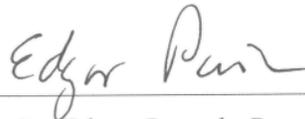


Tesis defendida por

Brisia Edit Espinoza Tamarindo

y aprobada por el siguiente comité



Dr. Edgar Gerardo Pavia López
Director del Comité



Dra. María Tereza Cavazos Pérez
Miembro del Comité



Dra. Bertha Eugenia Lavaniégos Espejo
Miembro del Comité



Dr. Julio Sheinbaum Pardo
Miembro del Comité



Dr. Francisco Javier Ocampo Torres
*Coordinador del Programa de Posgrado en
Oceanografía Física*



Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director de la dirección de Estudios de Posgrado

Junio de 2013

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE
EDUCACION SUPERIOR DE ENSENADA



Programa de Posgrado en Ciencias
en Oceanografía Física

Variabilidad de las ondas de calor observadas en el Noroeste de México

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

Maestro en Ciencias

Presenta:

Brisia Edit Espinoza Tamarindo

Ensenada, Baja California, México
2013

Resumen de la tesis de Brisia Edit Espinoza Tamarindo, presenta como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física.

Variabilidad de las ondas de calor en el Noroeste de México

Resumen aprobado por:

Dr. Edgar Gerardo Pavia López

Se estima la frecuencia de las ondas de calor (OC) diurnas y nocturnas en el Noroeste de México producidas entre 1961 y 2000, a partir de los datos diarios de temperaturas máximas (T_{MAX}) y mínimas (T_{MIN}).

Se obtienen los valores umbrales de las temperaturas determinados por el percentil 90 (P90), 95 (P95) y 99 (P99) utilizando los meses de verano de junio a septiembre (JJAS) en el sub-periodo que va de 1961 a 1990. Se define una OC cuando se observan dos o más días consecutivos en los que la T_{MAX} y T_{MIN} exceden el P90. Se estimaron las tendencias de la frecuencia, duración e intensidad de las OC con base al P90 a partir de una regresión lineal por el método de cuadrados mínimos. Encontrándose un patrón claro de tendencias positivas en norte de Sinaloa, sur de Sonora y sur de Baja California Sur.

El análisis de tendencia de frecuencia, duración e intensidad anuales obtenidas indica que existe una tendencia positiva con un nivel de confianza al 95%. El ajuste lineal indicó que se ha producido un aumento en la frecuencia de las OC en el Noroeste de México del orden de 2 OC cada 10 años.

Palabras Clave: **Onda de Calor, Noroeste de México**

Abstract of the thesis presented by Brisia Edit Espinoza Tamarindo, as a partial requirement of the degree of Master of Science in Physical Oceanography.

Variability of heat waves in Northwest México

Abstract approved by:

Dr. Edgar Gerardo Pavia López

The annual number of diurnal and nocturnal heat waves in Northwestern Mexico is obtained, in the 1961 to 2000 period, using daily values of maximum and minimum temperatures.

Temperature thresholds are determined using the 90th percentile (P90), 95th percentile (P95) and 99th percentile (P99) during the summer months (from June to September) of the base period 1961-1990. We define a heat wave event when two or more consecutive days exceeded the P90 temperatures. Trends of frequency, length and intensity are estimated by least-squares linear regressions. A clear pattern of positive trends is observed in northern Sinaloa, southern Sonora and southern Baja California Sur. It is suggested that heat waves have increased by two every ten years.

Keywords: Heat wave, Northwestern Mexico

Dedicatoria

*A mamá y papá.
A mi hermana Ruth*

Agradecimientos

Expreso mi agradecimiento al Dr. Edgar Pavía por su gran disposición al dirigirme en cada aspecto de esta investigación.

Al comité por su valioso apoyo, y asesoría a través de comentarios y sugerencias a la Dra. Tereza Cavazos, la Dra. Bertha Lavaniegos, y el Dr. Julio Sheinbaum.

Al Dr. García-Cueto por sus comentarios y observaciones para mejorar el trabajo.

Agradezco a CONACyT por la beca de posgrado (No. Registro 362224) e igualmente al Departamento de Oceanografía Física por la beca de manutención.

A todos los investigadores, estudiantes y personal del departamento de Oceanografía por su enseñanza y disposición académica.

Agradezco a Ramón Fuentes, Ismael Villanueva, Sergio Arregui y Jorge Manuel Aréchiga por ayudarme pacientemente a solucionar detalles con el manejo del software.

Gracias a todos los compañeros y amigos de CICESE. Con mucho cariño a todas mis amigas presentes en todo momento con buen ánimo y gran apoyo.

Gracias a las facilidades ofrecidas en CICESE.

A mis padres.

Contenido

	Página
Resumen	I
Abstract	II
Dedicatoria	III
Agradecimientos	IV
Lista de Figuras	VI
Lista de Tablas	IX
1. Introducción	1
1.2 <i>Objetivos</i>	6
1.2.1 <i>Objetivo general</i>	6
1.2.2 <i>Objetivos particulares</i>	6
1.3 <i>Área de estudio</i>	7
1.4 <i>Datos</i>	8
2. Metodología	10
2.1 <i>Ondas de calor en el contexto del clima</i>	10
2.2 <i>Cuantificación y tendencias de ondas de calor</i>	13
3. Resultados	15
3.1 <i>Regionalización climática</i>	15
3.2 <i>Análisis de Anomalías</i>	22
3.3 <i>Percentiles</i>	26
3.4 <i>Análisis de Tendencias</i>	30
3.4.1 <i>Frecuencia de las ondas de calor</i>	30
3.4.2 <i>Duración de las ondas de calor</i>	36
3.4.3 <i>Intensidad de las ondas de calor</i>	39
4. Discusión	45
Referencias bibliográficas	47
Apéndice A	50

Lista de Figuras

Figura		Página
1	Mapa de las estaciones del área de estudio tomadas de la Base de datos climáticos del Noroeste de México (Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático, PEACC-BC disponible en http://peacc-bc.cicese.mx/datosclim/).	7
2	Datos diarios de T_{MAX} (color rosa) y T_{MIN} (color azul) en la estación Mexicali, B.C. La línea negra remarcada indica el valor medio de T_{MAX} y T_{MIN} en el periodo 1961-2000. La línea gris muestra los valores de T_{MAX} y T_{MIN} para un año en particular (1997). Las líneas rojas continuas indican los P90, P95 y P99 de las temperaturas de verano.	11
3	Ejemplos de OC en la estación Santo Tomás, B.C. Climatología diaria de los datos de T_{MAX} (puntos negros) y T_{MIN} (puntos grises) durante julio y agosto de 1961-2000, resaltando en rojo y azul los valores que ocurrieron en 1997. Las líneas horizontales rojas muestran el P90, P95 y P99. Las líneas negras remarcadas indican los valores medios de T_{MAX} y T_{MIN} . Los círculos/elipses en color negro identifican algunas OC durante esos meses en 1997.	12
4	Ejemplos de ajuste del número de eventos anuales utilizando el P90 para a) T_{MIN} y b) T_{MAX}	13
5	(a) Relieve topográfico del estado de Baja California (INEGI, 2013), (b) Regionalización climática: zonas barlovento y sotavento.	16
6	(a) Relieve topográfico del estado de Baja California Sur (INEGI, 2013), (b) Regionalización climática: norte, centro y sur.	17
7	(a) Relieve topográfico del estado de Chihuahua (INEGI, 2013), (b) Regionalización climática: Sierra, Llanura y Frontera.	18
8	(a) Relieve topográfico del estado de Durango (INEGI, 2013), (b) Regionalización climática: Cima, Sierra, y Llanuras.	19
9	(a) Relieve topográfico del estado de Sinaloa (INEGI, 2013), (b) Regionalización climática: Llanura Costera, Sierra Norte, y Sierra Madre Occidental.	20
10	a) Relieve del estado de Sonora (INEGI, 2013), (b) Regionalización climática: Cima, Sierra, y Llanuras.	21
11	Anomalías de la temperatura media mínima anual (barras en azul), y de la temperatura media máxima anual (barras en rosa) en la península de Baja California con respecto a la media del periodo base (1961-1990).	22

Figura		Página
12	Anomalías de la temperatura media mínima anual (barras en azul), y de la temperatura media máxima anual (barras en rosa) con respecto a la media del periodo base (1961-1990), en los estados de Chihuahua y Durango. ...	23
13	Anomalías de la temperatura media mínima anual (barras en azul), y de la temperatura media máxima anual (barras en rosa) con respecto a la media del periodo base (1961-1990), en los estados de Sinaloa y Sonora.	24
14	Anomalías del rango mensual de temperatura (línea gris) y de temperatura media máxima anual (barras en rosa) con respecto a la media del periodo base (1961-1990), en los estados de a) Baja California, y b) Durango.	25
15	Umbrales de los percentiles de T_{MIN} durante junio-septiembre estimados en dos periodos a) P90 en 1961-2000, y b) P90, c) P95 y d) P99 en el periodo base de 1961-1990.	26
16	Umbrales de los percentiles de T_{MAX} durante junio-septiembre estimados en dos periodos a) P90 en 1961-2000, y b) P90, c) P95 y d) P99 en el 1961-1990.	27
17	Valores de P90 para definir las OC nocturnas (T_{MIN}) y diurnas (T_{MAX}) en el periodo base 1961 a 1990.	29
18	Número de OC diurnas por estado y década en los meses de verano.	31
19	Número de OC nocturnas por estado y década en los meses de verano.	32
20	Número de OC diurnas por estado y década durante los meses de abril, mayo y octubre.	33
21	Tendencias del número de OC diurnas. (a) Magnitud (número de eventos por lustro), y (b) Significancia.	34
22	Tendencias del número de OC nocturnas. (a) Magnitud y (b) Significancia (número de eventos por lustro).	35
23	Tendencias de la duración de OC diurnas. (a) Magnitud (días) y (b) Significancia (duración en días por lustro).	36
24	Tendencias de la duración de OC nocturnas. (a) Magnitud (días) y (b) Significancia (duración en días por lustro).	36
25	Duración promedio por lustro de las OC diurnas (en rojo) y de las OC nocturnas (en azul) (1961 identifica el lustro 1961-1965). a) Baja California, b) Baja California Sur, c) Chihuahua, d) Durango, e) Sinaloa y f) Sonora.....	38

Figura		Página
26	Comportamiento medio anual de la intensidad, la duración y el número de OC nocturnas durante junio-septiembre.	39
27	Tendencias de la intensidad media de OC nocturnas. (a) Significancia (b) Magnitud (duración en días por lustro).	40
28	Comportamiento medio anual de la intensidad, la duración y el número de OC diurnas durante junio-septiembre..	41
29	Tendencias de la intensidad de las OC diurnas (°C / lustro). La barra de color indica la magnitud. Los triángulos llenos (vacíos) indican que la tendencia es significativa (no-significativa) y si es positiva (triángulo hacia arriba) o negativa (triángulo hacia abajo).	42
30	Tendencias de la intensidad (°C / década) de las OC nocturnas (izquierda) y diurnas (derecha). La barra de color indica la magnitud. Los triángulos llenos (vacíos) indican que la tendencia es significativa (no-significativa) y si es positiva (triángulo hacia arriba) o negativa (triángulo hacia abajo).	44

Lista de Tablas

Tabla		Página
1	Umbrales de los percentiles P90, P95 y P99 de T_{MIN} calculados en °C sobre el periodo base (1961-1990) y el periodo de análisis (1961-2000). En cada percentil se muestran los umbrales mínimos (izquierda) y máximos (derecha) en cada estado.	29
2	Umbrales de los percentiles P90, P95 y P99 de T_{MAX} calculados en °C sobre el periodo base (1961-1990) y el periodo de análisis (1961-2000). En cada percentil se muestran los umbrales mínimos (izquierda) y máximos (derecha) en cada estado.	29
3	Frecuencia total de las OC diurnas (T_{MAX}) y nocturnas (T_{MIN}) por década en el Noroeste de México durante 1961-2000.	31
4	Longitud media de las OC nocturnas (T_{MIN}) y diurnas (T_{MAX}) por periodos de cinco años en el Noroeste de México durante junio-septiembre de 1961-2000.	41

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) considera que las consecuencias relacionadas con el cambio climático estarán en gran parte asociadas a eventos extremos: ondas de calor (OC), sequías e inundaciones, como lo resalta en su cuarto informe de evaluación (IPCC, 2007). Este informe reporta incrementos sustanciales evidenciando que el calentamiento global es innegable. La temperatura superficial media en la segunda mitad del Siglo XX ha aumentado en gran parte del planeta a una tasa casi el doble que en la primera mitad de este siglo (IPCC, 2007).

Actualmente existe un gran interés en la investigación de eventos climáticos extremos ya que el cambio climático proyectado sugiere un incremento en la intensidad, frecuencia y duración de estos eventos. Incluso un cambio en la forma en la que estos eventos se desarrollarían, lo que podría agravar su impacto negativo (Easterling *et al.*, 2000; Meehl y Tebaldi, 2004; y Gershunov *et al.*, 2009; Seneviratne *et al.*, 2012; entre otros). El IPCC designa como evento extremo meteorológico a un acontecimiento clasificado como raro para un lugar y época del año en particular. Estadísticamente se hace referencia de ellos como aquellos eventos que tienen una probabilidad de ocurrencia menor o igual a diez por ciento en la base de registros históricos.

En general una onda de calor (OC) puede entenderse como un evento extremo resultado de la interacción de procesos de la atmósfera, el océano y el suelo que produce periodos prolongados de tiempo estable (comúnmente asociados a cielos despejados). Con días de elevada entrada de radiación solar que consecuentemente genera altas temperaturas. Lo anterior puede producir condiciones de calor seco, secuencias de días cálidos y nublados, e incluso presencia de OC bajo condiciones de humedad excesiva. En este último caso la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) advierte que la combinación de altas temperaturas y altos contenidos de humedad tienden a generar

las peores OC. Sin embargo algunas de las OC consideradas como más catastróficas han sido secas; por ejemplo la OC del verano de 2003 en Europa central que causó aproximadamente 30,000 muertes (UNEP, 2004).

El índice de calor o de “temperatura aparente” es una medida del calor percibido considerando la humedad relativa además de la temperatura del aire. Básicamente las OC se asocian a periodos prolongados de la atmósfera bajo condiciones inusuales de alto estrés por calor, por lo que a pesar de ser un fenómeno meteorológico no pueden valorarse sin hacer referencia a sus impactos humanos (Robinson, 2001). El evento excepcional de OC en Europa durante 2003 es considerado un ejemplo de “lo que vendrá” (Beniston, 2004). La razón indiscutible del interés de estudiar las OC es su tendencia a aumentar el riesgo de mortalidad y morbilidad en la población (IPCC, 2001). Siendo mayormente vulnerables niños y personas de la tercera edad, debido a su relación directa en exacerbar enfermedades de origen cardiovascular, respiratorio y cerebrovascular (Basu y Samet, 2002). Los sistemas cardiovascular y respiratorio se ven afectados debido a que, bajo condiciones de calor, el esfuerzo es mayor al realizar cualquier actividad. Además las áreas urbanas, donde la densidad de la población es mayor, presentan un alto riesgo debido a las elevadas concentraciones de contaminantes atmosféricos (García-Cueto *et al.*, 2010).

Sin embargo no existe una descripción objetiva y única para las OC, ya que éstas se definen de manera local bajo especificaciones particulares de acuerdo al clima observado en la región de estudio (Gershunov *et al.*, 2009). Es decir, los valores límites para definir una OC pueden variar dependiendo de su ocurrencia geográfica (Jáuregui, 2009). Por ejemplo, puede considerarse un evento de OC cuando durante uno o más días la temperatura se encuentra por arriba del percentil 90 (P90), o de P95 o P99. Similarmente, en el caso de ondas frías, éstas pueden considerarse cuando la temperatura está por debajo de P10, o P5 o P1. En ambos casos puede tratarse de datos observados o simulados (Beniston y Díaz, 2004).

Lo anterior hace difícil la comparación de estudios de OC; es decir: sin una definición formal se han tomado diversos enfoques para su estudio. Por ejemplo la superación de umbral mediante un percentil fijo o valor absoluto de todos los valores observados, o de la

media diaria durante los meses de verano. Así también como la superación del valor medio por determinada desviación estándar fija, e incluso sofisticados índices que llegan a considerar situaciones meteorológicas a escala sinóptica, como es el caso de los servicios meteorológicos europeos (Cardós *et al.*, 2006). No obstante existen dos aspectos fundamentales en el establecimiento de los umbrales (Robinson 2001):

1. Superación de valores fijos absolutos que en una primera aproximación representan los límites fisiológicos más bajos de una OC. Las condiciones que superen este valor podrían afectar a la mayoría de la población y requerir algún tipo de modificación de las actividades para evitar molestias o problemas de salud.
2. Desviación de lo normal. Se supone que se basa en el aspecto sociológico más aún que en el fisiológico, debido al calor excesivo en el que se considera la adaptación al clima imperante en un determinado lugar.

Por ejemplo Beniston (2004) define el evento de OC cuando la temperatura máxima excede el P90 de la climatología de verano durante tres días seguidos. Mientras que Gershunov (2009) considera que se requiere de 1, 2 o 3 días por encima del P99. Gran parte de los estudios publicados sobre eventos de OC se limitan a ciertas áreas o regiones (en su gran mayoría a Europa y América del Norte). Algunos autores consideran que los umbrales de P90 se asocian con extremos moderados, mientras que los P95 y P99 son considerados extremos intensos (Zhang *et al.*, 2011).

En México se confirmó que ha habido un aumento de la temperatura superficial del aire (1970-2004); donde el noroeste contrasta con el resto del país diferenciando un calentamiento más pronunciado (Pavía *et al.*, 2009). Particularmente García-Cueto *et al.* (2010) y García-Cueto *et al.*, (2013) definieron una OC utilizando el umbral P90, asociada a temperaturas del orden de 40-44 °C en Mexicali, y otras ciudades de Baja California; en el primer estudio se mostró que pese a que las temperaturas máximas de verano aumentan y disminuyen; fluctuando sin observar una tendencia clara, de 1951 hasta mediados de la década de 1980, la frecuencia de OC se incrementó a partir de la década de 1960, especialmente durante los meses de julio y agosto.

El propósito de esta tesis es investigar los eventos extremos de temperatura asociados a OC en el Noroeste de México, dada la hipótesis de que las OC han aumentado en número e intensidad en esta región, tras el evidente incremento global de la temperatura superficial del aire en las últimas décadas (IPCC, 2007). Específicamente, este trabajo se dedicará a analizar los episodios de OC en los estados de Chihuahua, Durango, Sinaloa, Sonora, Baja California y Baja California Sur. Se desprende de los análisis realizados conjuntamente del reciente incremento de la temperatura reportado para esta región (Pavía *et al.*, 2009); y de incrementos similares en el Oeste de Estados Unidos y Canadá, los cuales han sido relacionados con los impactos negativos de sequías e incendios forestales (e.g. Westerling *et al.* 2006).

Además se ha señalado que los impactos perjudiciales del aumento de la temperatura y la mayor frecuencia de OC se verán reflejados en el confort y el estrés estival, ya que esto nos podría llevar a un incremento en el consumo energético para enfriamiento y contribuiría, indirectamente al problema de la disponibilidad de agua. Por si fuera poco, se ha mostrado el riesgo que existe en relación a las OC nocturnas, debido a que durante estos eventos la mortalidad es más probable en interiores sin la ventilación adecuada (Robinson, 2001). Al mismo tiempo Alexander *et al.* (2006) señalan cambios significativos en temperaturas extremas, específicamente en temperaturas mínimas relacionadas a un incremento de noches cálidas. Igualmente Seager *et al.* (2007) destacan fuertes implicaciones hídricas como consecuencia de la transición hacia un clima más árido en el Suroeste de los Estados Unidos.

Por otro lado Karl *et al.* (1997), motivados por la OC registrada en Chicago en 2005, mostraron cómo el rango diurno de temperatura (DTR, por sus siglas en inglés) ha ido disminuyendo durante desde la década de 1950 a la de 1990, en América del Norte, observando un incremento de la temperatura máxima (T_{MAX}) pero sobre todo de la temperatura mínima (T_{MIN}). También Karl *et al.* (2008) encontraron que la disminución del DTR es aproximadamente igual al incremento de la temperatura media. Asimismo Gershunov *et al.* (2009) encontraron resultados similares a partir de 1980 y más claramente a partir de 2000, en los estados de California y Nevada de los Estados Unidos. Usando un modelo global del clima Meehl y Tebaldi (2004) encuentran que las OC serán más intensas,

más frecuentes y de mayor duración en Europa y América del Norte a partir de la segunda mitad del Siglo XXI. Además en las OC en Chicago durante 1995 y en Paris durante 2003, muestran la existencia de un patrón de circulación atmosférica específico, domos de alta presión que favorecen cielos despejados, vientos ligeros, aire cálido y condiciones semi-estacionarias sobre estas regiones que se intensificará con el aumento antropogénico de gases de efecto invernadero (GEI). Igualmente, García-Cueto *et al.*, (2013), utilizando los nuevos modelos del CMIP5 que serán utilizados en el 5° Reporte del IPPC, muestra que a finales del siglo XXI el umbral de P90 de la temperatura máxima podría incrementarse entre 2 y 5 °C.

En estudios recientes en Europa, tras la OC en el 2003, los eventos de OC se han asociado a dos regímenes de circulación atmosférica en verano que pudieron haber sido favorecidos por un anómalo calentamiento de la temperatura superficial del mar (SST por sus siglas en inglés) en el Océano Atlántico Tropical en conexión hacia zonas extratropicales (Cassou *et al.*, 2005). Durante este evento, la anomalía de la SST en el mar Mediterráneo fue excepcional entre 2 y 4 °C (Feudale y Shukla, 2007).

Anteriormente Colacino y Conte (1995), distinguieron dos tipos de OC en el Mediterráneo, las primeras de breve duración e intensas asociadas a movimientos verticales debido al desplazamiento hacia latitudes más altas del Jet subtropical, mientras que las segundas son más prolongadas con menor intensidad, relacionadas a condiciones de estancamiento a consecuencia de una dorsal térmica.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

1. Determinar la tendencia de la frecuencia anual de los eventos extremos asociados a las OC observadas, así como su variabilidad interanual en el Noroeste de México.

1.2.2 Objetivos particulares

1. Definir y caracterizar físicamente los eventos de OC en el Noroeste de México.
2. Investigar las posibles tendencias de estos eventos.
3. Analizar su variabilidad interanual.

1.3 Área de estudio

La zona de estudio seleccionada es el Noroeste de México, entre las latitudes 22° y 32.5° N, y las longitudes -119° y -103° W; abarcando los estados de Chihuahua, Durango, Sinaloa, Sonora, Baja California y Baja California Sur (Figura 1).

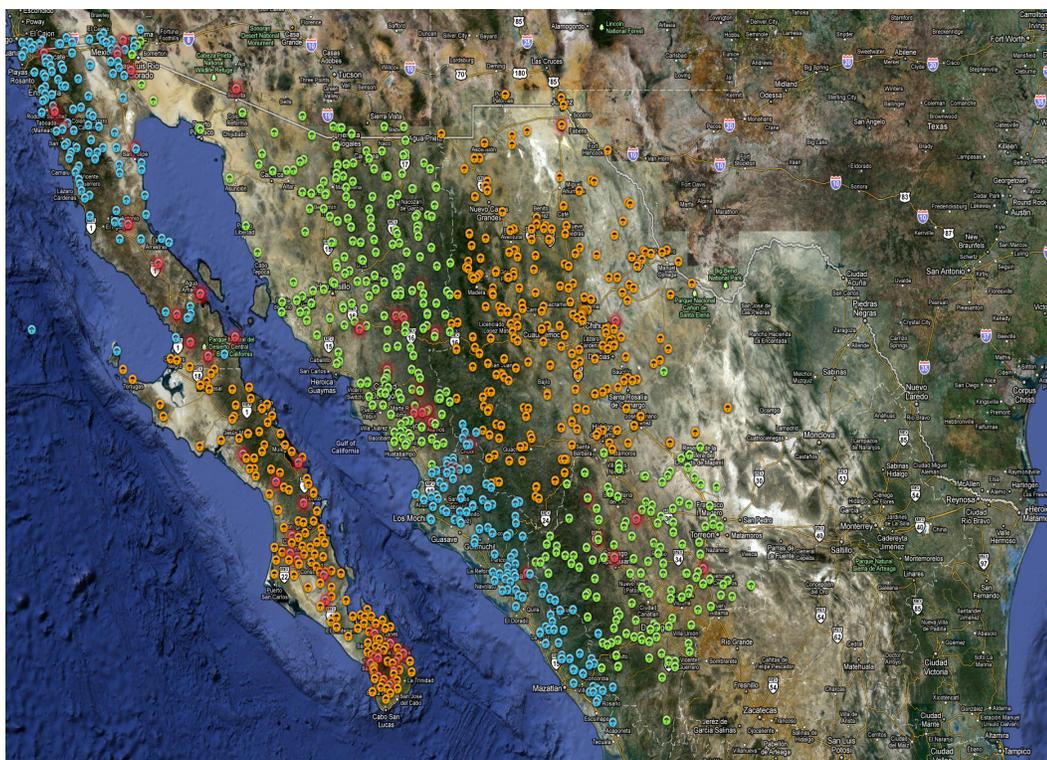


Figura 1. Mapa de las estaciones del área de estudio tomadas de la Base de datos climáticos del Noroeste de México (Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático, PEACC-BC disponible en <http://peac-bc.cicese.mx/datosclim/>).

El Noroeste de México es una zona con variada diversidad climática esencialmente caracterizada por dos regiones: la primera (Baja California y Baja California Sur) bajo un clima semiárido altamente variable a escala interanual debido a su situación geográfica (Arriaga-Ramírez y Cavazos, 2010); y la segunda (Chihuahua, Sonora, Sinaloa y Durango) con clima monzónico en respuesta al sistema montañoso formado por la Sierra Madre Occidental que subdivide esta región de acuerdo a la topografía (una subregión montañosa y otra subregión de menor elevación que incluye zonas costeras). En esta segunda región

durante el verano extendido (junio, julio, agosto, septiembre y octubre), las fluctuaciones en la precipitación están asociadas principalmente a lluvias monzónicas, ciclones tropicales y sistemas convectivos de mesoescala (Arriaga-Ramírez y Cavazos, 2010). En contraste en el extremo sur de Baja California Sur, el Este de Baja California, y el Norte de Sonora las condiciones son más de tipo desértico, caracterizadas por lluvias de verano como producto del paso de huracanes y de frentes fríos durante el invierno (Cavazos *et al.*, 2008). En general la temperatura en el Noroeste de México es muy variable durante casi todo el año debido a diferentes factores, además de la precipitación (Arriaga-Ramírez y Cavazos, 2010), como son los sistemas de vientos y la intensidad de la radiación solar. Esto origina una gran variedad de condiciones climáticas tales como las altas temperaturas alcanzadas durante el verano en la región circundante a Mexicali, B. C., y las bajas temperaturas alcanzadas durante el invierno en el estado de Durango.

1.4 Datos

Los datos utilizados en este estudio consisten en series de tiempo de T_{MIN} y T_{MAX} diarias tomadas de la base de datos climáticos del Noroeste de México (Figura 1) del Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático en Baja California (PEACC-BC) disponible en <http://peac-bc.cicese.mx/datosclim>. El PEACC-BC tiene como propósito evaluar el estado actual de los efectos del cambio climático en el estado de Baja California. Esta base de datos usa el programa ERIC III que contiene información del banco de datos históricos nacionales del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). El ERIC III tiene registros en la mayor parte de sus estaciones meteorológicas durante al menos cinco décadas. A pesar de la disminución en el número de estaciones en los últimos años, el SMN sigue siendo la fuente de información con registros de mayor longitud y amplia cobertura para estudios de clima a escala regional y nacional (Vázquez-Aguirre, *et al.* 2008).

La selección de series de T_{MIN} y T_{MAX} se realizó de acuerdo al control de calidad desarrollado por el PEACC-BC, que consta en aplicar los siguientes criterios a las observaciones de cada estación:

- a) Series sin más del 15% de datos faltantes.
- b) Valores entre ± 4 desviaciones estándar de la temperatura promedio.
- c) Valores comparables entre estaciones en un radio de medio grado o 50 km.
- d) Valores comparables entre estaciones con una altitud ± 250 m.
- e) Series con lapsos sin datos no mayores a cuatro años.

Después de aplicar estos criterios para el análisis se seleccionaron 78 estaciones de un total de 1145 posibles en la región de estudio. El periodo de análisis va de 1961 a 2000, y las 78 estaciones seleccionadas coinciden en el periodo base 1961-1990. El Apéndice A, contiene la lista de las estaciones elegidas y otra información pertinente.

Capítulo 2

Metodología

2.1 Ondas de calor en el contexto del clima

Sin un método único para la definición de las OC su detección se ha efectuado hasta ahora a partir de criterios subjetivos, justificando su validez a través de pruebas estadísticas no paramétricas. En general las OC están asociadas a excesivo calor con temperaturas que pueden sobrepasar $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ o más a la temperatura promedio de una región durante los meses de verano, considerando que estos eventos extremos pueden variar de región a región dependiendo de la climatología local (IPCC, 2001).

En la presente investigación se utilizó el método del percentil siguiendo la caracterización propuesta por Gershunov *et al.* (2009), y García-Cueto *et al.* (2010, 2013). De este modo, tomando como base las series diarias de T_{MIN} y T_{MAX} , se consideró día o noche cálida aquella en la cual se excediera el P90 calculado sobre los meses de verano (los 122 días de junio a septiembre) en el periodo 1961-1990. Posteriormente se determinó que existía una OC localmente cuando el evento tenía una duración de al menos dos días o noches cálidos. Similarmente se exploró el P95 y el P99 (ver Figura 2), como eventos más extremos (e.g., Zhang *et al.*, 2010).

El percentil es una medida estadística no central que por su posición en las series de datos ordenados de menor a mayor separa los valores extremos. Por ejemplo el P90 indica que por encima de este valor se encuentra sólo el 10% de los datos. En este sentido [según la lista de índices desarrollada por el Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI, por sus siglas en inglés), coordinado por la Comisión de Climatología de la Organización Meteorológica Mundial, el proyecto Predictibilidad y Variabilidad Climática (CLIVAR, por sus siglas en inglés), y la Comisión Técnica de Oceanografía y Meteorología Marítima] el P90 es considerado un índice representativo de la temperatura mínima para las noches cálidas (TN90p), así como de la temperatura máxima para los días cálidos (TX90p).

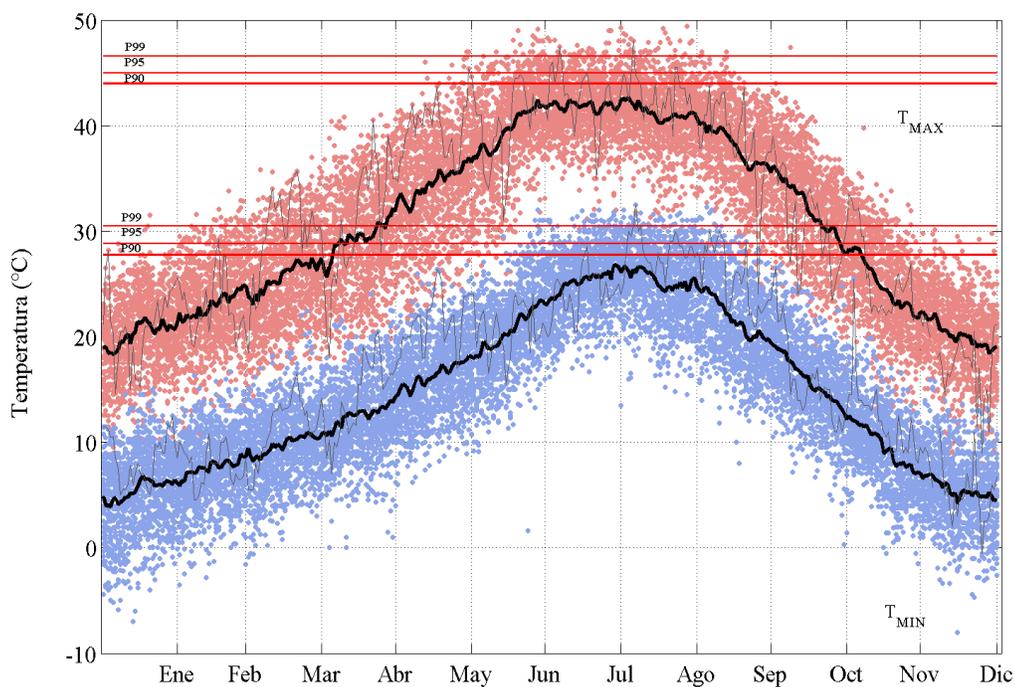


Figura 2. Datos diarios de T_{MAX} (color rosa) y T_{MIN} (color azul) en la estación Mexicali, B.C. La línea negra remarcada indica el valor medio de T_{MAX} y T_{MIN} en el periodo 1961-2000. La línea gris muestra los valores de T_{MAX} y T_{MIN} para un año en particular (1997). Las líneas rojas continuas indican los P90, P95 y P99 de las temperaturas de verano.

En todos los casos (P90, P95 y P99) se definió una OC a partir de una duración mínima de dos días. En la Figura 3 se indican, sólo como ejemplo, OC diurnas y nocturnas definidas sólo con el P90 durante julio y agosto de 1997 en la estación de Santo Tomás, B.C. (Apéndice A). Las OC diurnas (o nocturnas) separadas por un día (o noche) que no supera el percentil escogido se consideran dos eventos.

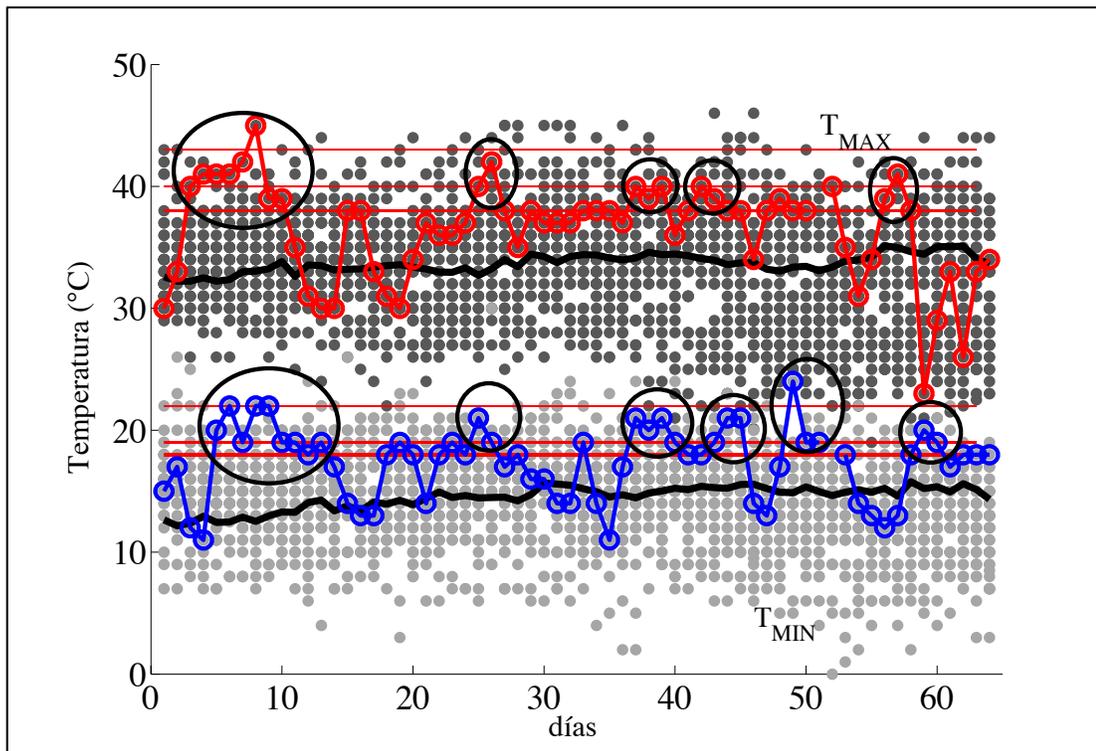


Figura 3. Ejemplos de OC en la estación Santo Tomás, B.C. Climatología diaria de los datos de T_{MAX} (puntos negros) y T_{MIN} (puntos grises) durante julio y agosto de 1961-2000, resaltando en rojo y azul los valores que ocurrieron en 1997. Las líneas horizontales rojas muestran el P90, P95 y P99. Las líneas negras remarcadas indican los valores medios de T_{MAX} y T_{MIN} . Los círculos/elipses en color negro identifican algunas OC durante esos meses en 1997.

2.2 Cuantificación y tendencias de ondas de calor

Una vez calculados los percentiles en las estaciones, se evaluó el número de eventos de OC ocurridos al año durante el periodo de análisis (1961 a 2000). Además de la forma anual también se calculó la frecuencia y duración de las OC en lapsos mayores. Para estimar la tendencia de las OC se calculó la pendiente de una recta ajustada a los datos por el método de cuadrados mínimos (Figura 4).

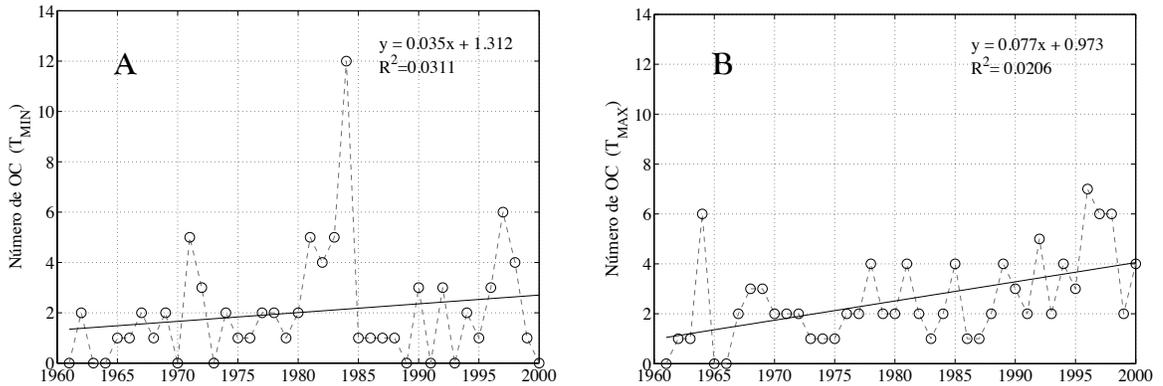


Figura 4. Ejemplos de ajuste del número de eventos anuales en la T_{MIN} y T_{MAX} utilizando el P90 donde la tendencia resulto a) No significativa y b) Significativa. En la estación de Santo Tomás, Baja California.

Se calculó la significancia de las pendientes al 95% de confianza de acuerdo con el método descrito por Pavia *et al.* (2009).

Para caracterizar la intensidad de las OC se estimaron los grados excedidos por arriba de las temperaturas umbrales determinadas con el P90 de acuerdo con Gershunov *et al.* (2009). Es decir: se obtuvo la diferencia del valor de las temperaturas P90 con respecto a la T_{MIN} diaria, y de igual forma para la T_{MAX} diaria durante el verano (1 junio al 30 de septiembre):

$$iD_{P90}^{k,y} = \sum_{s=JJAS} (T_{MIN}^{k,y,s} - T_{MIN}^{k,P90}) \quad (1)$$

$$xD_{P90}^{k,y} = \sum_{s=JJAS} (T_{MAX}^{k,y,s} - T_{MAX}^{k,P90}) \quad (2)$$

donde iD y xD indican la suma de grados Celsius excedidos por las OC nocturnas (1) y OC diurnas (2), y indica el verano de cada año dentro del periodo de análisis, k representa la clave de la estación, s el día correspondiente dentro del verano ($s = 1, 2, \dots, 122$). Aclarando que si $iD < 0$ se considera $iD \equiv 0$, similarmente si $xD < 0$ se considera $xD \equiv 0$.

Capítulo 3

Resultados

3.1 Regionalización climática

Las 78 estaciones seleccionadas en esta tesis (Apéndice A) corresponden al 7% de todas las estaciones distribuidas en nuestra área de estudio y su cobertura temporal no es homogénea. Por ejemplo: la estación de Balleza en Chihuahua (clave 8005) con datos de 1928 a 2000, pero con un periodo efectivo de sólo 22 años; o la estación de San Diego en Durango (clave 10122) con datos de 1973 a 1983. Sin embargo en la selección de estaciones se trató de cubrir el periodo de análisis de 1961 a 2000, sin interrupciones mayores a cuatro años.

Una vez seleccionadas las estaciones, se analizaron los cambios observados en las series diarias de T_{MIN} y T_{MAX} , para lo anterior se realizó el análisis de clima del área de estudio a escala regional utilizando datos de temperatura y precipitación y datos de referencia de los sitios (orientación geográfica y altitud). Con lo anterior se construyeron diagramas climáticos descriptivos de las subregiones localizadas en cada estado. Estos diagramas climáticos, que también son conocidos como diagramas ombrotérmicos o climogramas, muestran las condiciones climáticas de la región a lo largo del año. En las Figuras 5 a la 10 se representa el relieve de cada estado, las distribuciones geográficas de las subregiones, y los correspondientes climogramas que muestran el comportamiento de las medias mensuales de T_{MAX} y T_{MIN} , además de la temperatura media T_{MED} . Además se incluye la precipitación mensual promedio (PCP) dentro del mismo periodo (1961 a 2000).

En Baja California (Figura 5) se observan precipitaciones de invierno, mayores en la subregión orientada hacia el Océano Pacífico (zona de barlovento, ~220 mm/año), comparadas con las de la región que bordea el Golfo de California (zona de sotavento, ~70 mm/año). El mes más cálido es agosto en la región de barlovento (~32.1 °C) y julio en la región de sotavento (~38.3 °C). En la parte norte y centro de la región a sotavento se localiza la franja costera del Desierto Sonorense (Llanura Sonorense, ver Figura 5) que corresponde a

la región más árida y extremosa del estado (Cavazos, 2008). Debido a la orientación de las Sierras en Baja California, se generalizaron dos subregiones. La vertiente que está orientada hacia el oeste fue considerada el barlovento, recibe los frentes fríos de manera directa; mientras la orientada al este, fue considerada como el sotavento, generalmente más seca a la anterior.

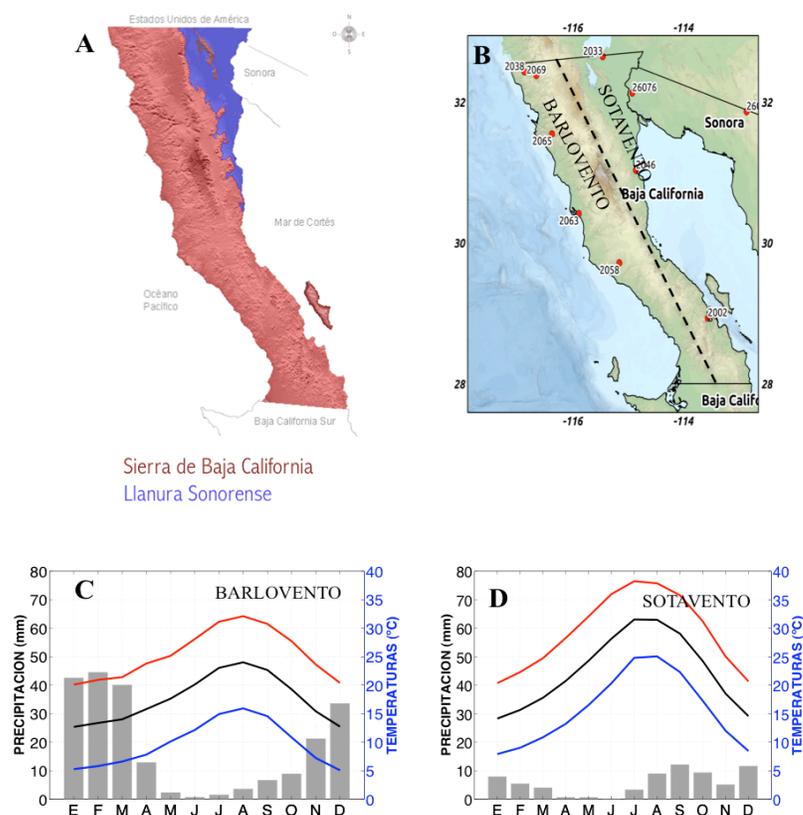


Figura 5. (a) Relieve topográfico del estado de Baja California (INEGI, 2013), (b) Regionalización climática: zonas barlovento y sotavento, (c) Climograma de la zona de barlovento (Océano Pacífico), y (d) Climograma de la zona de sotavento (Golfo de California). Los diagramas climáticos muestran los datos medios mensuales de PCP (barras en gris), T_{MAX} (línea roja), T_{MED} (línea negra), y T_{MIN} (línea azul) durante el periodo 1961-2000.

En contraste, en Baja California Sur (Figura 6) las precipitaciones más abundantes son en verano (~300 mm/año), con un comportamiento bimodal anual en las subregiones del norte y centro. Las precipitaciones promedio en la zona norte son de ~150 mm/año, en el centro de ~180 mm/año y en el sur superan los 300 mm/año, incluso algunas estaciones alcanzan ~400 mm/año debido a la influencia de los ciclones tropicales (Farfán *et al.* 2013).

En todos los casos las temperaturas máximas son superiores a los 35 °C, pero en el norte se presentan durante agosto y en el centro y sur durante julio. En el caso de la distribución de las temperaturas mínimas en la península de Baja California, enero y diciembre son los meses más fríos. Siendo en general más bajas en el norte durante diciembre, por el paso de frentes fríos, que las más bajas en el resto de la península durante enero.

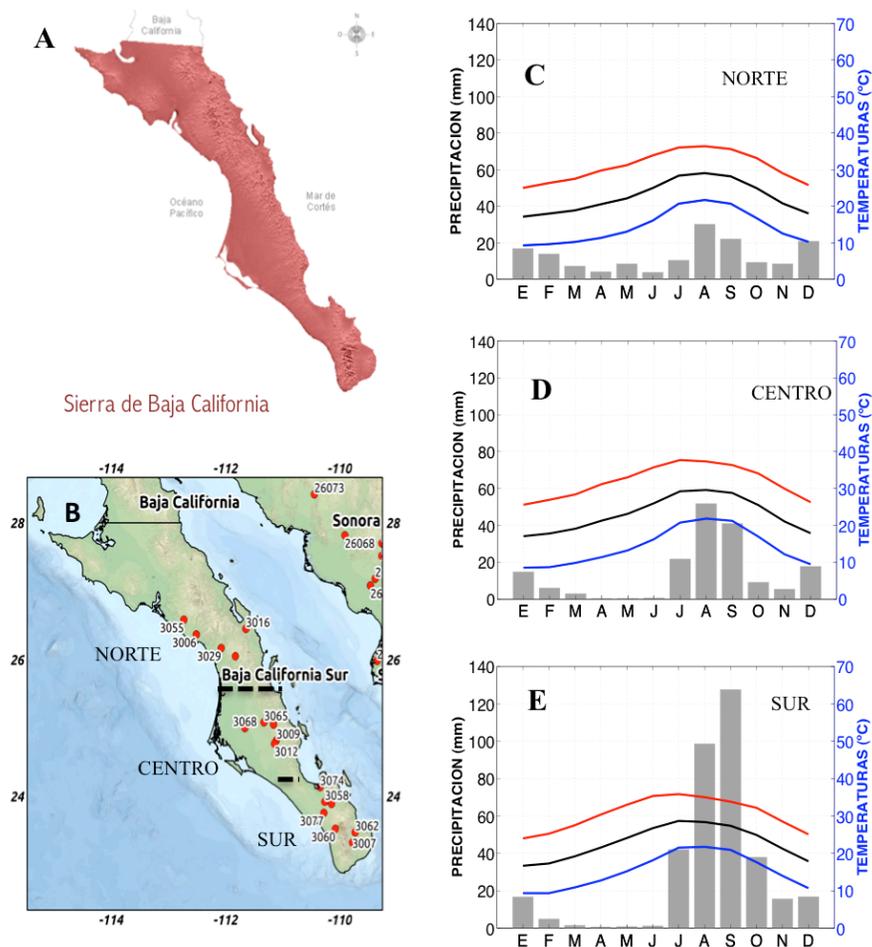


Figura 6. (a) Relieve topográfico del estado de Baja California Sur (INEGI, 2013), (b) Regionalización climática: norte, centro y sur; (c) Climograma de la zona norte, (d) Climograma de la zona centro, y (e) Climograma de la zona sur. Los diagramas climáticos muestran la marcha anual de la PCP (barras en gris), T_{MAX} (línea roja), T_{MED} (línea negra), y T_{MIN} (línea azul).

En Durango las temperaturas máximas son del orden de 30 °C en la subregión Sierra (Figura 8b) y 47 °C en la subregión Llanuras. Así mismo en agosto recibe una precipitación de ~135 mm en la subregión Cima y ~100 mm en subregión Sierra; además ~50 mm en la subregión Llanuras en septiembre.

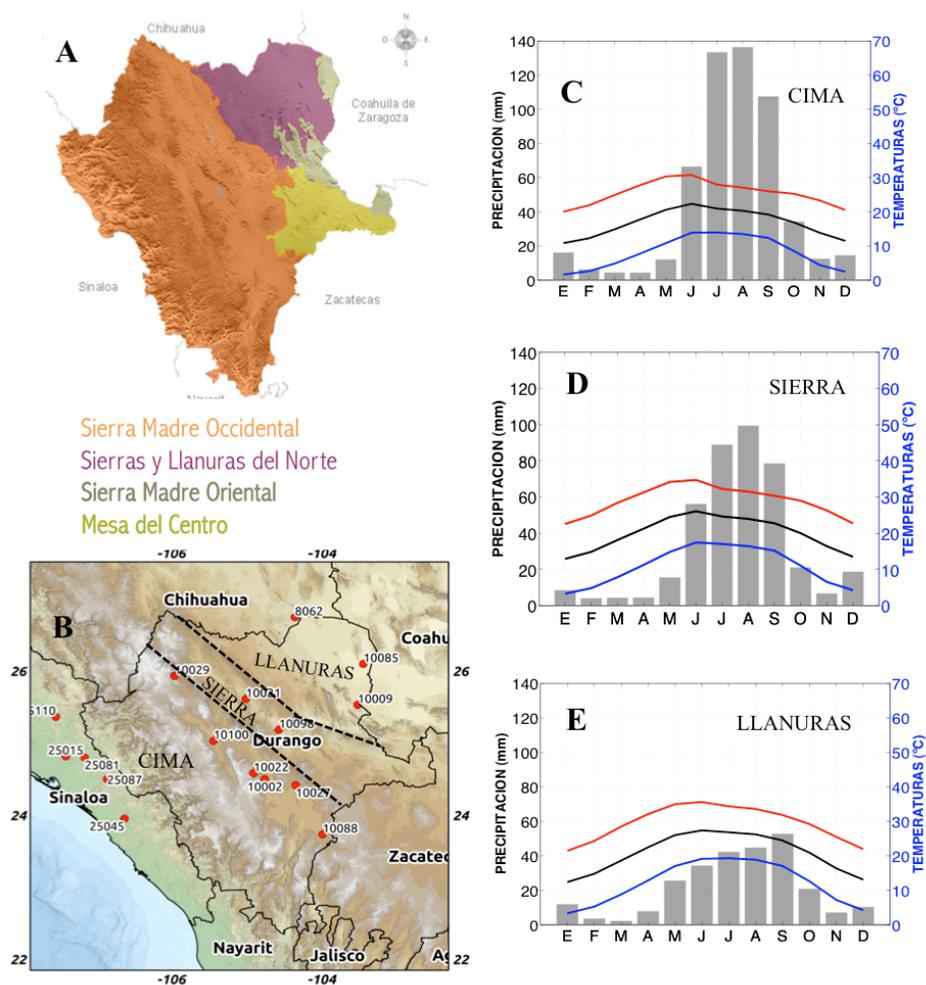


Figura 8. (a) Relieve topográfico del estado de Durango (INEGI, 2013), (b) Regionalización climática: Cima, Sierra, y Llanuras; (c) Climograma Cima de la Sierra Madre Occidental, (d) Climograma Sierra Madre Occidental, y (e) Climograma Sierras y Llanuras del Norte. Los diagramas climáticos muestran la marcha anual de la PCP (barras en gris), T_{MAX} (línea roja), T_{MED} (línea negra), y T_{MIN} (línea azul).

Sinaloa (Figura 9) tiene sus mayores precipitaciones en agosto, ~ 80 mm en la subregión Llanura Costera, ~ 160 mm en la subregión Sierra del Norte, y ~ 220 mm en la subregión Sierra Madre Occidental, todas ellas asociadas a lluvias monzónicas, ciclones tropicales y lluvias topográficas (Cavazos *et al.* 2008). Las precipitaciones anuales oscilan entre los 235 y 910 mm/año. Las temperaturas máximas oscilan entre 41.5 y 50 °C durante junio. Las subregiones con temperaturas más bajas (entre -5 y 6 °C) son las de las Sierras.

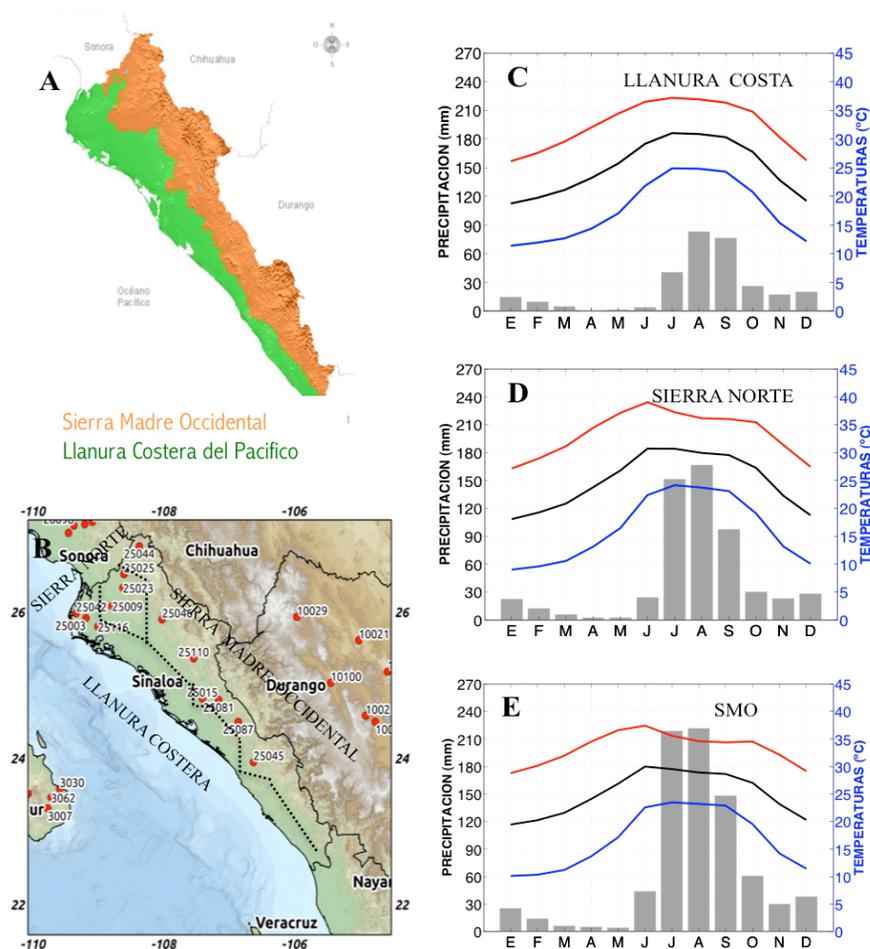


Figura 9. (a) Relieve topográfico del estado de Sinaloa (INEGI, 2013), (b) Regionalización climática: Llanura Costera, Sierra Norte, y Sierra Madre Occidental; (c) Climograma Llanura Costera, (d) Climograma Sierra Madre Occidental Norte, y (e) Climograma Sierra Madre Occidental Este. Los diagramas climáticos muestran la marcha anual de la PCP (barras en gris), T_{MAX} (línea roja), T_{MED} (línea negra), y T_{MIN} (línea azul).

Sonora (Figura 10) registra en la subregión I durante agosto precipitaciones ~45 mm (Figura 10c), y ~130 mm en la subregión III (Figura 10e). En las subregiones próximas a la Sierra (II y IV) los máximos son durante julio y agosto asociados al monzón, oscilando entre los 120 y los 140 mm. Anualmente en esta entidad se llegan a presentar entre 200 mm/año para las subregiones I y III, y 900 mm/año en las subregiones II y IV. Las temperaturas máximas oscilan entre 37 y 50 °C en junio, y las temperaturas mínimas oscilan entre -14 y 5.5 °C.

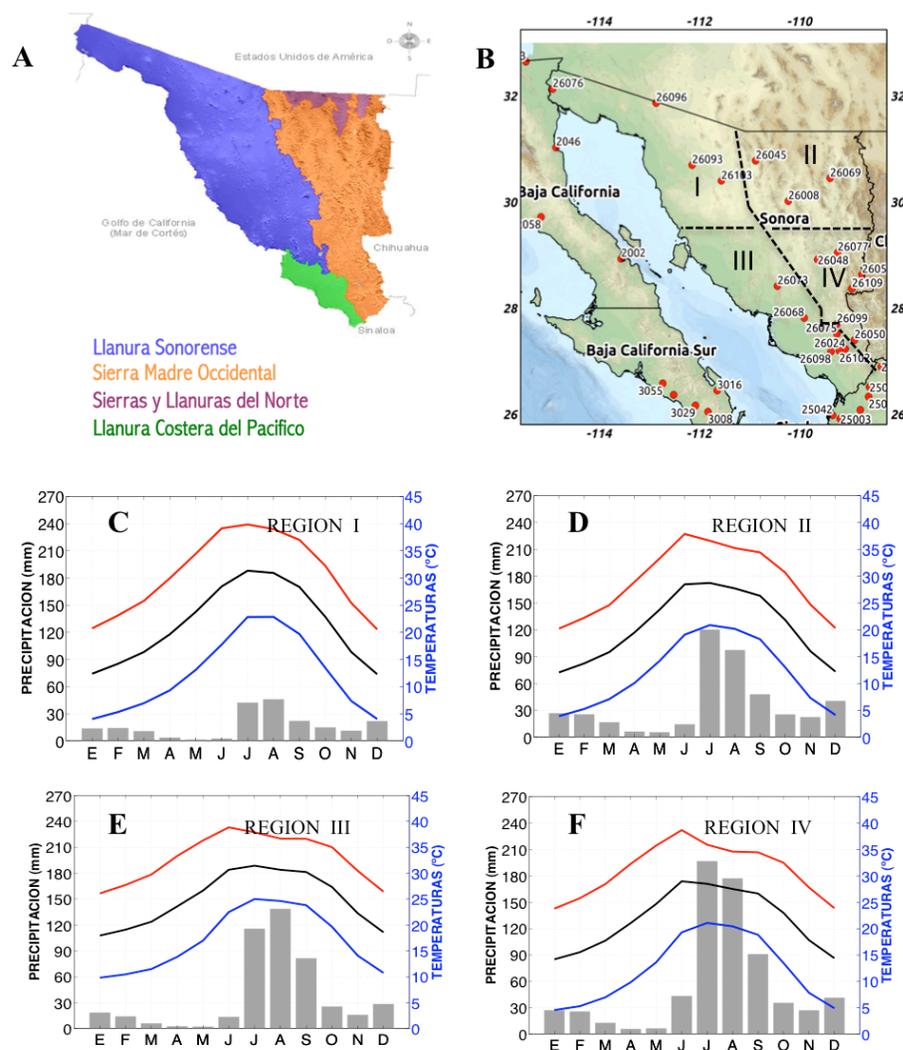


Figura 10. (a) Relieve del estado de Sonora (INEGI, 2013), (b) Regionalización climática: Cima, Sierra, y Llanuras; (c) Climograma Cimas de la Sierra Madre Occidental, (d) Climograma Sierra Madre Occidental, y (e) Climograma Sierras y Llanuras del Norte. Los diagramas climáticos muestran la marcha anual de la PCP (barras en gris), T_{MAX} (línea roja), T_{MED} (línea negra), y T_{MIN} (línea azul).

3.2 Análisis de Anomalías

La segunda parte de este trabajo consistió en calcular los promedios estatales de la temperatura de cada año, \bar{T}_i , $i=1961, 1962, \dots, 2000$, así como las anomalías con respecto a un periodo base (1961-1990):

$$A_i = \bar{T}_i - \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} \bar{T}_i,$$

La tendencia de A_i se describe con el mismo método de la sección anterior (Figuras 11 a 14). Al igual que el rango mensual de temperatura (RMT), que se describe más adelante. En promedio, Baja California y Sinaloa presentaron tendencias significativas en la anomalía de la T_{MIN} con $A(T_{\text{MIN}}) = 0.021 \text{ }^\circ\text{C/año}$ y $A(T_{\text{MIN}}) = 0.014 \text{ }^\circ\text{C/año}$, respectivamente (Figuras 11a y 13a).

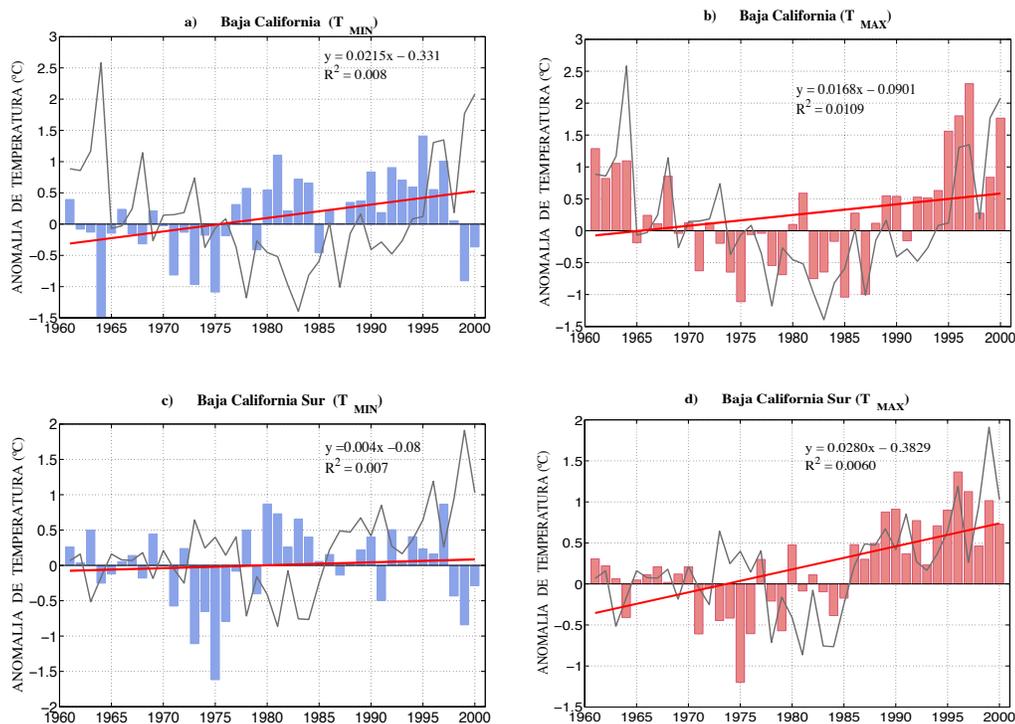


Figura 11. Anomalías de la temperatura media mínima anual (barras en azul), y de la temperatura media máxima anual (barras en rosa) en la península de Baja California con respecto a la media del periodo base (1961-1990). La línea en gris corresponde al rango mensual de temperatura, y la línea roja indica la tendencia estimada sobre la temperatura.

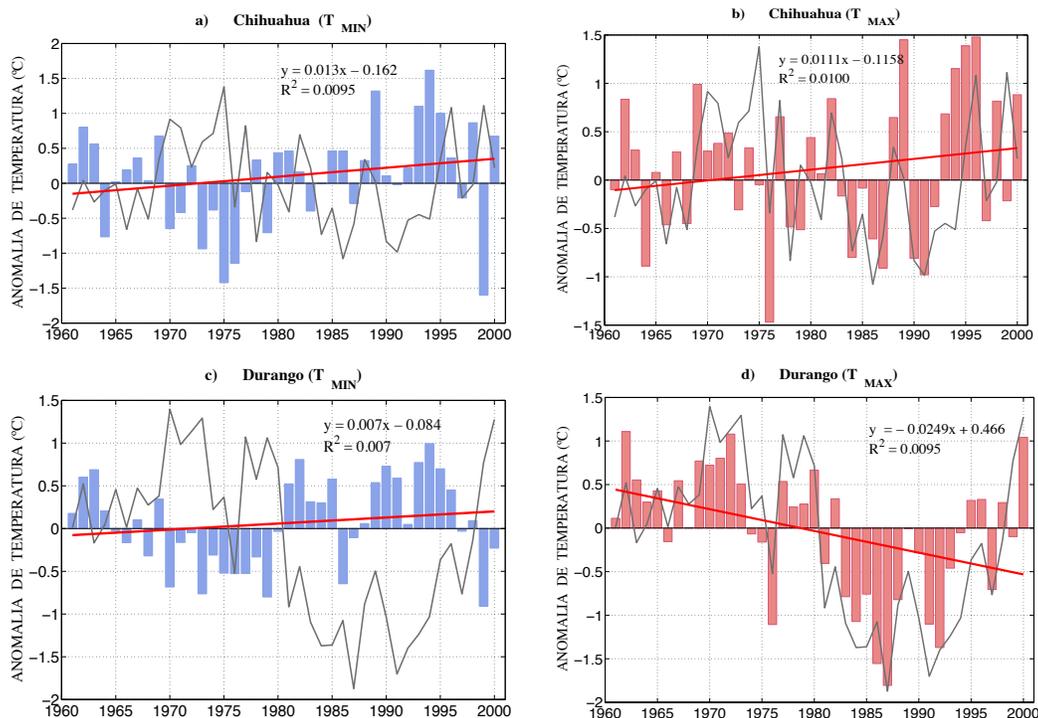


Figura 12. Anomalías de la temperatura media mínima anual (barras en azul), y de la temperatura media máxima anual (barras en rosa) con respecto a la media del periodo base (1961-1990), en los estados de Chihuahua y Durango. La línea en gris corresponde al rango mensual de temperatura. La línea roja muestra la tendencia de la temperatura.

En cuanto a las tendencias de las anomalías de temperaturas máximas, éstas fueron significativas en Baja California Sur con 0.028 ± 0.006 °C/año (Figura 11d), en Durango con -0.025 ± 0.009 °C/año (Figura 12d) y en Sinaloa con 0.028 ± 0.005 °C/año (Figuras 13b). Simultáneamente, los resultados de las anomalías del rango mensual de temperatura observan tendencia significativamente positiva en Baja California Sur de 0.024 ± 0.007 °C/año, y negativa en Durango de -0.034 ± 0.011 °C/año (Figura 14).

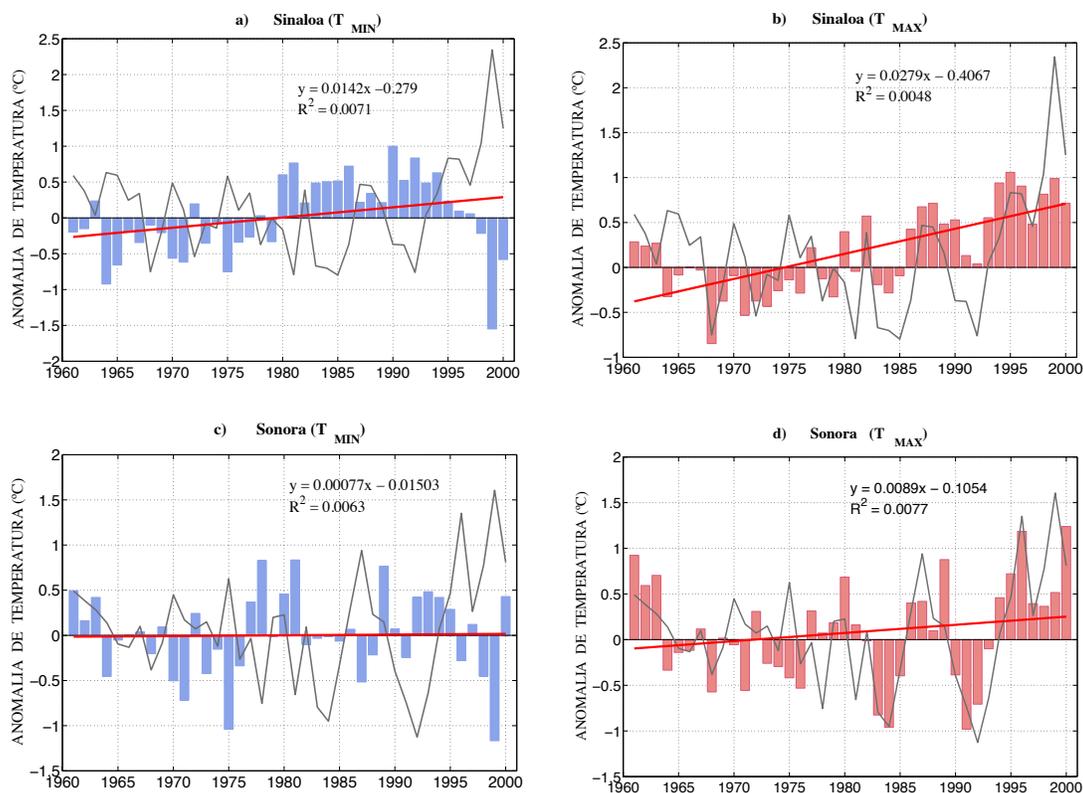


Figura 13. Anomalías de la temperatura media mínima anual (barras en azul), y de la temperatura media máxima anual (barras en rosa) con respecto a la media del periodo base (1961-1990), en los estados de Sinaloa y Sonora. La línea en gris corresponde al rango mensual de temperatura. La línea roja muestra la tendencia de la temperatura.

En Baja California y Sinaloa todas las anomalías muestran un marcado incremento a mediados de la década de 1980 (Figuras 11 y 13). Mientras que en Durango durante esta década hubo un cambio de signo (de positivo a negativo) en $A(T_{MAX})$.

Similarmente se calcularon las anomalías del RMT que se muestran en las Figuras 10-14. El RMT se obtuvo directamente de restar la temperatura media mensual mínima de la temperatura media mensual máxima.

La evolución de las tendencias RMT, resultó significativa en Baja California Sur $A_{(R_{TM})} = 0.024 \pm 0.007$ °C/año (Figura 14a). Además de Durango donde la tendencia fue negativa $A_{(R_{TM})} = -0.034 \pm 0.011$ °C/año (Figura 14b). Los cambios sobresalientes aparecieron en 1985 y en el 2000. En estas entidades las T_{MIN} medias resultaron entre 20° y 15 °C, y las T_{MAX} en 35 °C y 30 °C.

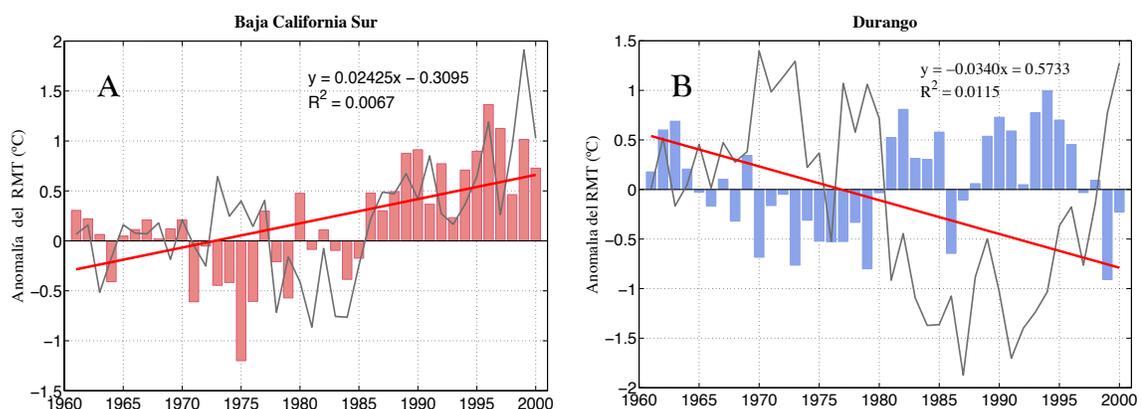


Figura 14. Anomalías del rango mensual de temperatura (línea gris) y de temperatura media máxima anual (barras en rosa) con respecto a la media del periodo base (1961-1990), en los estados de a) Baja California, y b) Durango. La línea negra muestra la tendencia del rango mensual de temperatura.

3.3 Percentiles

Los valores de los diferentes percentiles de T_{MIN} utilizados para definir las OC nocturnas se presentan en la Figura 15. Se observó, un patrón similar independientemente del percentil calculado y valores siempre por arriba de los 18 °C en Baja California, 21 °C en Baja California Sur, 12 °C en Chihuahua, 14 °C en Durango, 24.5 °C en Sinaloa, y 17 °C en Sonora (Tabla 1). Solamente estaciones por arriba de los 1,700 m sobre el nivel del mar presentan valores menores a 17 °C. Esto significa que en gran parte del Noroeste de México podrían presentarse OC nocturnas con temperaturas por arriba de los 17 °C.

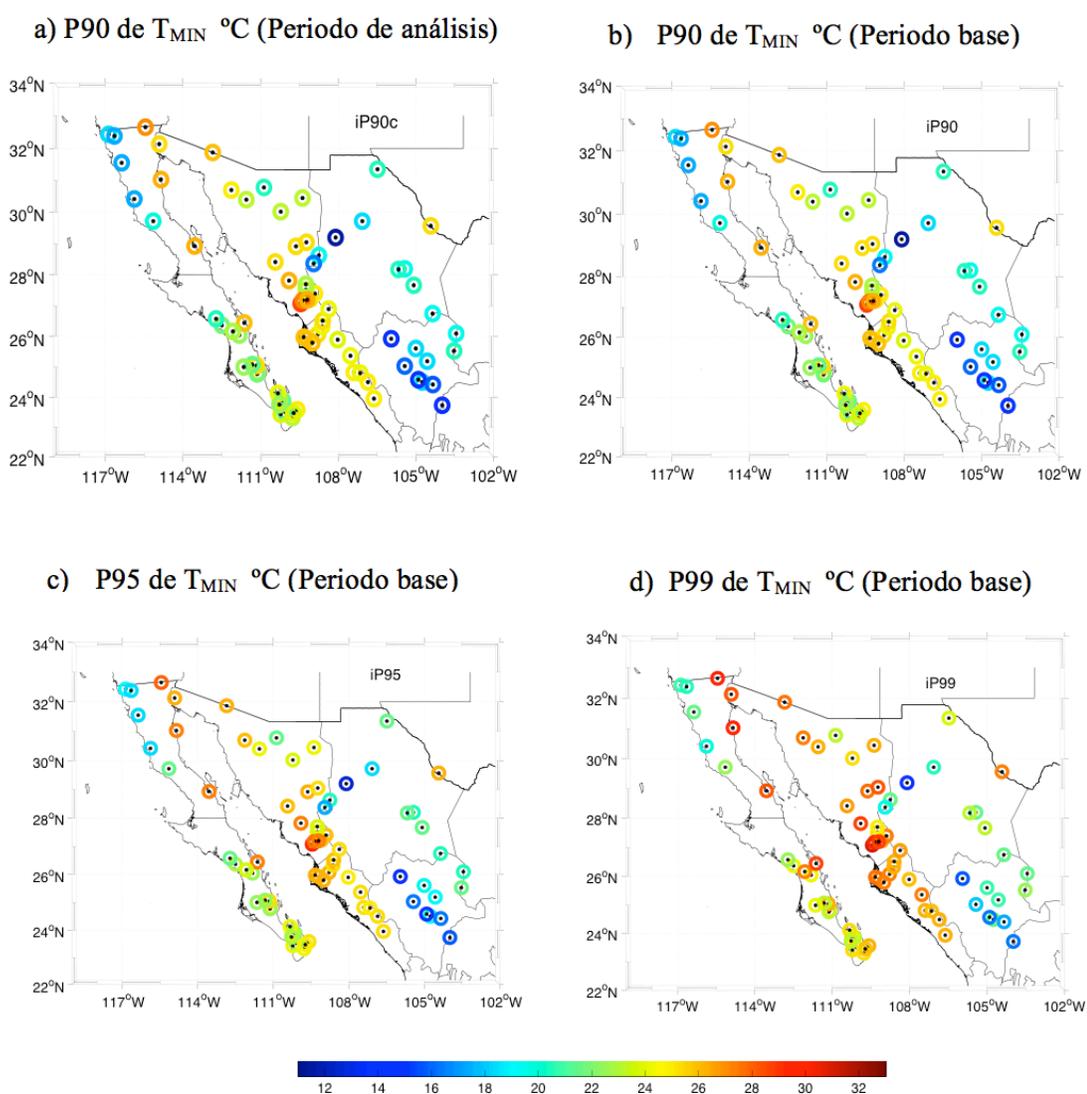


Figura 15. Umbrales de los percentiles de T_{MIN} durante junio-septiembre estimados en dos periodos a) P90 en 1961-2000, y b) P90, c) P95 y d) P99 en el periodo base de 1961-1990.

Los valores de los diferentes percentiles de T_{MAX} utilizados para definir las OC diurnas se presentan en la Figura 16. La franja este de Sonora, la zona costera, es la zona más cálida del Noroeste de México con valores siempre por arriba de los 33 °C. Los valores de P95 y P99 son 1 a 2 °C y 2 a 5 °C mayores que el P90, respectivamente. En general los valores más altos (44 - 47 °C) se observan en el Noreste de Baja California y Noroeste de Sonora (Tabla 2).

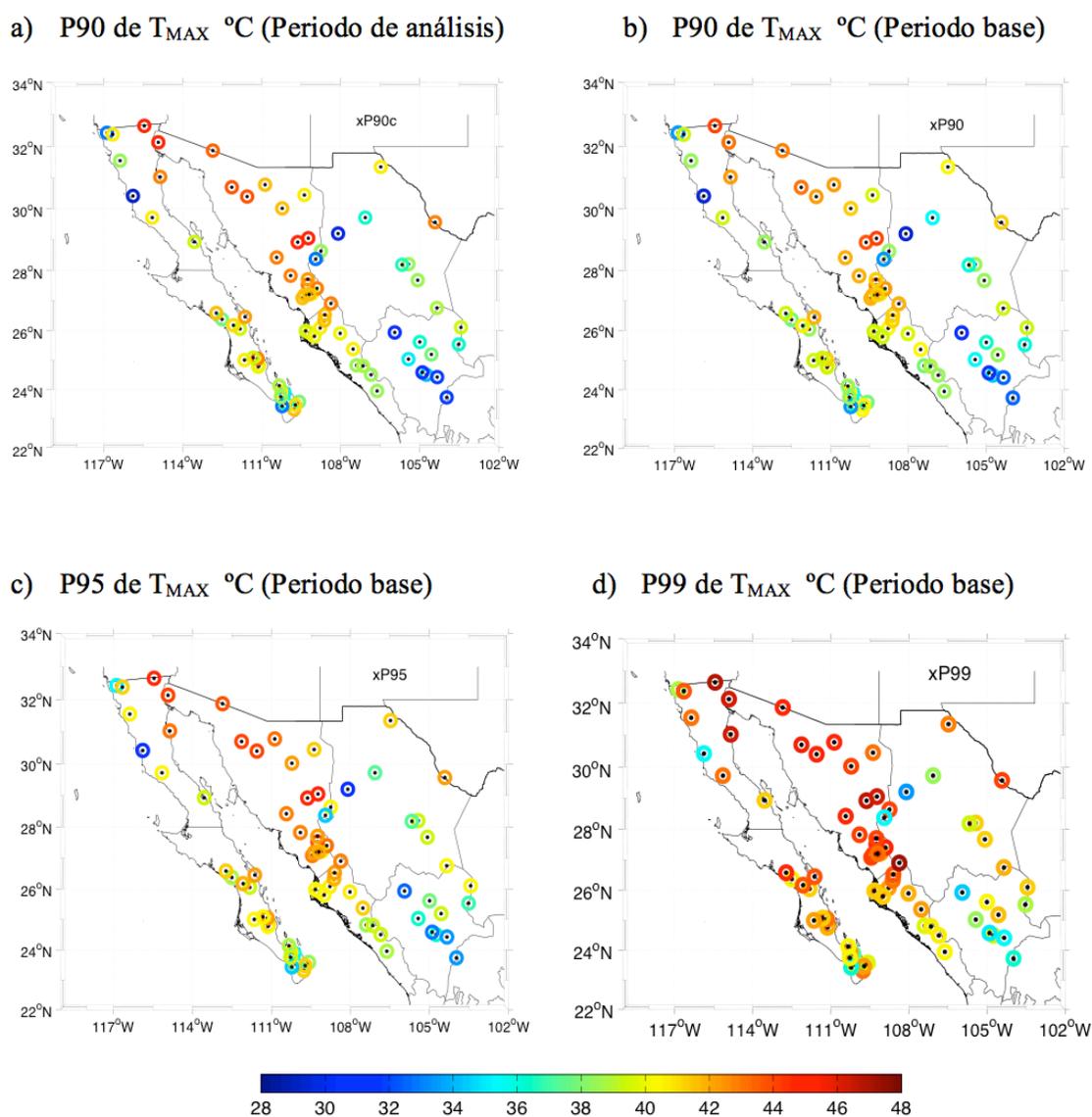


Figura 16. Umbrales de los percentiles de T_{MAX} durante junio-septiembre estimados en dos periodos a) P90 en 1961-2000, y b) P90, c) P95 y d) P99 en el 1961-1990.

Tabla 1. Umbrales de los percentiles P90, P95 y P99 de T_{MIN} calculados en °C sobre el periodo base (1961-1990) y el periodo de análisis (1961-2000). En cada percentil se muestran los umbrales mínimos (izquierda) y máximos (derecha) en cada estado.

PERIODO:	1961-1990						1961-2000					
Percentiles	P90		P95		P99		P90		P95		P99	
ESTADO	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
BC	18	27.8	19	28.8	20.5	30.5	18	28.3	19	29.5	20.5	34
BCS	21	26.5	22	28	23	29.5	21	26.5	22	27.5	24	29.5
CHIH	12	26	13	27	14	28	12	26	13	27	14	28
DGO	14	21	15	22	16	23	14	21.5	15	22	16	24
SIN	24.5	26.5	25.5	27	26.5	28.5	25	26.5	25.5	27	27	28
SON	17	29.5	18	30.5	20	32	17	29	18	30	20	31.5

Tabla 2. Umbrales de los percentiles P90, P95 y P99 de T_{MAX} calculados en °C sobre el periodo base (1961-1990) y el periodo de análisis (1961-2000). En cada percentil se muestran los umbrales mínimos (izquierda) y máximos (derecha) en cada estado.

PERIODO	1961-1990						1961-2000					
Percentiles	P90		P95		P99		P90		P95		P99	
ESTADO	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
BC	29	44	31	45	35	46.6	29.5	44.5	31	45.6	35	47
BCS	33	41.5	34	42	36	45	33	42	34	44	36	47
CHIH	29	41	31	42	33	44	30	42	32	43	35	44
DGO	30	39	32	40	34	41.2	31	39	32	40	34	41.5
SIN	37.5	41.5	38	42.5	39.5	47	38	42	38.5	43	40	46
SON	33	44	34	45	35	46.5	33	44	34	45	35	47

Las estaciones con valores de T_{MAX} más bajas son Santa María Del Mar en Baja California, Madera en Chihuahua, Guanaceví y Canatlán en Durango. En estas estaciones el 90% de las T_{MAX} es inferior a 29 °C, 30 °C, 35.5 °C y 31°C, respectivamente. Así mismo el 1% es superior a 35 °C, 33 °C, 34.5 °C y 34 °C, respectivamente. Exceptuando Santa María Del Mar las demás estaciones se localizan por arriba de los 2,000 m sobre el nivel del mar.

Los P90 de T_{MIN} son ~16 °C menores que los P90 de T_{MAX} en casi todo el área de estudio (en Sinaloa fueron ~13.8 °C menores). Similarmente para P95 y P99 las T_{MIN} son menores con

respecto a las T_{MAX} 16.5 y 17 °C, respectivamente (siendo menores en Sinaloa son 14 y 14.4 °C menores, respectivamente).

A fin de comparar los valores de P90 utilizados en determinar tanto las OC diurnas y nocturnas en la Figura 17 se usó una misma escala. El rango de T_{MIN} es de 12 a 29.5 °C, y el de T_{MAX} es de 29 a 44 °C.

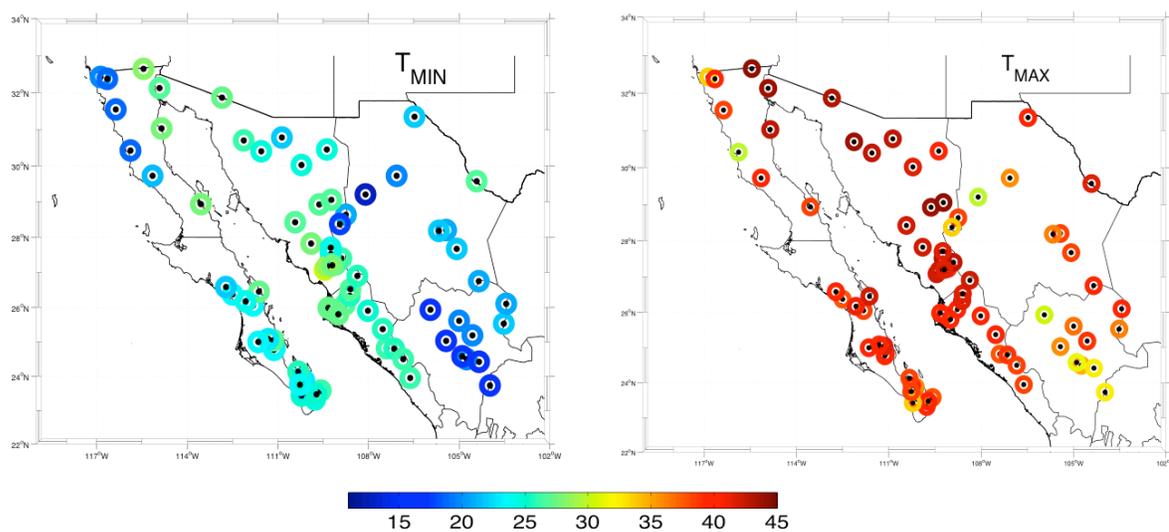


Figura 17. Valores de los umbrales de P90 para definir las OC nocturnas (T_{MIN}) y diurnas (T_{MAX}) en el periodo base 1961 a 1990.

3.4 Análisis de Tendencias

En esta sección se analiza la tendencia de las OC (asociadas al P90) de acuerdo a su frecuencia, duración e intensidad.

3.4.1 Frecuencia de las ondas de calor

Después de aplicar los criterios antes mencionados se identificaron 7,258 OC diurnas y 6,180 OC nocturnas entre 1961 y 2000 en la región de estudio. En ambos casos la frecuencia de las OC aumentó entre 1981 y 2000, comparada con la del periodo 1961-1980; en particular entre 1991 y 2000 cuando hubo 2,473 OC diurnas (Tabla 3).

Tabla 3. Frecuencia total de las OC diurnas (T_{MAX}) y nocturnas (T_{MIN}) por década en el Noroeste de México durante 1961-2000.

Edo.	1961-1970		1971-1980		1981-1990		1991-2000		Total	
	T_{MIN}	T_{MAX}								
B.C.	154	216	143	160	224	173	219	307	740	856
B.C.S.	348	384	212	284	407	473	499	727	1466	1868
CHIH.	174	129	118	186	149	176	241	212	682	703
DGO.	225	203	168	207	208	157	232	174	833	741
SIN.	183	166	272	248	296	321	280	475	1031	1210
SON.	395	370	454	516	267	416	369	578	1428	1880

Para el análisis mensual se decidió que cuando las OC iniciaban en un mes y continuaban en otro, éstas serían cuantificadas dentro del mes donde tuvieran mayor duración y después fueron agrupadas por décadas (Figuras 18 y 19). En la Figura 18 podemos ver que (con excepción de Durango durante junio y agosto) en general ocurrieron más OC diurnas durante 1991-2000 que en 1961-1970, y que en Sinaloa tuvieron un aumento monotónico década a década. En la Figura 19 podemos ver que (con excepción de Sonora en julio y Durango en septiembre) en general ocurrieron más OC nocturnas.

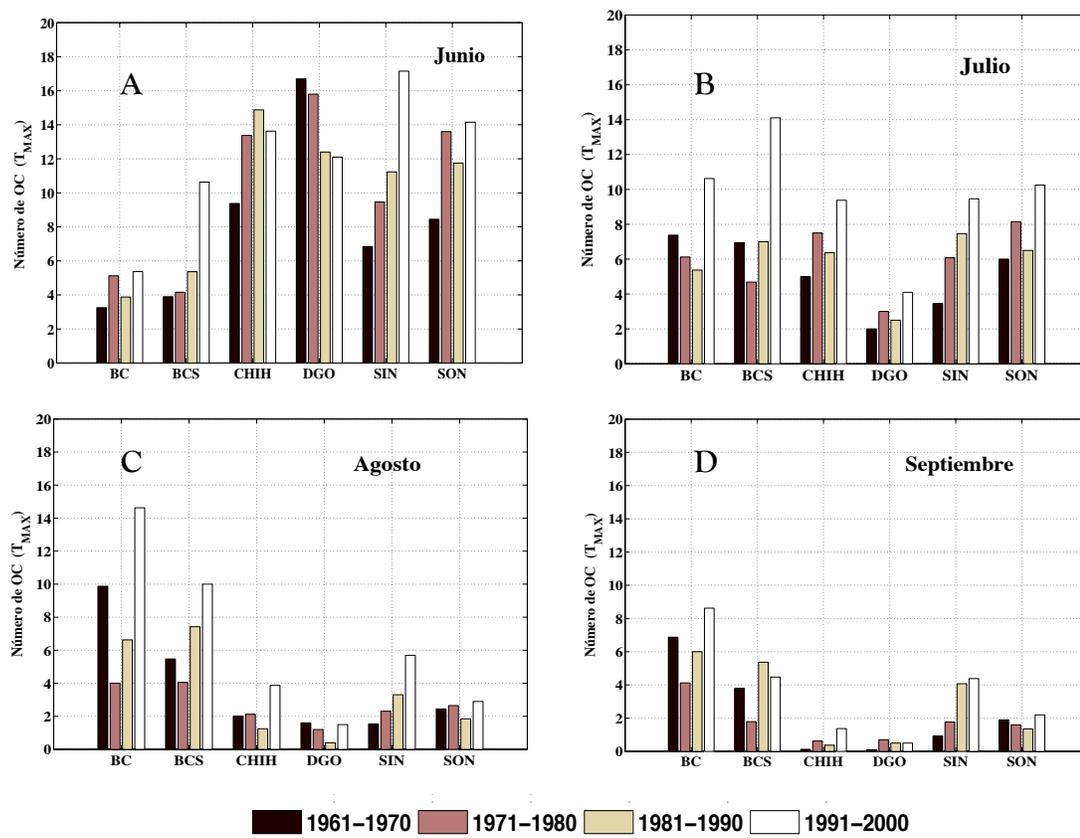


Figura 18. Número de OC diurnas por estado y década en los meses de verano.

El mayor número de OC diurnas por año en Baja California fue 11, en San Felipe durante 1961; en Baja California Sur 15, en la estación 3007 (Apéndice A) en 1988; en Chihuahua 10, en la estación 8062 (Apéndice A) en 1980, y en la estación 8202 (Apéndice A) en 1993; mientras que en Durango 10, en la estación 10021 (Apéndice A) en 1982; en Sinaloa 14, en la estación 25015 (Apéndice A) en 1994; y en Sonora 13 en la estación 26061 (Apéndice A) en 1977.

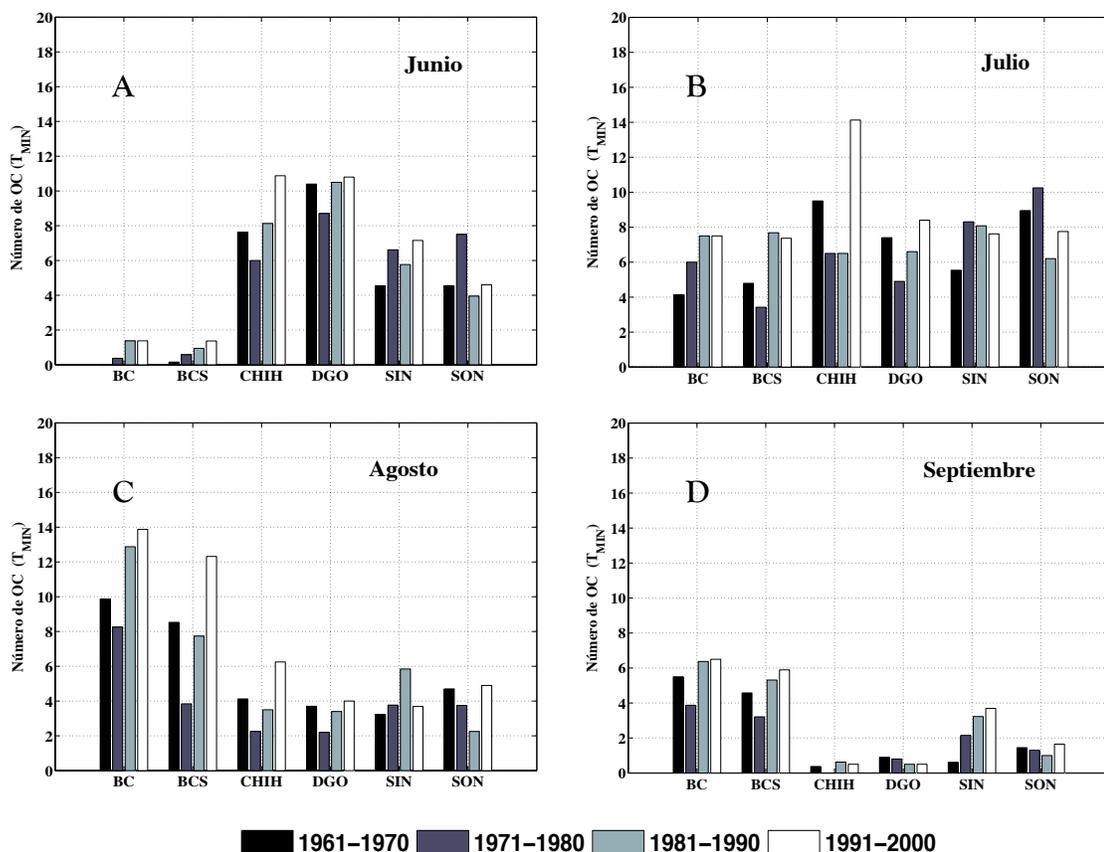


Figura 19. Número de OC nocturnas por estado y década en los meses de verano.

El mayor número de OC nocturnas por año en Baja California fue 12, en Santo Tomás durante 1984, y en San Felipe en 1995; en Baja California Sur 12, en la estación 3058 (Apéndice A) en 1997; en Chihuahua 13, en la estación 8044 (Apéndice A) en 1994; en Durango 15, en la estación 10002 (Apéndice A) en 1963; en Sinaloa 12, en la estación 25042 (Apéndice A) en 1974; y en Sonora 15 en la estación 26068 (Apéndice A) en 1962.

En general el mayor número de OC tiende a presentarse durante junio y julio, con excepción de algunas estaciones de la subregión barlovento en Baja California y del norte de Baja California Sur, que tienen más OC durante agosto. Así mismo en general hay más OC diurnas que nocturnas, aunque en agosto ocurren más OC nocturnas, y en septiembre el número de OC diurnas y nocturnas es comparable (Figuras 18 y 19).

En los meses próximos al verano extendido encontramos que durante abril y mayo Durango presenta el mayor número de OC diurnas, pero durante octubre esto ocurre en Baja California, Baja California Sur y Sinaloa (Figura 20).

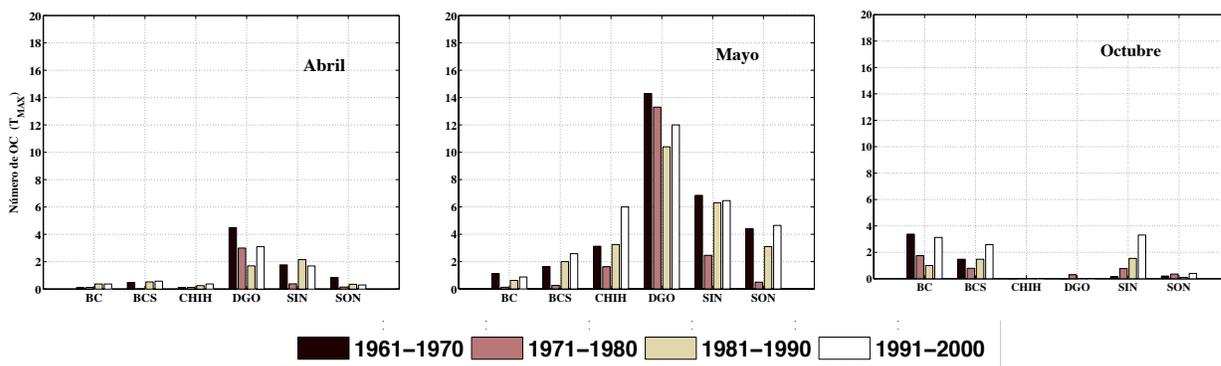


Figura 20. Número de OC diurnas por estado y década durante los meses de abril, mayo y octubre.

Se estimó la significancia de la tendencia del número de OC por lustro para cada estación. Los resultados se resumen en las Figuras 21 y 22. Las mayores tendencias de las OC diurnas se encontraron en Baja California Sur (Figura 21a) y la mayoría de las tendencias negativas se encuentran en el este de nuestra región de estudio (Figura 21b). Las tendencias positivas significativas tienen un rango entre 1.7 y 6.3 eventos por lustro, en las estaciones 26102 y 3074 respectivamente (Apéndice A). Las tendencias negativas significativas tienen un rango entre -2.5 eventos por lustro, en la estación 8062 (Apéndice A), a -1.1 eventos por lustro, en la estación 10022 (Apéndice A).

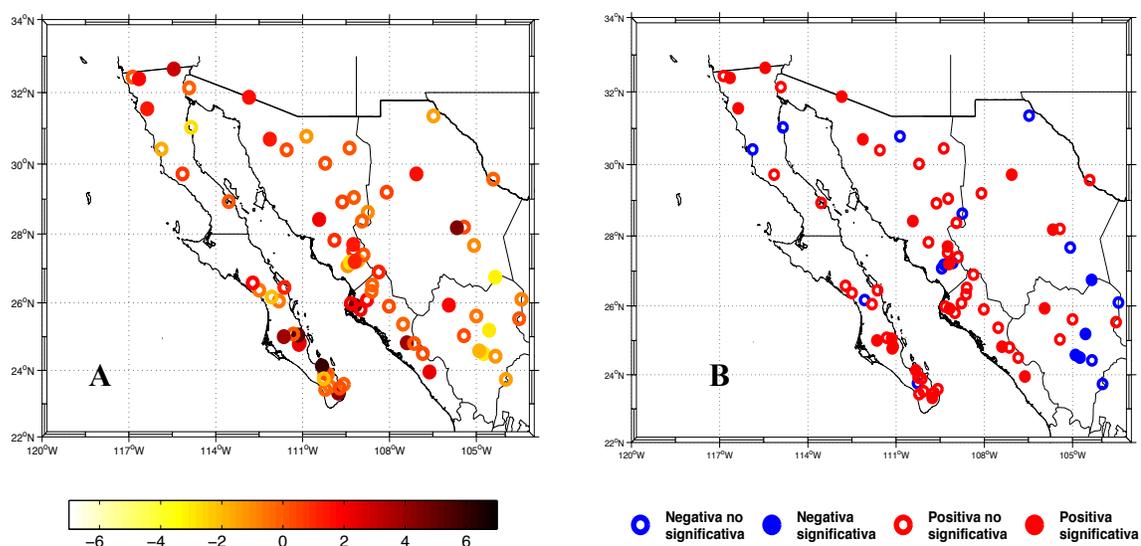


Figura 21. Tendencias del número de OC diurnas. (a) Magnitud (número de eventos por lustro), y (b) Significancia.

Las mayores tendencias de las OC nocturnas se encontraron en Baja California y Chihuahua (Figura 22a) y la mayoría de las tendencias negativas se encuentran al este del Golfo de California (Figura 22b). Las tendencias positivas significativas tienen un rango entre 1.1 a 5.1 eventos por lustro, en las estaciones 26055 y 3058 respectivamente (Apéndice A). Las tendencias negativas significativas van de -2.3 a -1.1 eventos por lustro, en la estación 8062 y 10022 (Apéndice A).

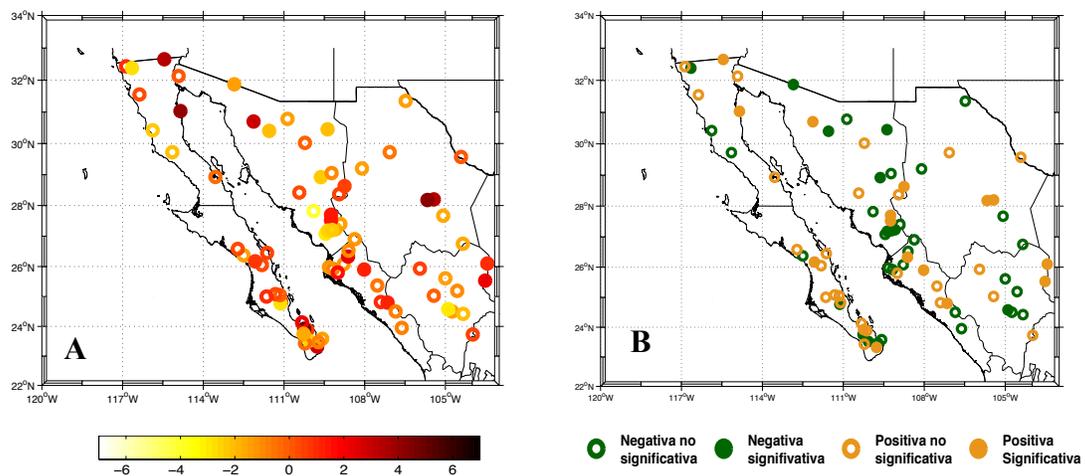


Figura 22. Tendencias del número de OC nocturnas. (a) Magnitud y (b) Significancia (número de eventos por lustro).

3.4.2 Duración de las ondas de calor

Similarmente se estimaron las tendencias de la duración de las OC con patrones parecidos a los encontrados para el número de eventos (Figuras 23 y 24).

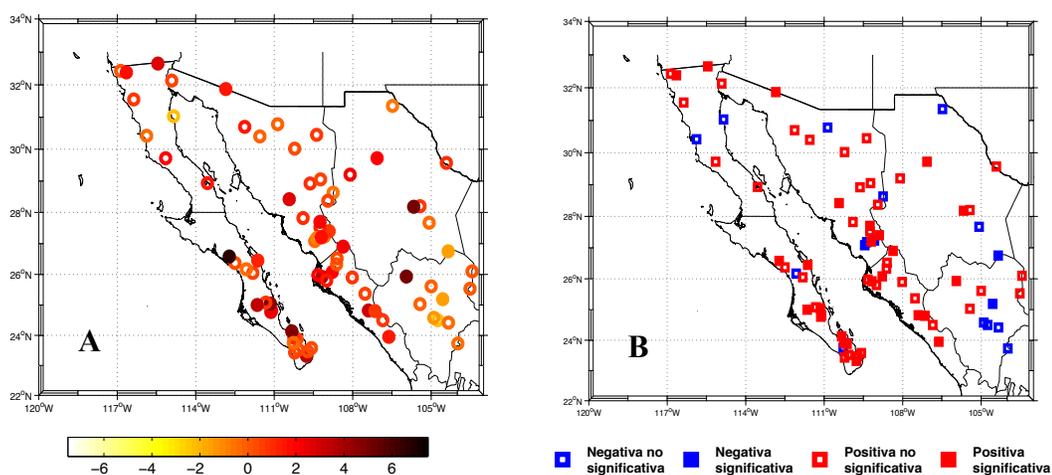


Figura 23. Tendencias de la duración de OC diurnas. (a) Magnitud (días) y (b) Significancia (duración en días por lustro).

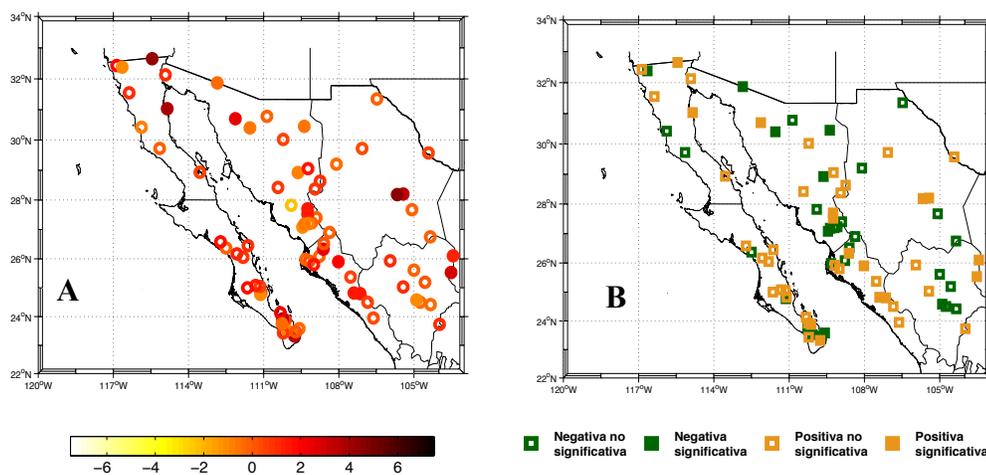


Figura 24. Tendencias de la duración de OC nocturnas. (a) Magnitud (días) y (b) Significancia (duración en días por lustro).

Las OC diurnas con mayor duración fueron:

- a. 45 días en Durango, en la estación 10029 en 1999.
- b. 38 días en Baja California Sur, en la estación 3055 en 2000.
- c. 30 días en Sonora, en la estación 26102 en 1961 y en la estación 26073 en 1996.
- d. 30 días en Chihuahua, en la estación 8097 en 1995.
- e. 28 días en Baja California, en la estación 2065 en 1962.
- f. 19 días en Sinaloa, en la estación 25015 en 1966.

Las OC nocturnas con mayor duración fueron:

- a. 63 días en Sonora, en la estación 26077 en 2000.
- b. 58 días en Baja California Sur, en la estación 3029 en 1985.
- c. 30 días en Chihuahua, en la estación 8031 en 1980 y en la estación 8202 en 1990.
- d. 20 días en Durango, en la estación 10022 en el año 1969 y estación 10027 en 1993.
- e. 18 días en Baja California, en la estación 2038 en 1984 y en la estación 2046 en 1994 y 1995.
- f. 18 días en Sinaloa, en la estación 25046 en 1992.

Se calculó el promedio de la duración de las OC (Figura 25 y Tabla 4). En general las OC diurnas son en promedio más duraderas que las OC nocturnas, con excepción de Baja California durante la década de 1980, Baja California Sur durante el lustro 1981-1985, y Durango durante el lustro 1991-1995 (Figura 25a, 25b y 25d).

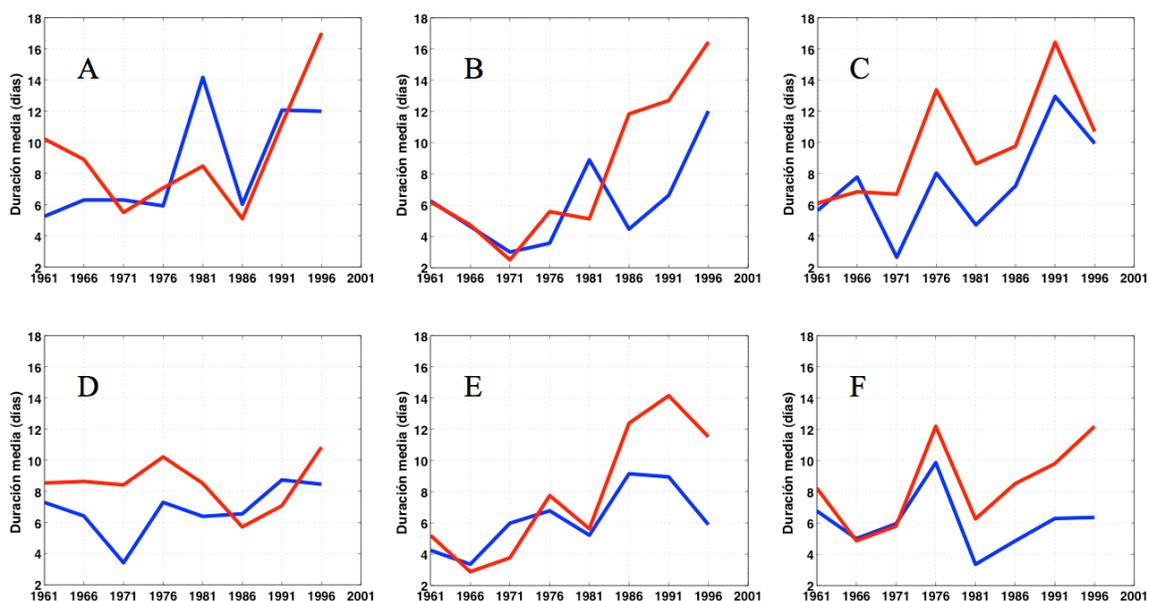


Figura 25. Duración promedio por lustro de las OC diurnas (en rojo) y de las OC nocturnas (en azul) (1961 identifica el lustro 1961-1965). a) Baja California, b) Baja California Sur, c) Chihuahua, d) Durango, e) Sinaloa y f) Sonora.

Tabla 4. Longitud media de las OC nocturnas (T_{MIN}) y diurnas (T_{MAX}) por periodos de cinco años en el Noroeste de México durante junio-septiembre de 1961-2000.

Periodos	BC		BCS		CHIH		DGO		SIN		SON	
	T_{MIN}	T_{MAX}										
1961-1965	5.3	10.3	6.3	6.2	5.6	6.1	7.3	8.5	4.3	5.2	6.8	8.3
1966-1970	6.3	8.9	4.6	4.7	7.8	6.9	6.4	8.6	3.4	2.9	5.0	4.9
1971-1975	6.3	5.5	2.9	2.5	2.6	6.8	3.4	8.4	6.0	3.8	6.0	5.8
1976-1980	5.9	7.1	3.6	5.6	8.0	13.4	7.3	10.2	6.9	7.8	9.9	12.2
1981-1985	14.2	8.5	8.9	5.1	4.7	8.6	6.4	8.5	5.2	5.6	3.4	6.3
1986-1990	6.0	5.1	4.5	11.8	7.2	9.9	6.6	5.7	9.2	12.4	4.9	8.5
1991-1995	12.1	11.2	6.6	12.7	13.0	16.5	8.7	7.1	9.0	14.2	6.3	9.8
1996-2000	12.0	17.0	12.0	16.5	9.9	10.7	8.5	10.9	5.9	11.5	6.4	12.2

3.4.3 Intensidad de las ondas de calor

Para el análisis de la intensidad de las OC nocturnas, definida en la ecuación (1), se calculó el promedio por estado (Figura 26) y las tendencias por lustros (Figura 27). El análisis sugiere que generalmente las OC se hicieron significativamente más intensas a partir de las década de 1980 en Baja California Sur (0.06 ± 0.03) y Chihuahua (0.11 ± 0.04).

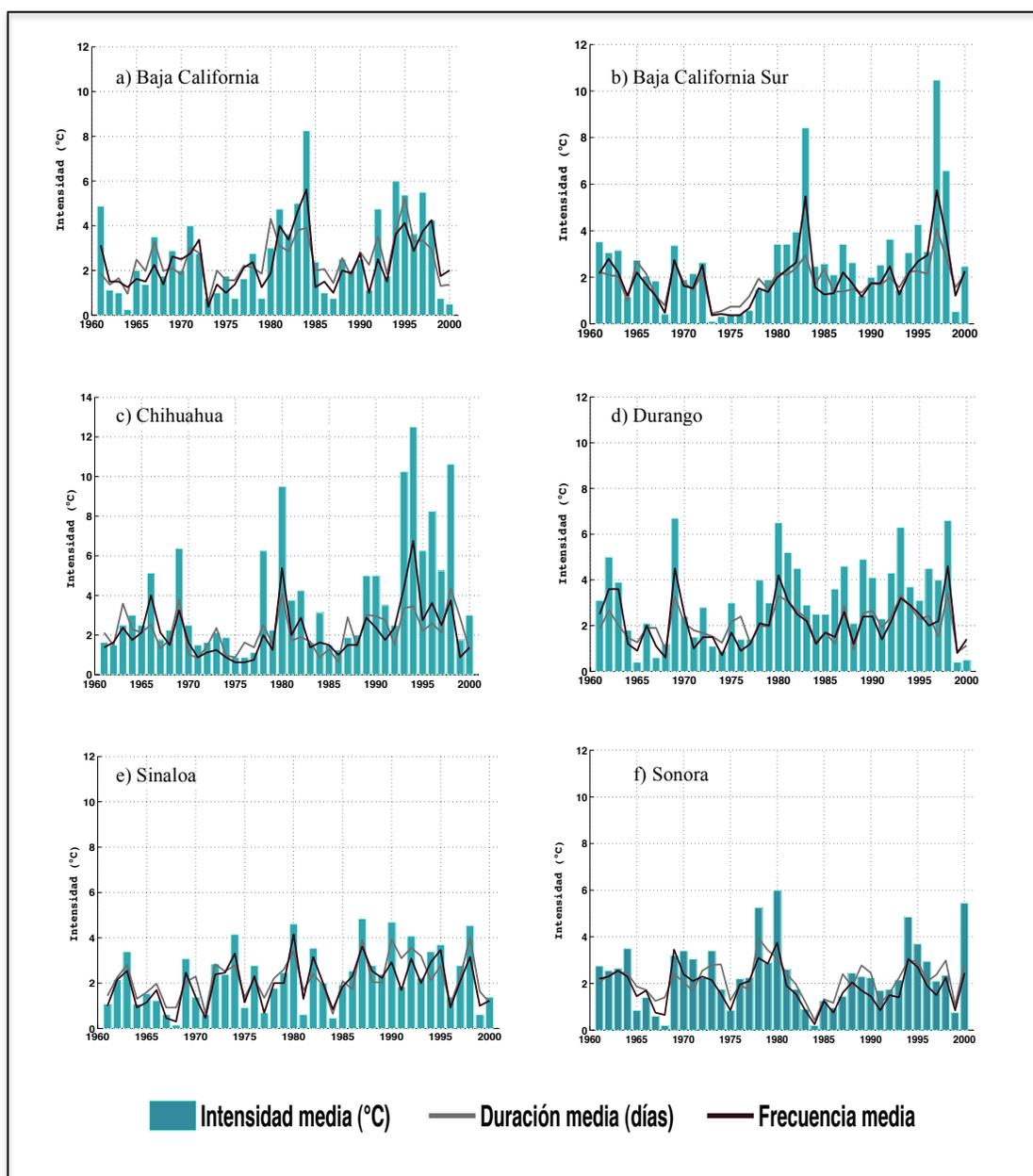


Figura 26. Comportamiento medio anual de la intensidad, la duración y el número de OC nocturnas durante junio-septiembre

Las estaciones con mayor tendencia a intensificar la temperatura ($^{\circ}\text{C} / \text{lustro}$) de las OC nocturnas fueron (Figura 27):

- i. Ciudad Delicias, Chihuahua (2.17 ± 0.66)
- ii. Presa Francisco I Madero, Chihuahua (2.02 ± 0.52)
- iii. Caduaño, Baja California Sur (1.98 ± 0.61)
- iv. Ciudad Lerdo, Durango (1.55 ± 0.35)
- v. San Felipe, Baja California (1.28 ± 0.22)

El rango de las intensidades medias significativas en la Figura 27, cubre de -0.41 a 2.17 ($^{\circ}\text{C} / \text{lustro}$) que corresponden al 28.2 % (22 estaciones).

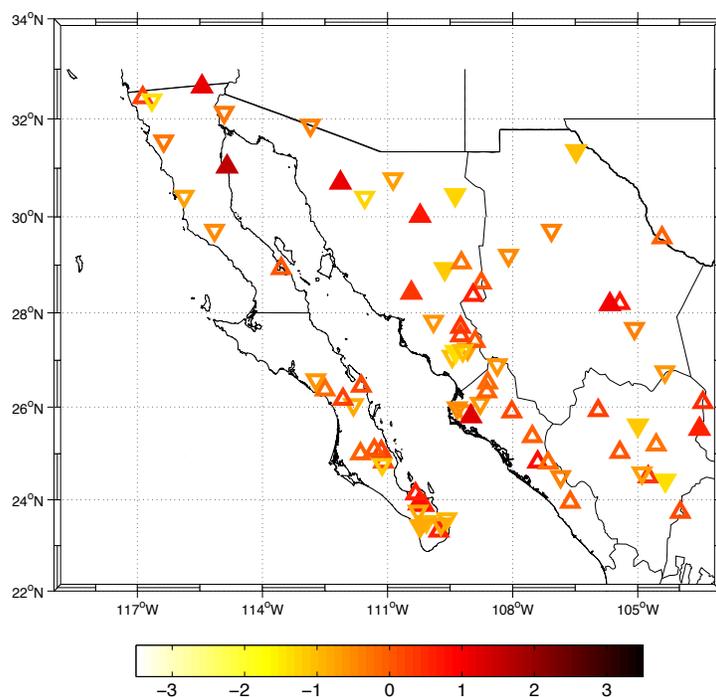


Figura 27. Tendencias de la intensidad media de OC nocturnas. (a) Significancia (b) Magnitud (duración en días por lustro).

De igual manera para el análisis de la intensidad de las OC diurnas, definida también en la ecuación (2), se calculó el promedio por estado (Figura 28) y las tendencias por lustros (Figura 29). Exceptuando a Durango, las tendencias fueron positivas variando de 0.06 a 0.13 (°C/año). La intensidad más alta pertenece a Baja California Sur. Acorde a lo anterior la frecuencia mantuvo significancia en las mismas entidades con valores menores de: 0.03 a 0.08 (OC/año).

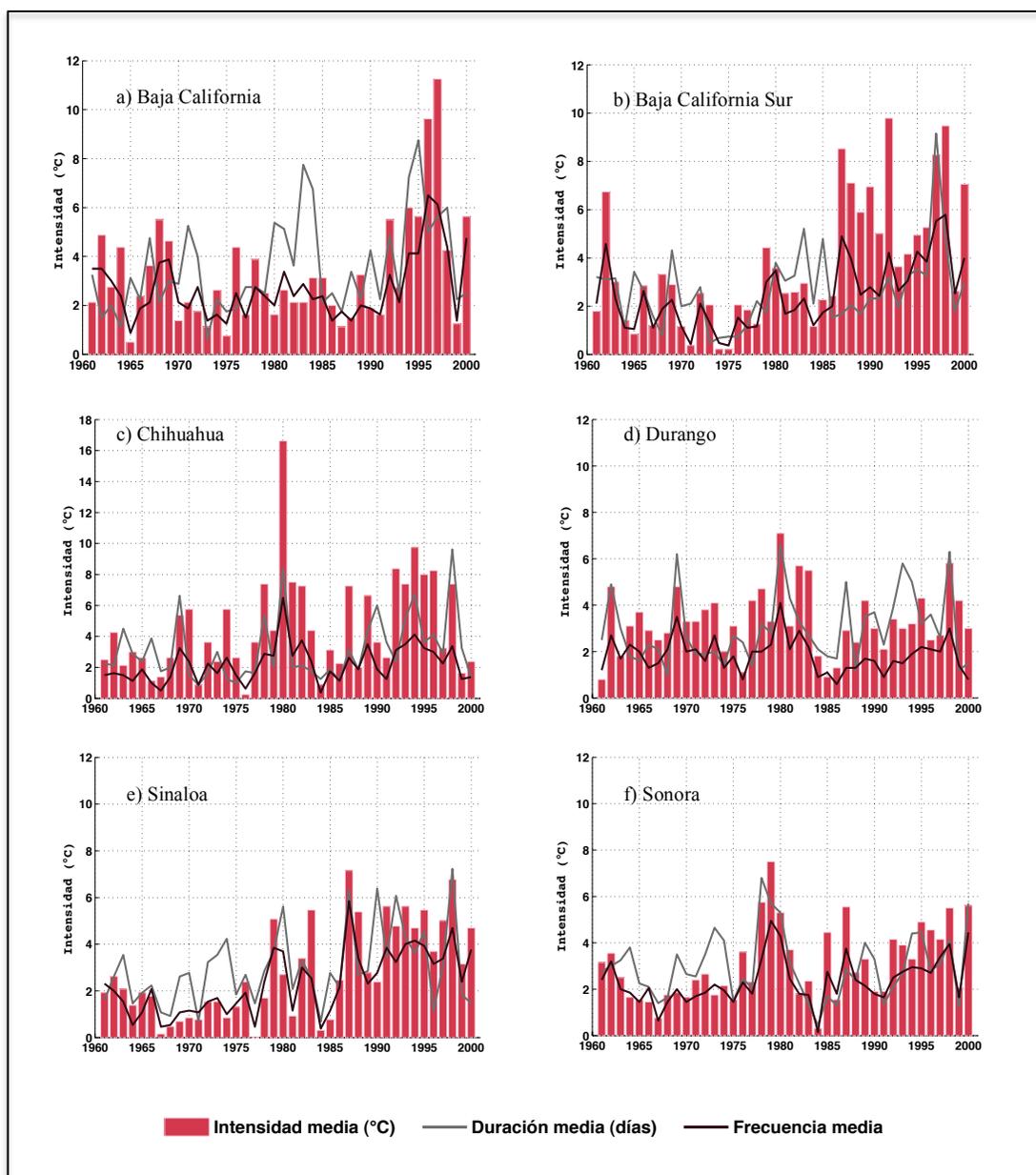


Figura 28. Comportamiento medio anual de la intensidad, la duración y el número de OC diurnas durante junio-septiembre.

Excluyendo a Chihuahua, Durango y Sonora (Figuras 28c, 28d, 28f) que presentaron intensidades altas alrededor de 1980 generalmente las OC diurnas intensificaron su temperatura a partir de las década de 1990 con tendencias positivas significativas en 30 de las 78 estaciones (38.5 %), principalmente en los estados ubicados alrededor del Golfo de California (Figura 29).

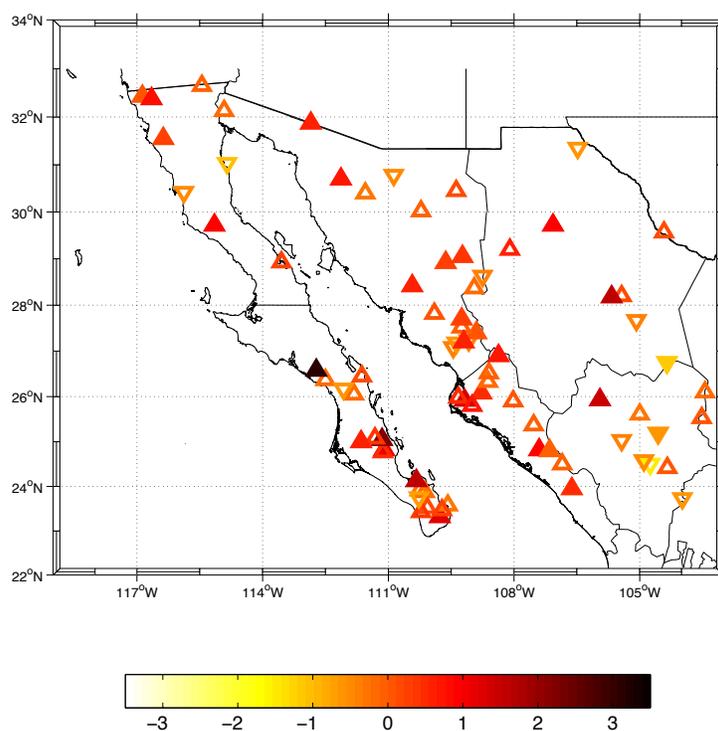


Figura 29. Tendencias de la intensidad de las OC diurnas ($^{\circ}\text{C} / \text{lustro}$). La barra de color indica la magnitud. Los triángulos llenos (vacíos) indican que la tendencia es significativa (no-significativa) y si es positiva (triángulo hacia arriba) o negativa (triángulo hacia abajo).

Particularmente en la intensidad de las OC diurnas, se distinguieron dos patrones. En el primero se observaron intensidades altas, $\sim 4^{\circ}\text{C} / \text{año}$, con duraciones cortas (2 o 3 días). En el segundo patrón las intensidades resultaron, $\sim 2^{\circ}\text{C} / \text{año}$, con duraciones más largas (≥ 4 o 5 días).

Las estaciones con mayor tendencia a intensificar la temperatura ($^{\circ}\text{C} / \text{lustro}$) de las OC diurnas fueron (Figura 29):

- i. San José De Gracia, Baja California Sur (3.0 ± 1.1).
- ii. La Angostura, Baja California Sur (2.2 ± 0.6).
- iii. La Paz, Baja California Sur (1.6 ± 0.5).
- iv. Guanacevi, Durango (1.6 ± 0.4).
- v. Ahome, Sinaloa (1.5 ± 0.3).
- vi. Caduaño, Baja California Sur (1.4 ± 0.7).

Consistente a lo anterior, tras el agrupamiento por décadas de las OC diurnas y nocturnas para cada uno de los meses de verano (Figura 30), junio resulto con las intensidades de temperaturas más altas. Los rangos en este mes son similares en la T_{MIN} y la T_{MAX} , no obstante, las tendencias negativas de las OC nocturnas son más significantes. Las regiones que presentan este comportamiento corresponden a estaciones en Durango, Sonora y Baja California Sur. En cambio, las regiones mayormente con tendencias positivas fueron Baja California Sur (en el centro y en el sur), Sonora, Chihuahua y Sinaloa.

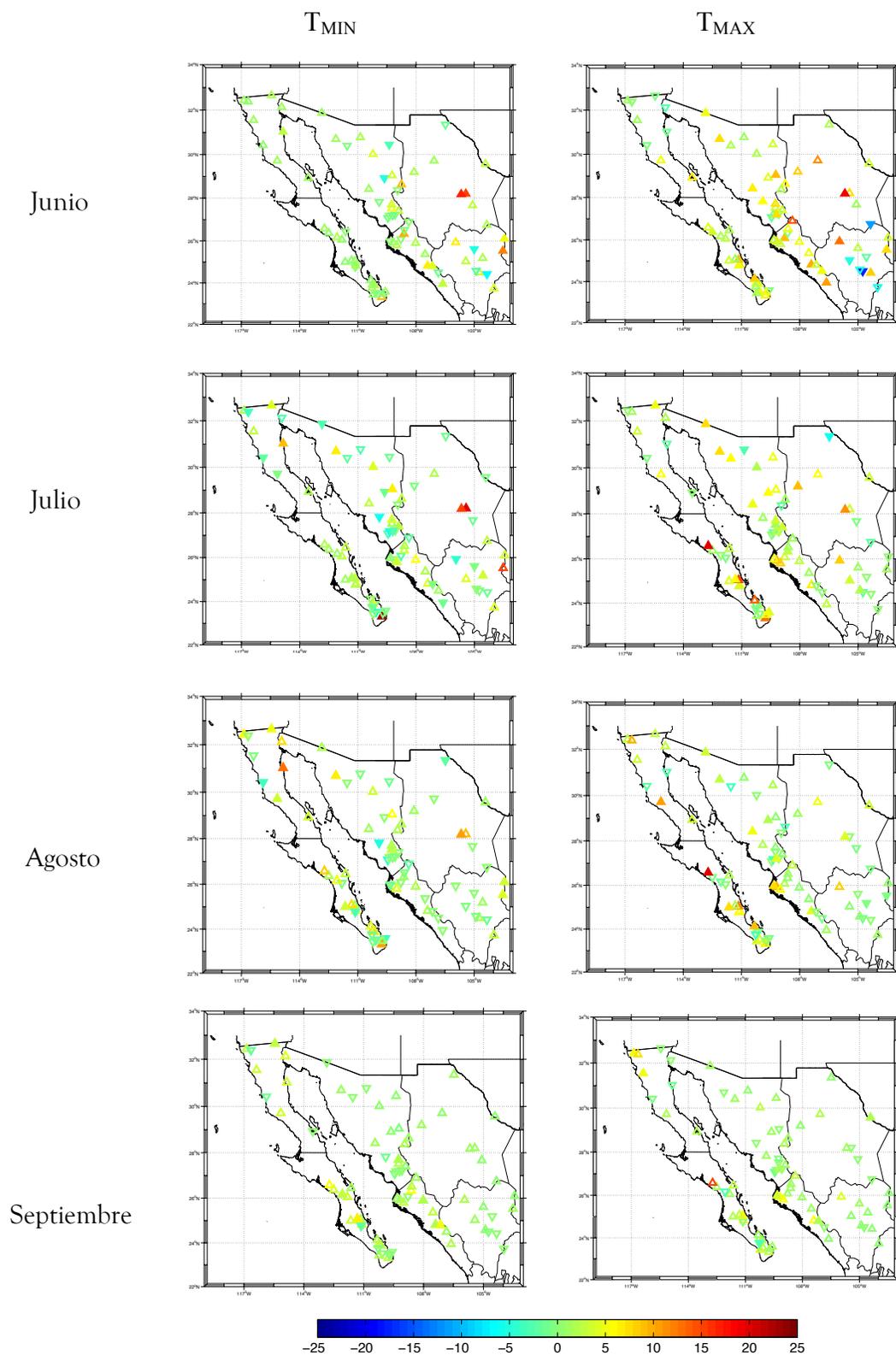


Figura 30. Tendencias de la intensidad ($^{\circ}\text{C} / \text{d}{\acute{e}}\text{cada}$) de las OC nocturnas (izquierda) y diurnas (derecha). La barra de color indica la magnitud. Los triángulos llenos (vacíos) indican que la tendencia es significativa (no-significativa) y si es positiva (triángulo hacia arriba) o negativa (triángulo hacia abajo).

4. Discusión

Los resultados obtenidos en esta tesis indican que las diferentes tendencias de las OC en el área de estudio son positivas, en especial las regiones que bordean el Golfo de California. En contraste para el extremo noroeste de Baja California las tendencias de las OC son negativas, parecido a lo que sucede en centro de Durango.

Fue difícil relacionar fenómenos de mesoescala asociados a las OC en este estudio. Sin embargo en los cuatro estados afectados por el monzón de Norteamérica las OC diurnas parecen coincidir con las temperaturas más altas antes del monzón en julio. Las OC diurnas son en junio y julio y las temperaturas más altas son durante julio y agosto. En Durango, el estado con relativamente menor influencia monzónica, las temperaturas más altas empiezan en mayo. Preliminarmente podemos decir que, como se han asociado las OC a la SST en Europa (Cassou *et al.*, 2005; Feudale y Shukla, 2007), algo similar sucede en el Noroeste de México, pero aún se requiere de más estudios para asegurar lo anterior.

Las tendencias del rango de temperaturas parecen estar asociadas más a las T_{MIN} que a las T_{MAX} . Asimismo las OC nocturnas algunas veces precedían a las OC diurnas, en general ambas OC no coinciden en su fecha de inicio. En los casos en que éstas coinciden, las OC diurnas son más duraderas que las OC nocturnas. Cabe desatacar también que en algunos casos durante una OC diurna larga se presentaron dos o más eventos de OC nocturna.

La naturaleza de nuestros datos no permitió utilizar para este estudio un percentil diferente al P90, a diferencia de Gershunov *et al.* (2009), quienes usaron satisfactoriamente P99. Por la misma razón se escogió un mínimo de dos días para definir una OC.

Conclusiones

Las ondas de calor tienen un patrón de tendencia positiva en el número de eventos por año, duración e intensidad en las zonas del norte de Baja California, el sur de Baja California Sur, sur de Sonora, y norte de Sinaloa. La T_{MAX} en Baja California alcanza los valores más altos en los meses de julio y agosto. La subregión de barlovento en Baja California se distingue del resto de Baja California por valores de T_{MAX} aproximadamente $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ menos. En Sonora, Chihuahua, Durango y Sinaloa los valores máximos de T_{MAX} se alcanzan en junio, siendo Durango donde se tienen las T_{MAX} más bajas.

El P90 identifica tanto para T_{MAX} como para T_{MIN} los umbrales más altos en el oeste de Sonora, norte de Sinaloa y sur de Baja California Sur (donde T_{MAX} oscila entre 29 y $44\text{ }^{\circ}\text{C}$ y T_{MIN} entre 12 y $29.5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Los umbrales en Durango son relativamente más bajos ($T_{MAX} = 30\text{-}39\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $T_{MIN} = 14\text{-}21\text{ }^{\circ}\text{C}$). De las anomalías de las diferencias mensuales de T_{MAX} y T_{MIN} en Baja California Sur y Sinaloa se observa que sus tendencias positivas están asociadas en Baja California Sur al incremento de las T_{MAX} y en Sinaloa al incremento de las T_{MIN} .

Referencias bibliográficas

- Alexander L., Zhang X., Peterson T., Caesar J., Gleason B., Klein T., Haylock M., Collins D., Trewin B., Rahimzadeh F., Tagipour A., Kumar R., Revadekar J., Griffiths G., Vincent L., Stephenson D., Burn J., Aguilar E., Brune M., Taylor M., New M., Zhai P., Rusticucci M., Vazquez J. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal Geophysical Research-Atmospheres* 111.
- Arriaga R. S. y Cavazos T. 2010. Regional trends of daily precipitation indices in northwest Mexico and southwest United States. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 115:1-10.
- Basu K. y Samet J. M. (2002). Relation between elevated ambient temperature and mortality: a review of the epidemiologic evidence. *Epidemiological Review*, 24:190-202.
- Beniston M. y Diaz H. (2004). The 2003 heat wave as an example of summers in a greenhouse climate? Observations and climate model simulations for Basel, Switzerland. *Global and Planetary Change*, 44:73-81.
- Beniston M. (2004). The 2003 heat wave in Europe: A shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations. *Geophysical Research Letters*, 31:2022-2026.
- Cardós C., Barrera E. y Sanz R. (2007). Un estudio sobre episodios de temperaturas extremas en Canarias. Centro Meteorológico Territorial en Canarias Occidental. *Calendario Meteorológico 2007*.
- Cassou C., Terray L. y Phillips A. S. (2005). Tropical Atlantic influence on European heat waves. *Journal of Climate*, 18:2805-2811.
- Cavazos T. y Arriaga R. S. (2012). Downscaled climate change scenarios for Baja California and the North American monsoon. *Journal Climate*, 25:5904-5915.
- Cavazos T. (2008). Capítulo 3: Clima. En "Bahía de Los Ángeles: recursos naturales y comunidad". Línea base 2007. Gustavo D. Danemann y Exequiel Ezcurra (eds.). *Pronatura Noroeste*, A. C., *Semarnat*, *INE* y *San Diego Natural History Museum*. Mexico, ISBN: 978-968-817-891-1
- Cavazos T., Turrent C. y Lettenmaier D. (2008). Extreme precipitation trends associated with tropical cyclones in the core of the North American monsoon. *Geophysical Research Letters*, 35(L21703): 1-5.
- Conte M. and Colacino M. (1995). Heat waves in the central Mediterranean. A Synoptic climatology. *Il Nuovo Cimento*, 18 C:295-304.

- Easterling D., Meehl G., Parmesan C., Changnon S., Karl T. y Mearns L. (2000). Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, 289: 2068-2074.
- Farfán L., Alfaro E. y Cavazos T. (2013). Characteristics of tropical cyclones making landfall on the Pacific coast of Mexico: 1970-2010. *Atmosphere*, 26(2):163-182.
- Feudale L. y Shukla J. (2007). Role of Mediterranean SST in enhancing the European heat wave of summer 2003. *Geophysical Research Letters*, 34:1-4.
- García C. R., Tejeda A. y Jáuregui E. (2010). Heat waves and heat days in an arid city in the northwest of México: current trends and in climate change scenarios. *International Journal of Biometeorology*, 54(4): 335-345.
- García C. R., Cavazos T., De Grau P. y Santillán N. (2013). Analysis and modeling of extreme temperatures in several cities in northwestern Mexico under climate change conditions. *Theoretical and Applied Climatology*, In press, ISSN: 0177-798X
- Gershunov A., Cayan D. y Iacobellis S. (2009). The great 2006 heat wave over California and Nevada: Signal of an increasing trend. *Journal Climate*, 22 (23): 6181-6203.
- INEGI (2013). <http://cuentame.inegi.gob.mx/>
- IPCC, (2001). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 1032 p.
- IPCC, (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, IPCC, Ginebra, Suiza, 104 p.
- Jáuregui E. (2009). The heat spells of Mexico City. *Investigaciones Geográficas*, 70:71-76.
- Karl T. y Knight R. (1997). The 1995 Chicago heat wave: how likely is a recurrence? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78: 1107-1119.
- Karl T., Meehl G., Peterson T., Kunkel K., Gutowski W. y Easterling Jr. D. (2008). Executive Summary in *Weather and Climate Extremes in a Changing Climate. Regions of Focus: North America, Hawaii, Caribbean, and U.S. Pacific Islands*. T.R. Karl, G.A. Meehl, C.D. Miller, S.J. Hassol, A.M. Waple, and W.L. Murray (eds.). *A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research*, Washington, DC.
- Meehl G. y Tebaldi C. (2004). More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 305(5686): 994-997.

- Pavia E., Graef F. y Reyes J. (2009). Annual and seasonal surface air temperature trends in Mexico. *International Journal of Climatology*, 29(9): 1324-1329.
- Robinson P. (2001). On the definition of a heat wave. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 40:762-775.
- Seager R., Ting M., Held I., Kushnir Y., Lu J., Vecchi G., Huang H., Harnik N., Leetmaa A., Lau N., Li C., Velez J. y Naik N. (2007). Model Projections of an Imminent Transition to a More Arid Climate in Southwestern North America. *Science*, 316: 1181-1184.
- Seneviratne S. I., Nicholls N., Easterling D., Goodess C. M., Kanae S., Kossin J., Luo Y., Marengo J., McInnes K., Rahimi M., Reichstein M., Sorteberg A., Vera C., Zhang X. (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [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.)]. *A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, 109-230 p.
- De Bono A., Giuliani G., Kluser S., Peduzzi P. (2004). Impacts of summer 2003 heat wave in Europe. *Environment Alert Bulletin*. United Nations Environment Programme.
- Vazquez A. J., Brunet M. y Jones P. (2008). Cambios observados en los extremos de temperatura y precipitación en el estado de Veracruz, México, a partir de datos diarios. *Cambio Climático Regional y sus Impactos*. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología, Tarragona, España. ISBN 978-84-612-6051-5.
- Westerling A., Hidalgo H., Cayan D. y Swetnam T. (2006). Warming and Earlier Spring Increases Western US Forest Wildfire Activity. *Science*, 313: 940-943.
- Zhang X., Alexander L., Hergerl G. C., Jones P., Tank A. K., Peterso T. C., Trewin B. y Zwiers F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data, *WIREs Climate Change*, 2: 851-870.

Apéndice A

En el análisis de la evolución de la temperaturas máximas y mínimas diarias de verano dentro del periodo 1961 al 2000 al identificar las ondas de calor, se utilizó 78 estaciones tomadas del Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático en Baja California (PEACC-BC) disponible en <http://peac-bc.cicese.mx/>. El PEACC-BC tiene como propósito evaluar el estado actual de los efectos del cambio climático en el estado de Baja California. Esta base de datos se basa en el programa ERIC III que contiene información del banco de datos históricos nacionales del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Ubicación de las estaciones climatológicas y los observatorios meteorológicos.

No.	Edo.	Clave	Estación	Latitud	Longitud	Altitud (m)
1.	B.C.	2002	Bahía de Los Ángeles, Ensenada	28.9445	-113.5568	3
2.	B.C.	2033	Mexicali, Mexicali	32.650	-115.450	45
3.	B.C.	2038	Presa Rodríguez, Tijuana	32.433	-116.867	140
4.	B.C.	2046	San Felipe, Mexicali	31.033	-114.850	12
5.	B.C.	2058	Santa Catarina Sur, Ensenada	29.7219	-115.1314	30
6.	B.C.	2063	Santa María del Mar	30.417	-115.883	28
7.	B.C.	2065	Santo Tomas, Ensenada	31.5519	-116.4069	160
8.	B.C.	2069	Valle de Las Palmas, Tecate	32.3700	-116.6202	279
9.	B.C.S	3006	Cadege, Comondu	26.367	-112.5	60
10.	B.C.S	3007	Caduaño, Santiago	23.3327	-109.7800	206
11.	B.C.S	3008	Comondu, Comondu	26.050	-111.817	260
12.	B.C.S	3009	El Aguajito, La Paz	24.817	-111.100	200
13.	B.C.S	3012	El Paso de Iruti, La Paz	24.7800	-111.1497	135
14.	B.C.S	3016	El Rosarito, Loreto	26.450	-111.633	122
15.	B.C.S	3022	La Angostura, La Paz	25.050	-111.150	280
16.	B.C.S	3029	La Purísima, Comondu	26.167	-112.067	95

(Continuación)

No.	Edo.	Clave	Estación	Latitud	Longitud	Altitud (m)
17.	B.C.S	3030	La Ribera, Los Cabos	23.5934	-109.5911	14
18.	B.C.S	3036	Los Divisaderos, La Paz	23.8928	-110.1424	502
19.	B.C.S	3055	San José De Gracia	26.583	-112.717	165
20.	B.C.S	3058	San Pedro, La Paz	23.9270	-110.2656	160
21.	B.C.S	3060	Santa Gertrudis, La Paz	23.5347	-110.0730	489
22.	B.C.S	3062	Santiago, Los Cabos	23.4903	-109.7136	105
23.	B.C.S	3065	Tepentu, Comondu	25.0919	-111.3271	163
24.	B.C.S	3066	Todos Santos, La Paz	23.4787	-110.2106	75
25.	B.C.S	3068	V. Constitución a km.211	25.0098	-111.6635	47
26.	B.C.S	3074	La Paz, La Paz	24.133	-110.333	16
27.	B.C.S	3077	El Carrizal, La Paz	23.7533	-110.2683	229
28.	CHIH	8025	Camargo, Camargo	27.667	-105.083	1250
29.	CHIH	8031	Ojinaga, Ojinaga (SMN)	29.567	-104.417	841
30.	CHIH	8044	Ciudad Delicias (DGE)	28.200	-105.433	1165
31.	CHIH	8062	Escalón, Jiménez (DGE)	26.750	-104.350	1263
32.	CHIH	8091	La Trasmilla, Chihuahua	29.717	-107.067	1630
33.	CHIH	8097	Madera, Madera	29.200	-108.100	2092
34.	CHIH	8121	Samalayuca, Juárez	31.350	-106.483	1275
35.	CHIH	8202	Presa Francisco I Madero	28.183	-105.667	1220
36.	DGO	10002	Canatlán, Canatlán (SMN)	24.500	-104.750	1950
37.	DGO	10009	Ciudad Lerdo, Lerdo (SMN)	25.533	-103.517	1135
38.	DGO	10021	El Palmito II, Inde	25.614	-105.004	1600
39.	DGO	10022	El Pino, Canatlán	24.583	-104.900	2004
40.	DGO	10027	Francisco I. Madero (SMN)	24.416	-104.341	1961
41.	DGO	10029	Guanacevi, Guanacevi (SMN)	25.933	-105.952	2300
42.	DGO	10085	Tlahualillo, Tlahualillo	26.101	-103.441	1100
43.	DGO	10088	Vicente Guerrero, V. Gro.	23.733	-103.983	1913
44.	DGO	10098	Rodeo, Rodeo (DGE)	25.186	-104.563	1450
45.	DGO	10100	Santiago Papasquiaro	25.033	-105.433	1716
46.	SIN	25003	Ahome, Ahome	25.917	-109.183	80
47.	SIN	25009	Boca-Toma Sufragio (DGE)	26.083	-108.783	152
48.	SIN	25015	Culiacán, Culiacán	24.817	-107.400	40

(Continuación)

No.	Edo.	Clave	Estación	Latitud	Longitud	Altitud (m)
49.	SIN	25023	El Fuerte, El Fuerte	26.333	-108.617	84
50.	SIN	25025	El Mahome, El Fuerte	26.517	-108.600	12
51.	SIN	25042	Higuera de Zaragoza	25.983	-109.333	9
52.	SIN	25044	Huites, Choix	26.900	-108.367	168
53.	SIN	25045	Ixpalino, San Ignacio	23.950	-106.617	300
54.	SIN	25046	Jaina, Sinaloa (DGE)	25.900	-108.017	200
55.	SIN	25081	Sanalona, Culiacan	24.800	-107.150	0
56.	SIN	25087	Santa Cruz de Ayala, Cosala	24.500	-106.850	2050
57.	SIN	25110	Badiraguato (DGE)	25.367	-107.533	230
58.	SIN	25116	Los Mochis, Ahome	25.800	-109.000	14
59.	SON	26008	Banamichi, Banamichi	30.017	-110.217	640
60.	SON	26024	P.A. Ruiz C. (CORTINA)	27.233	-109.083	144
61.	SON	26045	Imuris, Imuris (SMN)	30.783	-110.867	826
62.	SON	26048	La Estrella, Sollapa	28.917	-109.633	240
63.	SON	26050	Las Panelas, Álamos	27.400	-108.900	185
64.	SON	26055	Mulatos, Sahuaripa (SMN)	28.633	-108.750	1165
65.	SON	26061	Navojoa, Navojoa (DGE)	27.083	-109.450	780
66.	SON	26068	Presa Álvaro Obregón, A. Oviachic	27.817	-109.900	70
67.	SON	26069	Presa La Angostura (SMN)	30.450	-109.383	965
68.	SON	26073	Punta de Agua, Guaymas	28.417	-110.433	214
69.	SON	26075	Quiriego, Quiriego	27.517	-109.250	251
70.	SON	26076	Riito, S.L. Rio Colorado	32.133	-114.917	4
71.	SON	26077	Sahuaripa, Sahuaripa (SMN)	29.050	-109.233	460
72.	SON	26093	Pitiquito, Pitiquito (DGE)	30.700	-112.133	286
73.	SON	26096	Sonoyta, Puerto Peñasco	31.867	-112.850	389
74.	SON	26098	Tesia, Navojoa (DGE)	27.183	-109.367	47
75.	SON	26099	Tesocoma, Quiriego (DGE)	27.700	-109.250	260
76.	SON	26102	Tres Hermanos, Navojoa	27.200	-109.200	85
77.	SON	26103	Trincheras, Trincheras	30.400	-111.550	505
78.	SON	26109	Yecora, Yecora (SMN)	28.367	-108.950	1500