirez, L. M. Alves, T. Ambrizzi, M. A. Berlato, A. M. Grimm, J. A. Marengo, L. Molion, D. F. Moncunill, E. Rebello, J. Anunciacao, Y. M. T. Quintama, J. L. Santos, J. Báez, G. Coronel, J. García, I. Trebejo, M. Bidegain, M. R. Haylock and D. Karoly, 2005: Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960-2000. *J. Climate. Amer. Meteorol. Soc.* **18**, 5011-5023, D05109, doi:10.1029/2005JD006290.

Vincent L.A., E. Aguilar, M. Saindou, A. F. Hassane, G. Jumaux D. Roy, P. Booneeady, R. Virasami, L. Y. A. Randriamarolaza, F. R. Faniriantsoa, V. Amelie, H. Seeward and B. Montfraix, 2011: Observed Trends in Indices of Daily and Extreme Temperature and Precipitation for the Countries of the Western Indian Ocean, 1961–2008. *J. Geophys. Res.* **116**, 12 pp.

Wang, X.L., 2008: Penalized maximal F test for detecting undocumented mean shift without trend change, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **25**, 368–384.

Wang, X.L., 2009: A quantile matching adjustment algorithm for Gaussian data series. Climate Research Division, Science and Technology Branch Environment Canada, Toronto, Canada. 5 pp.

Wang X. L and Y. Feng, 2010: *RHtestsV3 User Manual*. Climate Research Division, Atmospheric Science and Technology Directorate, Science and Technology Branch, Environment Canada, Toronto, Ontario Canada, 1-25.

Wilks D. S., 1995: *Statistical methods in the atmospheric science*. Academic Press, San Diego, 467 pp.

Zhang X. and F. Yang, 2004: RClmDex (1.0): Manual del Usuario. Traducción de Santos J.L, 22 pp. Disponible en línea en : <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.shtml>