

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por la SECIHTI (Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación).

Todo el material contenido en esta tesis está 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 o titular de los Derechos de Autor.

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Oceanografía Física**

**Patrones sinópticos y caracterización de olas de calor en el
norte de México y sur de Estados Unidos**

Tesis
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Constanza Zúñiga Villarreal

Ensenada, Baja California, México
2025

Tesis defendida por

Constanza Zúñiga Villarreal

y aprobada por el siguiente Comité



Dra. María Tereza Cavazos Pérez
Directora de tesis

Dr. Cuauhtémoc Turrent Thompson

Dra. Ivonne Mariela García Martínez

Dr. Horacio Jesús de la Cueva Salcedo



Dra. María Tereza Cavazos Pérez
Coordinadora del Posgrado en Oceanografía Física

Dra. Ana Denise Re Araujo
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Constanza Zúñiga Villarreal** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestra en Ciencias en Oceanografía Física.

Patrones sinópticos y caracterización de olas de calor en el norte de México y sur de Estados Unidos

Resumen aprobado por:

Dra. María Tereza Cavazos Pérez
Directora de tesis

Las olas de calor (OC), periodos prolongados de temperaturas excepcionalmente altas (≥ 3 días), impactan la salud y bienestar humano. Este estudio analiza las características y mecanismos dinámicos de tres tipos de OC—diurnas, nocturnas y húmedas—entre 1981 y 2010. Utilizando datos diarios de temperatura (Daymet, Livneh, ERA5-Land) se calcularon intensidad, frecuencia y duración anual promedio de OC sobre el percentil 95. Las tres bases mostraron acuerdo espacial en las métricas. Se examinaron patrones sinópticos de OC que cubrieron $\geq 30\%$ del dominio en verano extendido (abril-septiembre) mediante compuestos y anomalías de variables atmosféricas de ERA5: temperatura a 2m (T2m), espesor troposférico (Th 850-500 hPa), humedad específica (q850), radiación de onda larga saliente (OLR), vientos a 850 y 500 hPa, y advección de humedad a 850 hPa. Las OC diurnas fueron las más frecuentes, destacando en la región del noroeste de México. Sus temperaturas máximas medias variaron entre 40-45°C. Las OC nocturnas, las más intensas, predominaron en el altiplano mexicano y cerca del Golfo de México, con temperaturas mínimas elevadas. Las temperaturas mínimas durante las OC nocturnas oscilaron entre 30-35°C. Las OC diurnas y nocturnas compartieron algunas características en común. Ambas se asociaron con anticiclones subtropicales más intensos (Atlántico y Pacífico Norte) y un anticiclón a 500 hPa sobre la frontera México-Estados Unidos. Estas configuraciones favorecieron el aumento de Th y T2m, la reducción de humedad y la mayor emisión de OLR. A 850 hPa, las OC diurnas mostraron vientos alisios débiles sobre el Golfo de México., mientras que en las OC nocturnas se presentó un Jet del Caribe intenso y vientos del sur sobre el Golfo de México, desviando humedad hacia el sur de Estados Unidos. Finalmente, las OC húmedas fueron más comunes en el noroeste desértico, asociadas a mayor q850, contrario a lo esperado. Estas mostraron un anticiclón continental abierto y elongado, con una configuración zonal que permitió mayor entrada de humedad a México. La humedad y su advección variaron espacialmente según el tipo de OC, influyendo en su distribución e intensidad. Estos hallazgos contribuyen a comprender mejor los mecanismos detrás de las OC.

Palabras clave: Ondas de calor, intensidad, frecuencia, cambio climático, dinámica atmosférica, norte de México, sur de Estados Unidos.

Abstract of the thesis presented by **Constanza Zúñiga Villarreal** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Physical Oceanography

Synoptic patterns and characterization of heat waves in northern Mexico and the southern United States

Abstract approved by:

Dra. María Tereza Cavazos Pérez
Thesis Director

Heat waves (HW), prolonged periods of exceptionally high temperatures (≥ 3 days), impact human health and well-being. This study analyzes the characteristics and dynamic mechanisms of three types of HW—diurnal, nocturnal, and humid—between 1981 and 2010. Using daily temperature data (Daymet, Livneh, ERA5-Land), we calculated the intensity, frequency, and annual average duration of HW above the 95th percentile. The three datasets showed spatial agreement in the metrics. We examined synoptic HW patterns that covered $\geq 30\%$ of the domain during the extended summer (April–September) using composites and anomalies of atmospheric variables from ERA5: 2m temperature (T2m), tropospheric thickness (Th 850-500 hPa), specific humidity (q850), outgoing longwave radiation (OLR), winds at 850 and 500 hPa, and moisture advection at 850 hPa. Diurnal HW were the most frequent, standing out in northwestern Mexico. Their mean maximum temperatures ranged between 40–45°C. Nocturnal HW, the most intense, predominated in the Mexican Plateau and near the Gulf of Mexico, with elevated minimum temperatures. The minimum temperatures during nocturnal HW ranged between 30–35°C. Diurnal and nocturnal HW shared some common characteristics. Both were associated with more intense subtropical anticyclones (Atlantic and North Pacific) and an anticyclone at 500 hPa over the Mexico–United States border. These configurations favored an increase in Th and T2m, reduced humidity, and higher OLR emissions. At 850 hPa, diurnal HW exhibited weak trade winds over the Gulf of Mexico, whereas nocturnal HW featured a strong Caribbean jet and southerly winds over the Gulf of Mexico, redirecting moisture toward the southern United States. Finally, humid HW were more common in the desert northwest, associated with higher q850, contrary to expectations. These events exhibited an open and elongated continental anticyclone, with a zonal configuration that allowed greater moisture inflow into Mexico. Moisture levels and their advection varied spatially depending on the HW type, influencing their distribution and intensity. These findings contribute to a better understanding of the mechanisms behind HW.

Keywords: Heat waves, intensity, frequency, climate change, atmospheric dynamics, northern Mexico, southern United States.

Dedicatoria

A mis sobrinos:

Matías, Jacobo, Julián, Camila y los que están por venir.

Si este trabajo me robó tiempo y atención para estar con ustedes, fue con la esperanza de aportar – aunque sea un poco – a dejarles un mundo más preparado y resiliente frente a los cambios que ya están transformando nuestro planeta.

Agradecimientos

Agradezco al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por el apoyo y espacio para aprender.

A mis papás: Víctor Zúñiga y Patricia Villarreal, por ser mi soporte, creer en mí, motivarme a seguir mis sueños y quedarse atentos a ver cómo los voy cumpliendo. Los quiero con toda mi alma.

A mi directora de tesis, la Dra. María Tereza Cavazos Pérez, por guiarme con la experiencia a través de su campo y darme el espacio de formarme a su lado. Por la atención, la confianza y la paciencia.

A mis sinodales: el Dr. Cuauhtémoc Turrent Thompson, por sus valiosas aportaciones y preguntas, siempre tan enriquecedoras; a la Dra. Ivonne Mariela García Martínez, por su amabilidad y constante disposición colaborativa; y al Dr. Horacio Jesús de la Cueva Salcedo, por su atención al detalle durante todo el proceso de mi tesis.

A mis hermanos: Aurelio, Nicolás y Clara. Por ser mis ejemplos a seguir, por recibirme con tanto cariño e inspirarme a ser la mejor versión de mí. Y a la familia Hernández-Shadduck, por apoyar de manera tan presente en esta etapa de mi vida.

A mis amigos que han representado para mí una red de apoyo indispensable para todos y cada uno de mis logros. A Sofía, por compartir mi neurona y hacer mi vida más bonita. A Grethel, Lucía, Miyaki, Francisco, Miriel, Ernesto y Esteban, por hacer que la maestría se sienta como un segundo hogar. A Mariel, Montse, Yibel, Erika y Megan, por ser mi lugar seguro siempre. A Memo, Luis Mario, César, Rojas, Axel, Luisa y Juan, que, desde la licenciatura, nuestra conexión y apoyo mutuo han sido un constante en mi vida. A Ashida, por la ayuda, las buenas pláticas y la motivación para enfrentar los retos de este sendero. También al gimnasio del CICESE, mi grupo de bachata en Rhyponic DC y los Pelícanos Viajeros por ser la base que sostiene mi estabilidad emocional.

Gracias, Ensenada, por ser tierra fértil donde echar raíces.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas	x
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes	2
1.1.1 Definición de ola de calor.....	2
1.1.2 Mecanismos asociados a las olas de calor	4
1.1.3 Las olas de calor en México.....	5
1.2 Justificación	6
1.3 Objetivos	7
1.3.1 Objetivo general.....	7
1.3.2 Objetivos específicos.....	7
Capítulo 2. Datos y Metodología	8
2.1 Datos	8
2.1.1 Bases de datos en superficie	8
2.1.2 Datos atmosféricos en niveles verticales	10
2.2 Metodología	11
2.2.1 Definición de ola de calor e índices.....	11
2.2.2 Circulación sinóptica durante olas de calor	12
2.3 Zona de estudio.....	13
Capítulo 3. Resultados	16
3.1 Características de las olas de calor a escala anual	16
3.1.1 Olas de calor diurnas y nocturnas	16
3.1.2 Olas de calor Húmedas.....	19
3.1.3 Comparación regional	20
3.1.4 Olas de calor sinópticas del verano extendido.....	23

3.2	Patrones sinópticos	27
3.2.1	Olas de calor diurnas	27
3.2.2	Olas de calor nocturnas.....	30
3.2.3	Olas de calor húmedas	33
3.2.4	Síntesis.....	36
Capítulo 4.	Discusión.....	38
Capítulo 5.	Conclusión.....	43
Literatura citada		44
Anexos		51

Lista de figuras

Figura	Página
1. Altitud y regiones de estudio en el recuadro blanco (norte de México y regiones climáticas fronterizas). Las regiones incluidas son: el sur de California y el noroeste de Baja California (CAs), el desierto de Sonora (DES), Arizona/Nuevo México (ANM), Texas (TEX), el extremo sur de la península de Baja California (SBC), el núcleo del monzón norteamericano (MNZ), el altiplano (HPL) y el noreste de México (NEM). Datos topográficos de la NOAA (Amante y Eakins, 2009).	13
2. Climatología anual del percentil 95 (P95) de la temperatura máxima diaria (Tmax, paneles superiores) y temperatura mínima diaria (Tmin, paneles inferiores) en la región de estudio para el periodo 1981-2010 de las tres bases de datos: Livneh, Daymet y ERA5-Land (columnas).....	14
3. Climatología anual de P95 de la temperatura de bulbo húmeda (Tw) en la región de estudio para el periodo 1981-2010 calculado con ERA5-Land.	15
4. Frecuencia promedio de eventos de olas de calor (OC) por año en cada punto de malla durante OC diurnas (Tmax) y nocturnas (Tmin) en el periodo de 1981-2010 con cada base de datos (columnas). En cada región, identificada por tres letras (ver Figura 1 para la definición) se muestra el valor promedio de la frecuencia.....	17
5. Igual que la Figura 4, pero para el promedio de días de OC/año.	17
6. Igual que la Figura 4, pero para la duración promedio anual (días) de las OC.....	18
7. Igual que la Figura 4, pero para la intensidad promedio anual de las OC con el índice de magnitud de OC diario (HWMI, por sus siglas en inglés).	19
8. Características promedio de las OC húmedas según ERA5-Land. (a) Frecuencia anual, (b) total de días de OC por año, (c) intensidad y (d) duración anual (días) de una OC húmedas en cada punto de malla en el periodo de 1981-2010 con cada base de datos. Se muestra el promedio de cada región.....	20
9. Diagramas de caja y bigotes para los índices promedio de OC (frecuencia (OC/año), días de OC (días de OC/año), duración (días) e intensidad (HWMI) de arriba hacia abajo) durante 1981-2010 y cada una de las ocho regiones climatológicas (código de colores) para los tres tipos de OC (Diurnas, Nocturnas y Húmedas), y para cada base de datos de temperatura (Livneh, Daymet y ERA5-Land). En cada diagrama, la línea negra es la mediana y la línea roja el promedio; los puntos son valores extremos representados por 1.5 intercuartiles por debajo del primer cuartil y 1.5 intercuartiles por arriba del tercer cuartil.....	21

10. Número de eventos (color intenso) y duración en días (color claro) de OC diurnas (amarillo), nocturnas (azul) y húmedas (gris) durante abril-septiembre de 1981-2010 y 2011-2020 para Daymet y ERA5-Land. 24
11. Diagramas de caja y bigotes de las características promedio de las OC de verano (abril-septiembre) con extensión mínima de 30% en la región de estudio durante 1981-2010. (a) Extensión (%), (b) duración promedio (días), (c) temperatura promedio (°C) y (d) temperatura máxima por día (°C) según el tipo de OC con las bases de datos Daymet y ERA5-Land para las OC diurnas (Tmax en amarillo), nocturnas (Tmin en azul) y húmedas (Tw en gris). La línea negra en cada caja es la mediana y la línea roja el promedio. 25
12. Climatologías de seis variables atmosféricas asociadas a las OC durante abril-septiembre de 1981-2010 (primera columna), climatología durante los compuestos de días de OC diurnas de escala sinóptica (segunda columna) y anomalías diarias (tercera columna) durante OC diurnas con respecto a la climatología (primera columna). (Fila 1) temperatura a 2 metros (T2m), (fila 2) radiación de onda larga saliente (OLR), (fila 3) espesor de la capa de 850-500 hPa (Th850-500), (fila 4) humedad específica a 850 hPa (q850), (fila 5) vectores de viento a 850 hPa (uv850) y (fila 6) vectores de viento a 500 hPa (uv500) con datos de ERA5. Las líneas grises delimitan las regiones climáticas de la región de estudio alrededor de la región fronteriza México-Estados Unidos. 28
13. Climatologías, compuestos de días de OC diurnas y anomalías diarias promedio para el verano extendido de advección de humedad a 850 hPa (adv q850) con datos de ERA5 para 1981-2010. 30
14. Igual que la Figura 12, pero para las OC nocturnas. 31
15. Igual que la Figura 13, pero para las OC nocturnas. 33
16. Igual que la Figura 12, pero para las OC húmedas. 34
17. Igual que la Figura 13, pero para las OC húmedas. 36
18. Principales patrones sinópticos basados en las anomalías de (a) OC diurnas, (b) OC nocturnas y (c) OC húmedas del norte de México y sur de Estados Unidos en el verano extendido de 1981-2010. En cada caso, el mapa se presenta en el plano XY, con la región de estudio delimitada por un recuadro punteado, mientras que el eje Z representa los niveles de presión. La circulación en azul corresponde al nivel bajo (850 hPa) y la circulación en naranja al nivel alto (500 hPa). 39

Lista de tablas

Tabla	Página
1. Características de las bases de datos en malla para las variables utilizadas en superficie (Livneh, Daymet y ERA5-Land) y en niveles verticales (ERA5).	10
2. Promedios de los índices anuales de OC en toda la región de estudio para los tres tipos de OC: diurnas, nocturnas, húmedas. Los promedios se calcularon considerando las tres bases de datos utilizadas para ese tipo de OC, con excepción de las húmedas que se calculan únicamente con ERA5-Land.....	23
3. Número de eventos y días de OC sinópticas encontradas durante abril-septiembre de 1981-2010 utilizando ERA5-Land para cada tipo de OC.	26

Capítulo 1. Introducción

Con el incremento global de la temperatura del aire en la superficie terrestre, se anticipa que los periodos de temperatura anormalmente alta, conocidos como olas de calor (OC), sean más frecuentes, intensos y duraderos (IPCC, 2023). En México, la exposición a calor extremo causó alrededor de 393 muertes de 2002 a 2010 (Díaz-Caravantes et al., 2014). Más recientemente, durante la OC del 1 al 22 de junio de 2023, se reportaron alrededor de 157 fallecimientos en México (Secretaría de Salud, 2023) y durante las tres OC de la primavera 2024 se reportaron 90 muertes asociadas al riesgo del calentamiento extremo en el este y centro del país (Cavazos, 2024). Además del impacto en la salud y la mortalidad, las OC afectan la calidad de vida de la población, la infraestructura de las ciudades, la agricultura y el uso y disponibilidad de agua y energía (United States Agency for International Development, 2019). Por lo tanto, es de suma importancia enfocar esfuerzos para entender los mecanismos físicos que generan este fenómeno y así poder desarrollar métricas que fortalezcan la detección de las OC y estrategias de prevención y adaptación ante su posible incremento con el calentamiento global.

Como a escala global, México también ha experimentado aumentos significativos de temperatura en las últimas décadas, especialmente en el Norte del país (Cavazos et al., 2020) y los escenarios de cambio climático sugieren incrementos aún más drásticos durante este siglo (Colorado Ruiz et al., 2018; Almazroui et al., 2021; Arias et al., 2021). El Norte de México se caracteriza por climas áridos y semiáridos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003), pero es en el Noroeste de México donde se sufren los calores más extremos (Pavía et al., 2009; Montero Martínez et al., 2010). Es por esto, que gran parte de la investigación sobre OC en México se ha enfocado especialmente en esa región (p. e.j., García-Cueto et al., 2010; Contreras-Navarro, 2016; Martínez-Austria y Bandala, 2017; Navarro-Estupiñan et al., 2018), mientras que el Noreste de México ha recibido escasa atención, a pesar de su importancia económica. Nuevo León, Coahuila y Tamaulipas aportan aproximadamente el 15% del producto interno bruto mexicano (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2022). Asimismo, el Índice de Competitividad Estatal del Instituto Mexicano para la Competitividad reconoció a Nuevo León y a Coahuila como los 4to y 5to estados más atractivos para la inversión económica. Los efectos de eventos extremos de temperatura en esta región son de relevancia para todo el país, no solo por la producción económica, sino también por la gran cantidad de población expuesta, especialmente durante el verano. Consecuentemente, esta tesis tiene el objetivo de caracterizar las OC en el Norte de México y el sur de Estados Unidos y los patrones sinópticos que las generan.

1.1 Antecedentes

1.1.1 Definición de ola de calor

Las OC se definen como periodos prolongados de temperaturas excepcionalmente altas para una región determinada. Sin embargo, esta definición plantea varios términos abiertos a interpretación. ¿Qué tan largo es un periodo prolongado? ¿Qué se considera una temperatura anormalmente alta? y ¿cómo se delimita la región en cuestión? Las respuestas a estas preguntas varían de un estudio a otro, dependiendo de los objetivos y disponibilidad de datos.

Con respecto al periodo temporal que define una OC, diversos autores presentan distintas propuestas. Para algunos, como Gershunov et al. (2009) o Díaz-Lázaro (2011), un día de temperaturas elevadas es suficiente para considerarse una OC. En cambio, Espinoza-Tamarindo (2013), Martínez-Austria y Bandala (2017) y García-Cueto et al. (2010) establecen un umbral de dos días. Jauregui (2009), Nairn y Fawcett (2015) y Russo et al. (2015) extienden esa definición a tres días. Incluso, autores como Matínez-Austria et al. (2016) llegan a definir una OC con cinco días consecutivos o más. La relevancia de la duración yace en que los efectos sobre la población y el entorno se verán exacerbados a medida que las temperaturas extremas persisten durante más días. Sin embargo, Guo et al. (2017) encontraron que, tomando en cuenta sus efectos retrasados, las repercusiones sobre la mortalidad no varían según la duración de la OC. En esta tesis, seleccionamos los eventos de OC que duraron por lo menos 3 días consecutivos.

Numerosos estudios utilizan la temperatura máxima diaria (T_{max}) como indicador de las OC diurnas. Por otro lado, la temperatura mínima (T_{min}) también resulta útil para comprender los efectos de extremos de calor durante la noche. Cuando la T_{min} no disminuye lo suficiente durante las horas sin sol, la noche no proporciona suficiente alivio del calor del día, lo que se ha asociado con complicaciones de enfermedades preexistentes y aumento de mortalidad (He et al., 2022). Dichos efectos se ven exacerbados cuando ocurren en conjunto temperaturas extremas, tanto en el día como en la noche. Otros autores, en búsqueda de tomar en cuentas ambas temperaturas a la vez, utilizan la temperatura promedio (ej. Nairn y Fawcett, 2014; Sánchez-Benítez et al., 2020) o incluyen en su definición ambas temperaturas (Pezza et al., 2012; Parker et al., 2014).

No obstante, se ha observado que, si no se tienen en cuenta otras variables además de la temperatura, los análisis podrían no reflejar adecuadamente los riesgos sociales y de salud (Leonard et al., 2014;

Cvijanovic et al., 2023). Una de las variables principales asociadas a la severidad de las OC es la humedad relativa, la cual, al aumentar reduce el umbral de temperatura en el que un evento se vuelve mortal (Mora et al., 2017). En condiciones de alta humedad, el cuerpo humano pierde eficiencia en la regulación de su temperatura a través de la evaporación del sudor o la conducción del calor, lo que puede provocar estrés por calor (Sherwood y Hubber, 2009). Es por eso, que las OC se han comenzado a analizar con variables que toman en cuenta la temperatura y la humedad, como la temperatura aparente (ej. Russo et al., 2017) o la temperatura de bulbo húmedo (T_w , por sus siglas en inglés, p. ej. Raymond et al., 2020; Wilson et al., 2024). Heo et al. (2019) encontraron que usando T_w en la definición de OC se estiman mejor los riesgos de hospitalización a causa de padecimientos por el calor extremo, que cuando se utiliza la T_{max} , T_{min} o temperatura aparente. Es por esto que, en este estudio, se verán tres tipos de OC: las diurnas definidas con T_{max} , las nocturnas con T_{min} y las húmedas con T_w .

Barriopedro et al. (2023) dividen las definiciones de OC en dos categorías según los umbrales de temperatura utilizados: absolutos o relativos. Los umbrales de temperatura absolutos concretan un valor específico como límite sobre el cual se considerará la temperatura extraordinariamente alta. En cambio, los umbrales relativos establecen una definición de lo extremo a partir de la distribución de temperatura en un periodo base. En este caso se usan percentiles como el 90, 95 o 99 como los umbrales mínimos a partir de los cuales se define una OC. Entre más alto sea el percentil de referencia, mayor es la asociación entre las OC y las afectaciones en la salud (Guo et al., 2017). Además, la relación entre percentil y salud se representa mejor con los umbrales relativos de cada región climática local, que un valor absoluto para una región grande (McElroy et al., 2020). El percentil se puede calcular a partir de un periodo base para todo el año, lo que resaltaría las temperaturas en verano. O bien, se puede permitir que varíe según la estacionalidad, con ventanas móviles u otra distribución anual. La selección del umbral queda a discreción del autor. Aunque los más altos son los más preocupantes, requieren de un tamaño de muestra mucho más grande para que su estimación sea confiable y no presente discontinuidades antes o después del periodo de referencia (Zhang et al., 2005).

La diversidad de definiciones complica la comparación entre resultados en la literatura, pero permite seleccionar el índice más apropiado según la disponibilidad de datos y el propósito del estudio. Lo importante de la selección de umbrales y métricas es lograr reflejar los impactos que estos eventos extremos tienen en la sociedad. En la literatura, los principales factores estudiados de las OC son su frecuencia, duración e intensidad, así como su variación temporal para identificar las regiones con mayor riesgo. La frecuencia se refiere a la cantidad de veces que ocurre una OC en un periodo determinado y la duración indica cuántos días consecutivos persiste un evento. La intensidad de los eventos se ha definido

en la literatura a partir de distintos índices estadísticos basados en la acumulación de excedencias de la temperatura sobre un umbral para todos los días de la OC. Algunos autores utilizan la acumulación por sí sola (Spinoni et al., 2015; Chen y Li, 2017; García-Martínez y Bolasina, 2021; Suli et al., 2023), mientras que otros prefieren normalizarla (Russo et al., 2015) o promediarla en el tiempo (Nairn y Fawcett, 2014).

En este trabajo analizamos la frecuencia, duración e intensidad anual de las OC utilizando el umbral P95 de las Tmax, Tmin y Tw para las OC diurnas, nocturnas y húmedas, respectivamente. Esto se describe en detalle en el Capítulo 2.

1.1.2 Mecanismos asociados a las olas de calor

Las OC son eventos que se relacionan con múltiples fenómenos de diferentes escalas espaciales y temporales. Recientemente, y a nivel global, el factor determinante en la ocurrencia de OC es el calentamiento global causado por el aumento de gases de efecto invernadero (Wang et al., 2020; Seneviratne et al., 2021). La comunidad científica cuenta ya con una evidencia extensa que respalda la relación entre el cambio climático antropogénico y el incremento en frecuencia, intensidad y duración de eventos extremos regionales de temperatura (IPCC, 2023). Los factores naturales que propician la formación de OC a escala continental son los modos de variabilidad climática, como las anomalías persistentes de la temperatura superficial del mar (Deng et al., 2018), algunos patrones de teleconexión de gran escala (Barriopedro et al., 2023), los sistemas semipermanentes de alta presión subtropicales y los anticiclones de altura semipermanentes que bloquean la entrada de humedad a la región donde se estacionan por varios días. Por esta razón, estos sistemas se les conoce en inglés como *atmospheric blocking* o "*omega block*", debido a que en ocasiones generan una circulación atmosférica en forma de omega (Zschenderlein et al., 2019; McGregor, 2024). Como ejemplo, del 16 al 22 de junio de 2023 se registró una OC en el noreste de México y en Texas que se asoció, en parte, a la extensión de la alta subtropical del Atlántico Norte hacia el continente generando diversos impactos en la población debido a la persistencia de las altas temperaturas, con anomalías de más de 4°C/día respecto al periodo 1991-2020.

Las OC de escala sinóptica son aquellas que duran entre 3 a 10 días y pueden tener una escala horizontal del tamaño de un continente, entre 1000 y 2500 km. Los principales sistemas sinópticos de la atmósfera asociados a las OC varían de región a región y hasta de evento a evento, pero se pueden resaltar tres aspectos principales (Horton et al., 2016; Barriopedro et al., 2023):

1. Sistemas de alta presión cuasi-estacionarios en la tropósfera media que causan subsidencia de aire que se calienta por compresión adiabática al llegar a la superficie, como vórtices anticiclónicos, bloqueos atmosféricos en la corriente de chorro o extensiones de las altas subtropicales.
2. Cielos despejados que permiten mayor calentamiento por la entrada de radiación de onda corta y liberación de calor latente (evaporación).
3. Advección horizontal de temperatura.

Algunos de estos procesos suelen ocurrir en costas por el contraste de temperatura entre el continente y mar y por la disponibilidad de humedad, como en el sur de Estados Unidos y México donde el aire caliente y húmedo proviene de los mares adyacentes (Russo et al., 2017). También se sabe que las condiciones antecedentes de humedad de suelo y nivel de sequía son relevantes (son condiciones de frontera que varían lentamente), porque en condiciones de sequía se generan mecanismos de retroalimentación positivos entre el suelo y el aire que intensifican a una OC; esto ha llevado a estudiar el fenómeno compuesto de sequías y OC (p. ej., Mukherjee y Mishra, 2021). A un nivel más local, el desarrollo de OC también se ve afectado por la emisión de aerosoles (García-Martínez y Bolasina, 2021) y el uso de suelo y cobertura de vegetación a través de cambios en el albedo, el balance de humedad entre la tierra y la atmósfera (Y. Li et al., 2015) y la absorción o emisión de gases de efecto invernadero (Jia et al., 2019).

Asimismo, se ha identificado un comportamiento distinto cuando las OC se extienden o continúan durante la noche (OC nocturnas). En estos eventos, se suele observar mayor nubosidad y humedad durante la tarde y noche, y aumento en la advección de temperatura de bajos niveles (Thomas et al., 2020). La nubosidad evita la pérdida de radiación de onda larga al espacio, aumentando así la temperatura del aire cerca de la superficie durante la noche, generando un efecto de invernadero.

1.1.3 Las olas de calor en México

En general, los datos observados de temperatura máxima diaria en el país muestran una tendencia positiva durante un periodo reciente de 30 años (Pavía et al., 2009; Montero Martínez et al., 2010). De la misma manera, en casi todo México, especialmente en el noroeste del país, se ha encontrado un aumento en la intensidad, duración y frecuencia de las OC, independientemente de los parámetros seleccionados para definirlos (Espinoza Tamarindo, 2013; Martínez-Austria et al., 2016; García-Martínez y Bolasina, 2021).

La literatura sobre los mecanismos asociados a la formación de OC en México es escasa, tanto sobre los factores dinámicos como de los termodinámicos. Contreras-Navarro et al. (2016) analizaron la temperatura del aire a 850 mb (T850) como indicador de OC en el Noroeste de México. Además, desarrollaron modelos de predicción de T850 en función de otras variables y encontraron que las más relevantes para el modelo fueron la altura geopotencial y la presión atmosférica a nivel del mar, seguidas en menor medida por la radiación solar.

Por otro lado, García-Martínez y Bollasina (2021) compararon datos observados con resultados de ensambles del Modelo Comunitario del Sistema Terrestre con distintos forzamientos para evaluar la influencia de los gases de efecto invernadero y aerosoles de sulfatos por actividad antropogénica en las OC de México y Estados Unidos. Los resultados mostraron que la continua reducción en la emisión de esta especie de aerosoles y el aumento de gases de efecto invernadero se relacionan con tendencias positivas de los tres indicadores de OC (intensidad, frecuencia y duración). Esto se debe a que los aerosoles causan la dispersión de radiación de onda corta en la atmósfera superior y favorecen el aumento de cobertura de nube, un mayor albedo y tienden a enfriar, por lo que la reducción de su concentración provoca un incremento de la temperatura superficial. Así mismo, el incremento de los gases de efecto invernadero causan un calentamiento de la atmósfera inferior por absorción de radiación de onda larga. Entonces, el efecto combinado de reducir aerosoles y aumentar los gases de efecto de invernadero genera un aumento mayor de la temperatura del aire.

1.2 Justificación

El sexto reporte del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés; 2023) declaró que al final de la década más reciente la temperatura global aumentó 1.1°C sobre los valores preindustriales. Consecuentemente, cada vez hay más evidencia que el calentamiento global es la causa principal del incremento observado en la frecuencia e intensidad de eventos extremos, como las OC. Se prevé que estos eventos sean aún más frecuentes a medida que la temperatura continúe aumentando debido al cambio climático (IPCC, 2023). Esto es preocupante, ya que la exposición prolongada a altas temperaturas está asociada a aumentos en la mortalidad y el deterioro en la salud humana (Campbell et al., 2018; Hoegh-Guldberg et al., 2018; Wilson et al., 2024).

Durante el periodo de 1998 a 2017, se registraron 166,000 muertes en todo el mundo atribuidas a las OC (Pascaline y Rowena, 2018). Además, se ha observado un incremento significativo en las hospitalizaciones

durante estos eventos a causa de enfermedades como golpe de calor, deshidratación e hipotensión ortostática (Alsaqali et al., 2022). Las poblaciones más vulnerables a las OC son los adultos mayores, niños y hombres (por su trabajo en exteriores), aparte de que aquellas personas con enfermedades preexistentes tienden a complicarse aún más (M. Li et al., 2015; Wilson et al., 2024).

El impacto que tienen las OC depende de la temperatura y la duración de cada evento, además de la región climática en donde ocurren (McElroy et al., 2020). Existe una brecha de conocimiento en la dinámica regional de las OC y su interacción con otras escalas (Barriopedro et al., 2023) y este trabajo busca aportar para reducir ese vacío en México.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Caracterizar las OC en el norte de México y sur de Estados Unidos en décadas recientes y determinar los patrones sinópticos que las generan.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Analizar la frecuencia, duración e intensidad de OC diurnas, nocturnas y húmedas a escala anual en el norte de México y sur de Estados Unidos durante 1981-2010, utilizando datos observados y de reanálisis, con el fin de comprender mejor su comportamiento regional.
2. Determinar los patrones sinópticos conductores de las OC durante el verano extendido (abril-septiembre) analizando los campos de distintas variables atmosféricas en superficie y la tropósfera media, con el fin de mejorar la comprensión de los mecanismos físicos que generan olas de calor en la región.

Capítulo 2. Datos y Metodología

En este capítulo se detalla el proceso seguido para analizar las OC diurnas, nocturnas y húmedas en la región del norte de México y el sur de los Estados Unidos. Se emplearon diversas bases de datos que proporcionan información de temperaturas diarias en superficie, así como variables atmosféricas en distintos niveles verticales. Para cada tipo de OC, se definieron umbrales móviles basados en el percentil 95 (P95), lo que permitió caracterizar su frecuencia, duración e intensidad. Además, se describen los métodos de interpolación, cálculo y análisis espacial empleados para identificar patrones sinópticos y su relación con las OC.

2.1 Datos

2.1.1 Bases de datos en superficie

Analizamos tres tipos de OC: diurnas, nocturnas y húmedas. La diferencia entre ellas es la variable empleada en la definición de OC. La T_{max} se usa para las OC diurnas, la T_{min} para las nocturnas y la T_w para las húmedas. T_w se calculó con la temperatura del aire a 2 m (T_{2m}) y la temperatura de punto de rocío (T_d). Los datos de temperatura se obtuvieron de tres bases cuyas características se muestran en detalle en la Tabla 1. Livneh (Livneh et al., 2015) y Daymet (Thornton et al., 2022) proporcionan valores diarios de T_{max} y T_{min} en una malla espacial para México; los datos se estiman a partir de observaciones de las estaciones meteorológicas del Sistema Meteorológico Nacional con distintas metodologías de interpolación y corrección topográfica. Livneh es un producto del Centro Nacional de Información Ambiental de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) y cuenta con una resolución espacial de $1/16^\circ$ (aproximadamente 6 km), para México, Estados Unidos y el sur de Canadá, pero estos datos solo están disponibles hasta 2013. Daymet es parte del proyecto *Energy Exascale Earth System Model* del Departamento de Energía de Estados Unidos. Tiene una proyección cónica y una resolución espacial de 1 km que incluye a Norte América, Hawaii y Puerto Rico.

La tercera base de datos, ERA5-Land (Muñoz Sabater, 2019), es un subproducto del reanálisis ERA5 proporcionado por el proyecto europeo Copernicus. Un reanálisis combina datos observados y pronósticos meteorológicos para recrear datos más precisos del estado del tiempo. La ventaja de este subproducto, a

diferencia de ERA5, es que aumenta la resolución horizontal a 0.1° (~9 km) a nivel superficial para diversas variables meteorológicas. Esta base de datos es de acceso libre y está disponible en: <https://cds.climate.copernicus.eu/portfolio/dataset/reanalysis-era5-land>. Su resolución temporal es horaria, por lo que extrajimos las Tmin y Tmax a partir de los datos de cada día utilizando un código de Python con la librería de *xarray*.

Las OC húmedas se definen a partir de la Tw, la cual mide la temperatura a la que se enfría una parcela de aire que es llevada al punto de saturación (humedad relativa del 100%) mediante la extracción de calor latente por evaporación, en un proceso adiabático a presión constante. Como tal, la Tw se utiliza como una medida práctica del contenido de vapor de agua en el aire y sus efectos sobre la fisiología humana. Depende de varias condiciones ambientales, como la presión atmosférica, el viento o la radiación solar. Para su cálculo, utilizamos una expresión empírica basada en la T2m (aquí aparece como T) y la humedad relativa (HR) en superficie, desarrollada por Stull (2011):

$$T_w = T \cdot \tan^{-1} [0.151977 \cdot (HR + 8.313659)^{1/2}] + \tan^{-1}(T + HR) - \tan^{-1}(HR - 1.676331) + 0.00391838 \cdot HR^{3/2} \cdot \tan^{-1}(0.023101 \cdot HR) - 4.686035 \quad (1)$$

La ecuación 1 es válida para valores de T entre -20°C y 50°C y de HR entre 5% y 95%. ERA5-Land no incluye HR, por lo tanto, utilizamos la T2m y la Td para calcularla a través de las siguientes ecuaciones:

$$RH = \frac{e}{e_s} * 100 \quad (2)$$

$$\ln e_s = -6096.9385T^{-1} + 21.2409642 - 2.711193 \times 10^{-2}T + 1.673952 \times 10^{-5}T^2 + 2.433502 \log(T) \quad (3)$$

$$\ln e = -6096.9385T_d^{-1} + 21.2409642 - 2.711193 \times 10^{-2}T_d + 1.673952 \times 10^{-5}T_d^2 + 2.433502 \ln(T_d) \quad (4)$$

Estas son las relaciones entre la HR, la presión de vapor real del aire e y la presión de vapor de saturación e_s que se definen con la T2m y Td, respectivamente (Sonntag, 1994). Calculamos los valores de cuatro horarios (0, 6, 12 y 18 horas) de la temperatura de Tw y a partir de esto determinamos los promedios diarios. Para llevar a cabo los análisis posteriores, unificamos la resolución espacial de las bases de temperaturas diarias a la malla espacial de ERA5-Land (9 x 9 km) a través de la interpolación bilineal de CDO para el periodo de 1981 a 2010.

Tabla 1. Características de las bases de datos en malla para las variables utilizadas en superficie (Livneh, Daymet y ERA5-Land) y en niveles verticales (ERA5).

Características	Livneh	Daymet V4	ERA5-Land	ERA5
Referencia	Livneh et al. (2015).	Thornton et al. (2022)	Muñoz Sabater (2019)	Hersbach et al. (2023)
Variables	Tmax y Tmin	Tmax y Tmin	T2m y Td	T2m, Z500, Z850, U500, V500, U850, V850, OLR, q850
Resolución espacial	$1/16^\circ = 0.0625^\circ$ ≈ 6 km	1 km (Lambert Conformal Conic)	$1/10^\circ = 0.1^\circ$ ≈ 9 km	$0.25^\circ \approx 31$ km
Resolución temporal	diaria	diaria	horaria	horaria
Disponibilidad	1950 - 2013	1980 - 2021	1950 - presente	1950 - presente
Institución	Universidad de Colorado / National Center for Atmospheric Research, NOAA	Energy Exascale Earth System Model	Copernicus Climate Change Service (C3S) / ECMWF	C3S / ECMWF

2.1.2 Datos atmosféricos en niveles verticales

Una vez identificados los días de OC a partir de la Tmax, Tmin y Tw, el siguiente objetivo fue analizar los patrones sinópticos característicos de estos días durante el verano extendido. Para ello, se descargaron las variables atmosféricas típicamente asociadas a las OC:

- T2m,
- geopotencial de la superficie isobárica de 500 y 850 hPa,
- velocidad horizontal del viento a 500 hPa (U500, V500),
- velocidad horizontal del viento 850 hPa (U850, V850),
- radiación de onda larga saliente (OLR) y
- humedad específica a 850 hPa (q850)

Para cada variable, obtuvimos datos horarios del reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2023) con una resolución horizontal de 0.25° . En particular, el geopotencial nos permitió determinar la altura geopotencial de las superficies isobáricas de 500 y 850 hPa (Z500, Z850) y el espesor de la tropósfera media Z850-Z500 (Th850-500), variables esenciales para identificar patrones sinópticos. En la Tabla 1 se muestra a más detalle las características de la base de datos de estas variables. También, se calculó la advección de humedad a 850 hPa ($adv\ q_{850}$) en cada punto de malla a partir de U, V y q en el mismo nivel:

$$adv\ q_{850} = (\vec{V} \cdot \nabla q) \quad (5)$$

Donde ∇q representa el gradiente de la humedad específica, que cuantifica la variación espacial de la humedad. Al operar este gradiente en un producto punto con el vector de velocidad $\vec{V} = \langle U, V \rangle$, se obtiene la advección de humedad, expresada en (g/kg)/s. Posteriormente, calculamos los promedios de los compuestos de días de OC y anomalías estacionales; en el caso del verano se consideró el verano extendido de abril a septiembre para cada variable atmosférica de 1981-2010.

2.2 Metodología

2.2.1 Definición de ola de calor e índices

Con base en Russo et al. (2015), en este trabajo definimos una OC diurna como tres o más días consecutivos con T_{max} superior al umbral del P95 de una ventana móvil de 31 días para el periodo de referencia. Para el cálculo del P95 correspondiente a cada día del año se utilizan todos los días de 1981-2010 que tienen fecha del calendario dentro de la ventana móvil de 31 días que está centrada en el día en cuestión. Esta ventana móvil permite tener un umbral relativo a cada día del año, tomando en cuenta el bloque de datos 15 días antes y 15 días después para los 40 años de referencia, similar al método utilizado por Russo et al. (2017). Los demás tipos de OC comparten la misma definición, pero en lugar de usar la T_{max} , se usa la T_{min} para las OC nocturnas y la T_w para las OC húmedas.

Una vez identificados los eventos de OC en cada punto de malla, analizamos cuatro índices para caracterizarlos: frecuencia anual, días de OC en un año, duración promedio anual e intensidad promedio anual. La frecuencia es el número de eventos de OC en un año; los días de OC es la cantidad total de días en un año en que se observaron OC y la duración es cuántos días consecutivos se mantuvo una OC en promedio.

Para medir la intensidad nos basamos en el índice de magnitud de OC diario (daily Heat Wave Magnitude Index, HWMI por sus siglas en inglés) acuñado por Russo et al. (2015). El HWMI se calcula para cada punto de malla de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$M_d(T) = \begin{cases} \frac{T - T_{25}}{T_{75} - T_{25}} & \text{si } T > T_{25} \\ 0 & \text{si } T \leq T_{25} \end{cases} \quad (6)$$

Donde M_d es la magnitud diaria de la temperatura T correspondiente a la OC (T_{max} , T_{min} o T_w) y T_{25} y T_{75} son los percentiles 25 y 75, respectivamente, del periodo de referencia.

Para evaluar la variabilidad espacial de las OC realizamos promedios por regiones climáticas (Figura 1). En esta tesis utilizamos las regiones con patrones estacionales de lluvia similares definidas por Colorado-Ruiz y Cavazos (2021) y seleccionamos únicamente las del norte de México y sur de Estados Unidos. Sus nombres y características particulares se exploran más a fondo en la sección sobre la zona de estudio (2.3).

2.2.2 Circulación sinóptica durante olas de calor

Con el propósito de analizar los patrones sinópticos asociados a los compuestos de días de OC según la región, desarrollamos la siguiente metodología. Primero, identificamos los días en los que la temperatura diaria correspondiente a la OC sobrepasó el umbral del P95 utilizando una ventana móvil de 31 días. Posteriormente, definimos los días de OC como aquellos en los que al menos el 30% de la región de estudio presentó valores por arriba del umbral P95 durante tres días consecutivos o más.

Con base en los eventos regionales identificados, calculamos los compuestos o promedios diarios de cada variable atmosférica para los días de OC ocurridos entre abril y septiembre, periodo al que llamamos "verano extendido". Comparamos estos compuestos con el promedio diario de todo el verano extendido del periodo de referencia para destacar las características típicas de cada OC según la variable analizada.

Finalmente, analizamos y describimos los patrones de circulación atmosférica identificados a partir de las anomalías, interpretando cómo se comportan las variables atmosféricas durante los días de OC en comparación con el periodo de referencia; en algunos casos también analizamos la evolución varios días antes del evento para ver su procedencia y persistencia.

2.3 Zona de estudio

Esta sección proporciona una visión detallada de las características geográficas y climáticas que son fundamentales para el análisis de las OC en la región de estudio. Esta se sitúa en el norte de México y el sur de los Estados Unidos e incluye la frontera entre los dos países y ciudades grandes como Tijuana, San Diego, Mexicali, Phoenix, Hermosillo, Tucson, Chihuahua y Monterrey, entre otras.

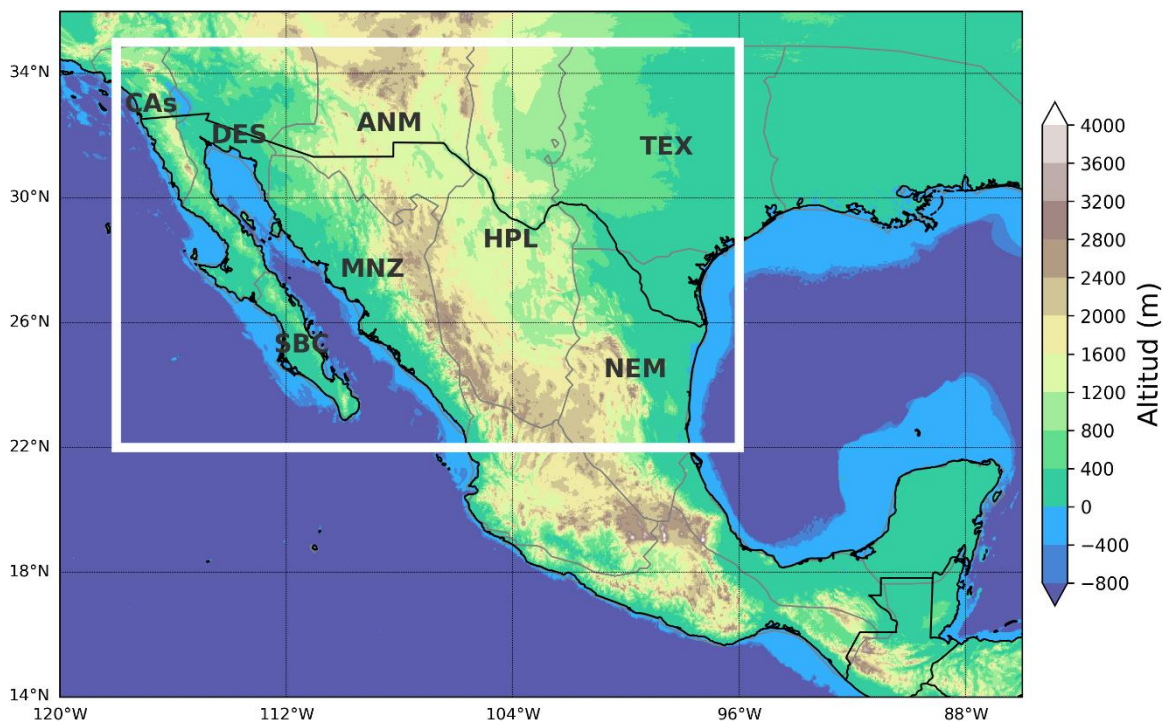


Figura 1. Altitud y regiones de estudio en el recuadro blanco (norte de México y regiones climáticas fronterizas). Las regiones incluidas son: el sur de California y el noroeste de Baja California (CAS), el desierto de Sonora (DES), Arizona/Nuevo México (ANM), Texas (TEX), el extremo sur de la península de Baja California (SBC), el núcleo del monzón norteamericano (MNZ), el altiplano (HPL) y el noreste de México (NEM). Datos topográficos de la NOAA (Amante y Eakins, 2009).

Delimitada entre las latitudes 22° a 35°N y las longitudes 96° a 118°O, la zona incluye los estados mexicanos de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Chihuahua, Durango, Coahuila, Zacatecas, Nuevo León, San Luis Potosí y Tamaulipas. Del lado de Estados Unidos, están los estados fronterizos de California, Arizona, Nuevo México y Texas. Su geografía es particular, ya que está delimitada por el Océano Pacífico y el Golfo de California al oeste y una llanura costera y el Golfo de México al este. En medio se encuentran dos cadenas de montañas, la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre Occidental, con los puntos más altos cerca de los 2,800-3,200 msnm, y un altiplano entre ambas sierras que varía en altura entre 800 y 2,800 msnm (Figura 1).

Debido a sus características geográficas, la región cuenta con distintos tipos de climas. Para simplificar la interpretación de los índices de OC, se utilizó la regionalización de Colorado-Ruiz y Cavazos (2021). Se puede observar en la Figura 1 que las regiones climáticas incluidas en la zona de estudio son: el sur de California y el noroeste de Baja California (CAS), el desierto de Sonora (DES), Arizona/Nuevo México (ANM), Texas (TEX), el extremo sur de la península de Baja California (SBC), el núcleo del monzón norteamericano (MNZ), el altiplano (HPL) y el noreste de México (NEM). En términos generales, las regiones más secas se encuentran en el noroeste, donde predomina clima mediterráneo tipo semiárido en CAS y desértico en DES y SBC. En contraste, el MNZ presenta un clima cálido subhúmedo, mientras que HPL y NEM exhiben climas semiáridos. TEX se distingue por su clima húmedo subtropical, caracterizado por precipitaciones a lo largo de todo el año y veranos especialmente húmedos.

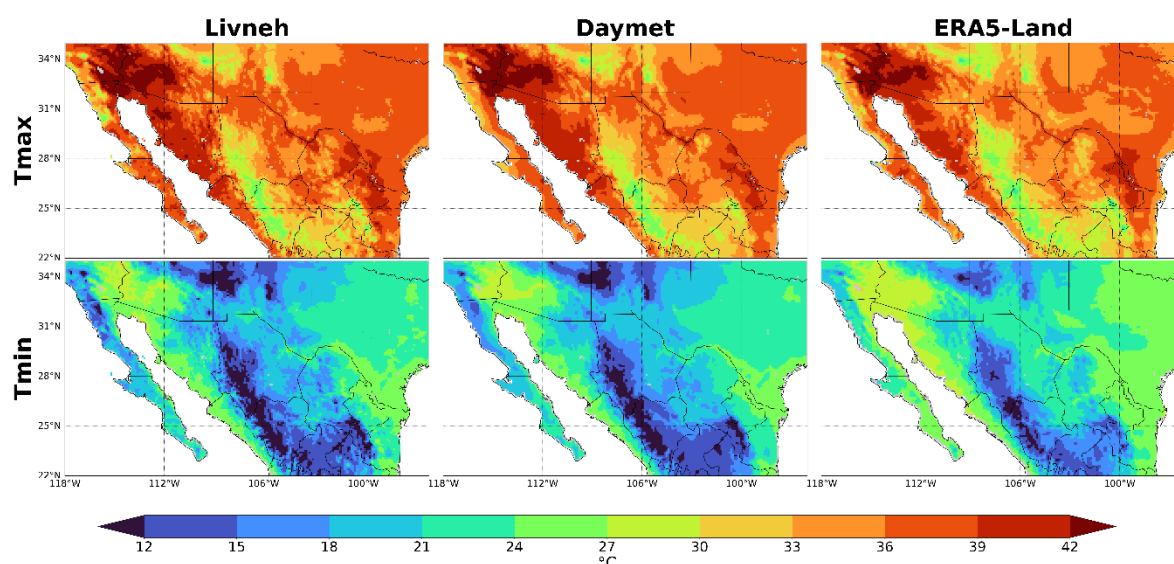


Figura 2. Climatología anual del percentil 95 (P95) de la temperatura máxima diaria (Tmax, paneles superiores) y temperatura mínima diaria (Tmin, paneles inferiores) en la región de estudio para el periodo 1981-2010 de las tres bases de datos: Livneh, Daymet y ERA5-Land (columnas).

En las Figuras 2 y 3 se presenta la climatología anual del P95 para Tmin, Tmax y Tw. La elevación entre las sierras contribuye a que en HPL las temperaturas sean menores que en las planicies costeras alrededor de los golfos, donde se tienen las temperaturas máximas más altas, especialmente en verano. El DES presenta los umbrales de Tmax y Tmin más altos (Figura 2), con P95 > 40°C y > 24°C, respectivamente. Toda la región fronteriza de México-Estados Unidos tiene P95 de Tmax > 36°C con las bases de datos observados de Livneh y Daymet, a excepción de partes del CAS por tener un clima templado. Las Tmin más altas se observan en las regiones aledañas a los dos golfos, con umbrales entre los 27 y 30°C. En el HPL se observan umbrales de Tmin < 21°C a diferencia del umbral de Tmax que muestra valores altos > 33°C.

Al comparar las tres bases de datos se concluye que, mientras los umbrales de Tmax y Tmin son bastante consistentes entre ellas, con Daymet mostrando sesgos mínimos respecto a Livneh, ERA5-Land presenta discrepancias más pronunciadas. En particular, ERA5-Land tiende a subestimar el P95 de Tmax y a sobrestimar el de Tmin, lo que sugiere un rango de temperatura diaria más modesto en comparación con las bases de datos observados. Estas discrepancias son especialmente evidentes en ciertas regiones, como las sierras de Baja California, donde tanto Daymet como ERA5-Land muestran sobreestimaciones con respecto a Livneh, posiblemente debido a la escasez de estaciones de observación en esas áreas. No obstante, a pesar de estos sesgos, el análisis de estas bases de datos proporciona información valiosa para identificar patrones espaciales y características climatológicas clave en la región de estudio.

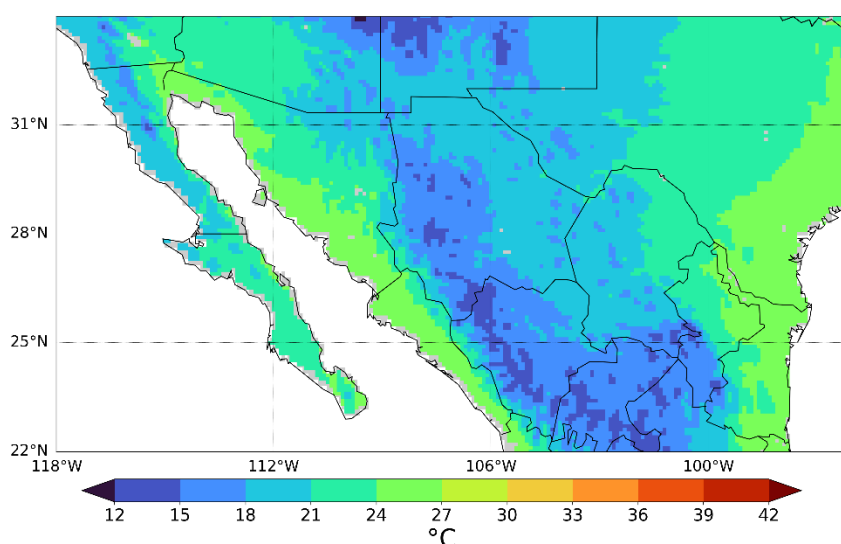


Figura 3. Climatología anual de P95 de la temperatura de bulbo húmeda (Tw) en la región de estudio para el periodo 1981-2010 calculado con ERA5-Land.

La Tw, que combina la temperatura promedio y la humedad relativa, presenta un umbral P95 con patrones similares a los observados en la Tmin como se puede ver en la Figura 3. Estos patrones destacan especialmente en las costas del Golfo de México y el este del Golfo de California, donde se registran los valores más altos, entre 24-27°C. Cabe mencionar que el límite crítico para la adaptación del cuerpo humano se establece con la Tw de 31°C (Vecellio et al., 2022). La península de Baja California y el HPL tienen umbrales P95 de Tw que varían entre 18-24°C y los mínimos se observan en las zonas más altas de la región con 12-18°C.

Capítulo 3. Resultados

3.1 Características de las olas de calor a escala anual

Con el propósito de determinar las principales propiedades de las OC en el norte de México y sur de Estados Unidos, se utilizaron los umbrales del P95 de las temperaturas extremas en cada punto de malla para identificar los días de OC y, posteriormente, calcular cuatro índices anuales: frecuencia de eventos, días totales, duración e intensidad. Esta sección describe la variación espacial de estos índices utilizando tres bases de datos (Livneh, Daymet y ERA5-Land), además de analizar en detalle los promedios regionales y las diferencias climáticas entre las OC diurnas, nocturnas y húmedas durante 1981-2010.

3.1.1 Olas de calor diurnas y nocturnas

Los promedios resultantes de los cuatro índices para las OC diurnas y nocturnas se muestran en las Figuras 4 a 7, ya que comparten bases de datos. Como las húmedas solo se calcularon con ERA5-land, se analizan en el siguiente capítulo. Lo primero que resalta al comparar las tres bases de datos es la alta concordancia en el patrón espacial, particularmente en las mallas que utilizan observaciones de estaciones climatológicas (Livneh y Daymet). Un análisis de la frecuencia de OC revela que en promedio las OC diurnas son más frecuentes que las nocturnas en la región de estudio durante el periodo de 1981 a 2010 (Figura 4); esto ocurre especialmente en la región de CAs con un promedio de 2.1 OC/año y valores puntuales que llegan a más de 2.5 OC/año, como en la península de Baja California y el centro de México. En general, las OC diurnas se mantienen entre 1 y 2.5 OC/año. La mayor frecuencia de OC nocturnas, por su parte, se concentra principalmente en la región del Golfo de México y la península de Baja California, con valores entre 1.5-2.5 OC/año. El resto de la región se mantiene ente 0.5-2 OC nocturnas/año, excepto con ERA5-Land que muestra valores menores. Además, se resaltan algunos puntos de frecuencias mayores entre el ANM y MNZ para ambos tipos de OC, coincidiendo con máximos de días de OC/año (Figura 5), lo cual puede deberse a sesgos introducidos por eventos extremos registrados en las estaciones meteorológicas correspondientes que no fueron bien resueltos por el reanálisis ERA5.

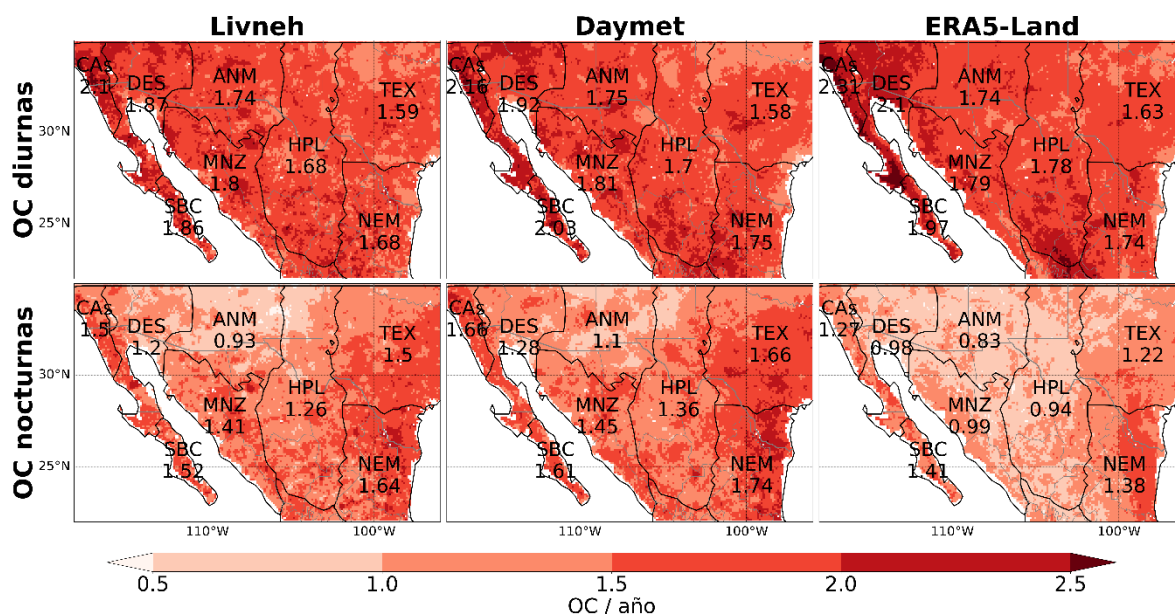


Figura 4. Frecuencia promedio de eventos de olas de calor (OC) por año en cada punto de malla durante OC diurnas (T_{max}) y nocturnas (T_{min}) en el periodo de 1981-2010 con cada base de datos (columnas). En cada región, identificada por tres letras (ver Figura 1 para la definición) se muestra el valor promedio de la frecuencia.

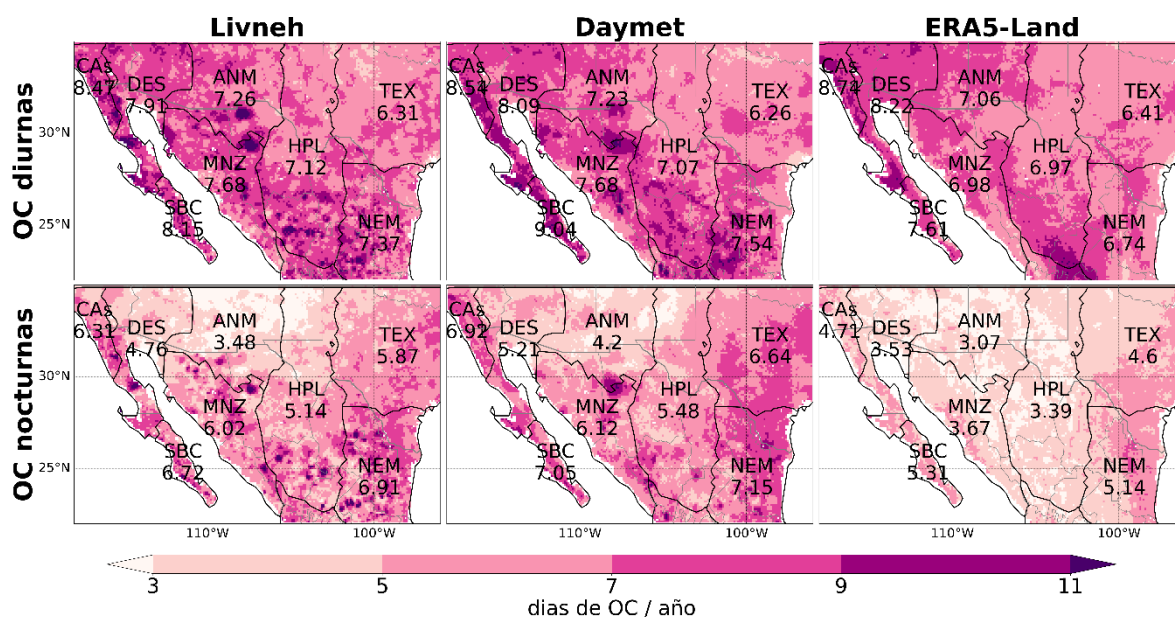


Figura 5. Igual que la Figura 4, pero para el promedio de días de OC/año.

Los patrones espaciales de los días de OC en un año (Figura 5) son similares a los de la frecuencia: las OC diurnas tienen el máximo en CA\$ con aproximadamente 8.5 días/año y las OC nocturnas alrededor del Golfo de México, especialmente en el NEM con un promedio de 6.9 días/año. En cambio, las OC nocturnas duran menos y ERA5-Land subestima significativamente los días de estas OC con respecto a las observaciones, al producir valores promedio entre 3 y 5 días/año. Con base en estos resultados, las OC

nocturnas son más frecuentes en zonas costeras, probablemente porque la humedad permite que el calor acumulado durante el día se mantenga en la noche o mediante la presencia de nubes, las cuales, si presentes, pueden generar un efecto de invernadero localizado.

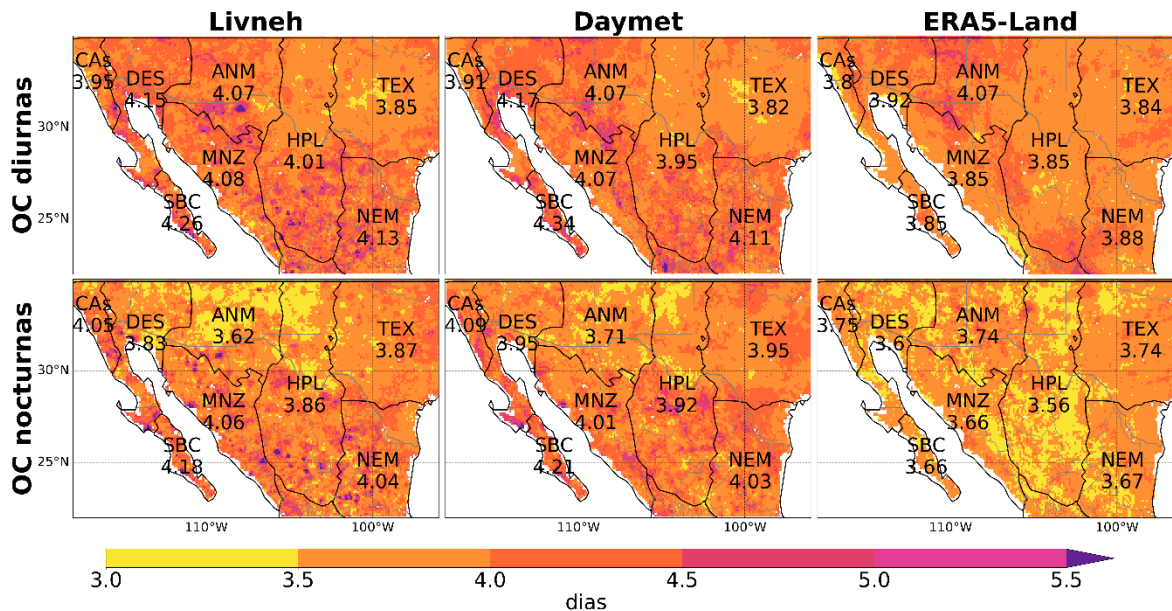


Figura 6. Igual que la Figura 4, pero para la duración promedio anual (días) de las OC.

Todas las bases de datos estiman un promedio de duración alrededor de 4 días por OC tanto diurna como nocturna (Figura 6). La región SBC muestra promedios máximos de duración de OC diurnas y nocturnas con las bases de datos observadas, con valores entre 4.18 y 4.34 días; algunos puntos de malla tienen valores por arriba de los 5 días repartidos por todo el norte de México. Sin embargo, ERA5-Land muestra la mayor duración de OC diurnas en la región de ANM (4.07 días) y valores mayores de 5 días en la zona noroeste y hacia el centro de México; le siguen las OC nocturnas en la región CAs (3.75 días) y TEX (3.74 días). En general, las OC diurnas duran un poco más que las nocturnas con las tres bases de datos.

Si bien la duración de un evento de OC afecta el valor final de la intensidad medida con el HWMI (ec. 6), este índice también toma en cuenta la temperatura de cada día de OC normalizándola según su intercuartil, por lo que en la Figura 7 se observan patrones muy diferentes de la intensidad con respecto a la duración y frecuencia. El promedio anual muestra que la frontera entre Baja California y Sinaloa es un *hot spot* de OC diurnas y nocturnas con un valor por arriba de 35 unidades; además, las OC diurnas más intensas se observan en la región SBC (HWMI ~31) o, según ERA5-Land, la región DES (HWMI ~26). Como contexto, Russo et al. (2015) analizan un evento de OC que tuvo un valor máximo de HWMI de 26.5 en Noruega, donde las noticias declararon que “era posible hervir un huevo en las vías del tren”. Para OCs

más extremas como el evento de 2010 en Rusia reportaron valores de HWMI entre 48 y 96. Vale la pena destacar que, aparte de DES y BCS, las regiones de ANM y MNZ también se identifican como *hot spots* de OC diurnas, con valores de HWMI de 35.

Las OC nocturnas suelen ser más intensas que las OC diurnas para casi toda la región de estudio, con excepción de ANM y BCS (Figura 7). Las OC nocturnas más intensas ocurren en las regiones del MNZ y DES, con valores promedios de HWMI de casi 30 con las bases de datos observados y ~ 26 con ERA5-Land. Sería interesante estudiar por qué las OC nocturnas son más intensas en estas regiones desérticas y no en regiones con mayor influencia de humedad y nubosidad; DES y MNZ podrían tener presencia de humedad atmosférica especialmente durante el verano por su cercanía al Golfo de California y la influencia monzónica. A diferencia de los otros índices, el HWMI sí detecta el efecto de las de las altas temperaturas en el oeste de la región de estudio, especialmente en la zona de Mexicali en el verano, región que se caracteriza por tener las temperaturas más altas en México.

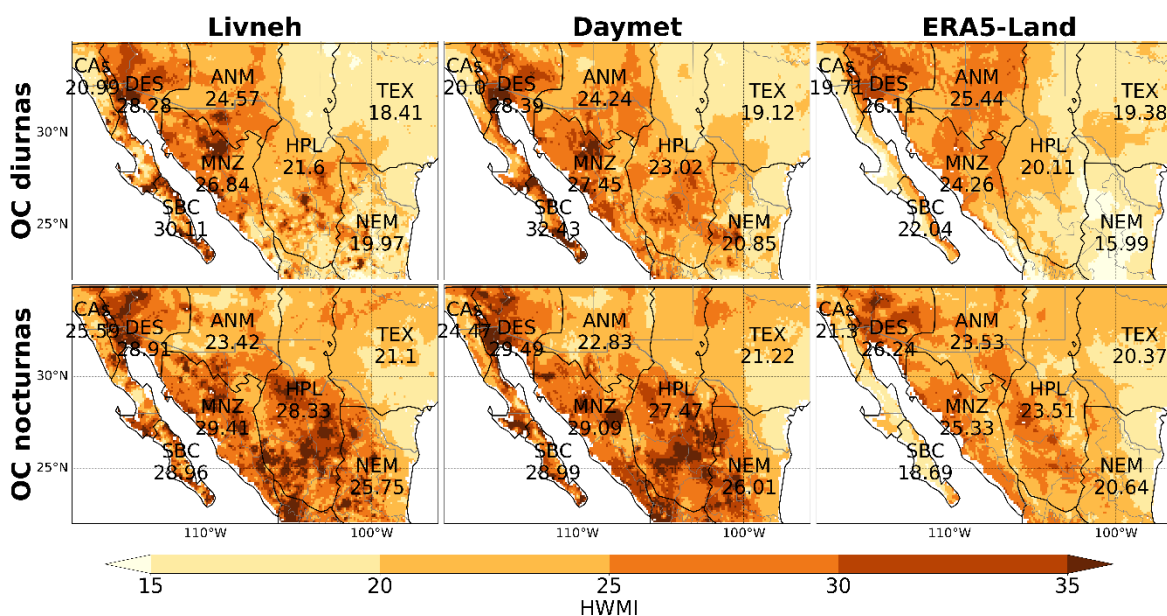


Figura 7. Igual que la Figura 4, pero para la intensidad promedio anual de las OC con el índice de magnitud de OC diario (HWMI, por sus siglas en inglés).

3.1.2 Olas de calor húmedas

Como se mencionó en la sección 2.1, para el cálculo de las OC húmedas solo se empleó el reanálisis ERA5-Land para obtener las métricas de frecuencia, intensidad y duración, dado que están definidas por la T_w (ec. 1) que depende de la HR. La frecuencia y los días de OC húmedas (Figura 8a y b) coinciden en que las

regiones SBC y DES tienen los mismos máximos, con aproximadamente 1.5 eventos y 6 días de OC húmedas al año. No por mucha diferencia, la región del HPL también muestra valores altos, con ciertos puntos de malla llegando a más de 2.5 eventos y 7 días de OC al año. Esto, similar a la intensidad alta obtenida para las OC nocturnas, sorprende porque el HPL no es más húmedo que las zonas costeras. Estudiar la dinámica y evolución de las OC en esta región es un área de oportunidad para investigar en el futuro. Por otro lado, tenemos que los eventos de OC húmedas más intensas suelen ocurrir en ANM con valores de HWMI de 22.16 y algunas zonas con valores mayores a 25 (Figura 8c). En segundo lugar, de nuevo está el DES con 22.25. Finalmente, en la Figura 8d se observa la duración promedio de OC húmedas, destacando la región CAs con 3.94 días por evento. También, la región del MNZ aparece como un *hot spot* donde ocurren eventos de OC húmedas de 4.5 días o más.

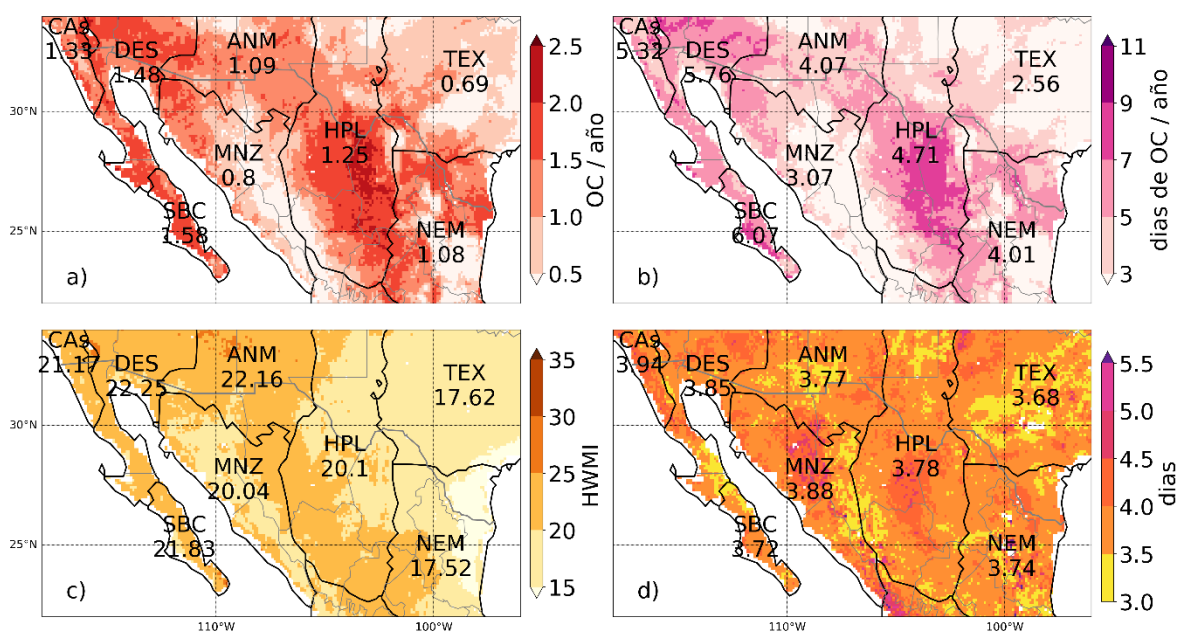


Figura 8. Características promedio de las OC húmedas según ERA5-Land. (a) Frecuencia anual, (b) total de días de OC por año, (c) intensidad y (d) duración anual (días) de una OC húmedas en cada punto de malla en el periodo de 1981-2010 con cada base de datos. Se muestra el promedio de cada región.

3.1.3 Comparación regional

En resumen, la evaluación de las características de las OC en el norte de México y sur de Estados Unidos revela diferencias entre los tres tipos de OC, diurnas, nocturnas y húmedas, en términos de frecuencia, duración e intensidad.

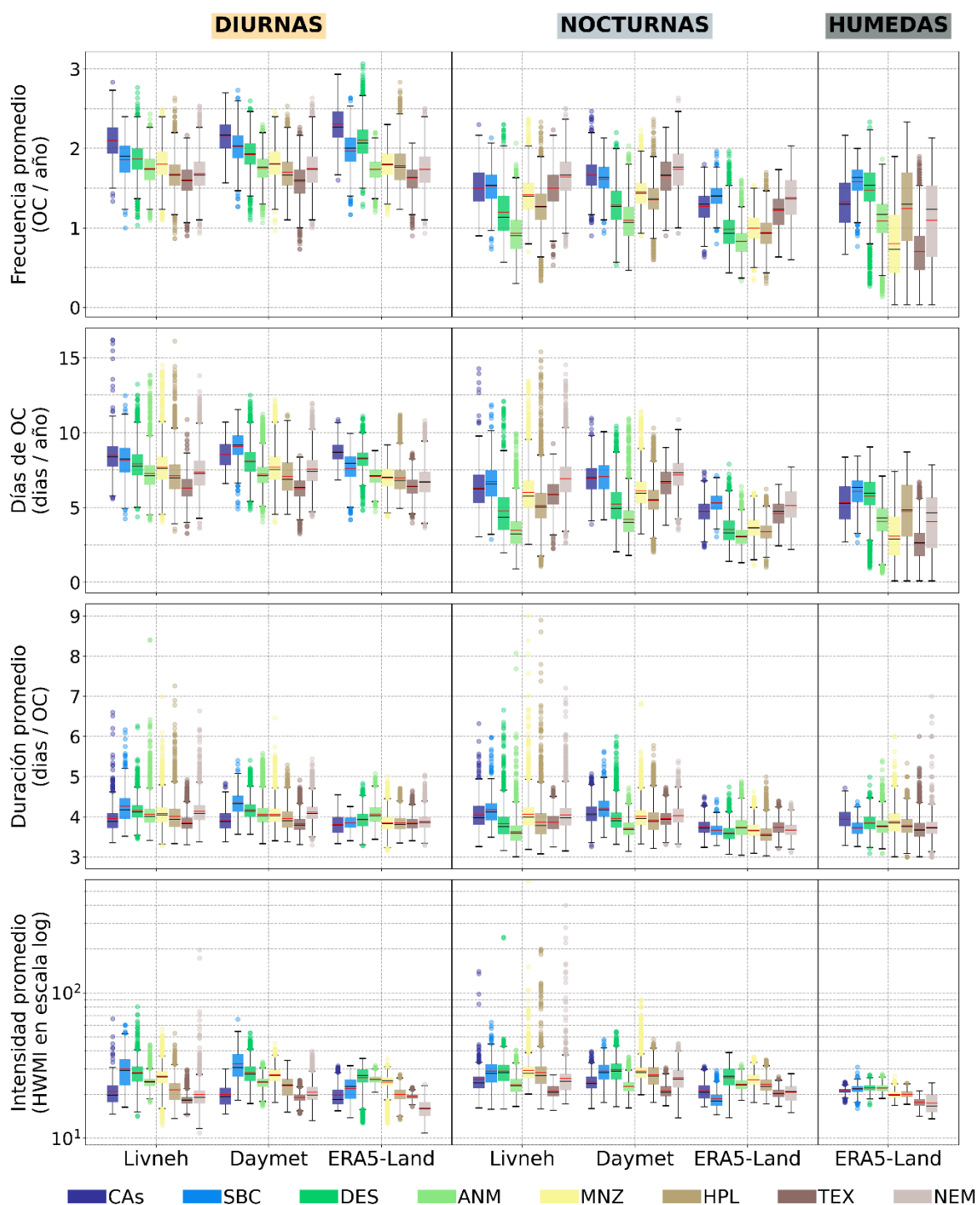


Figura 9. Diagramas de caja y bigotes para los índices promedio de OC (frecuencia (OC/año), días de OC (días de OC/año), duración (días) e intensidad (HwMI) de arriba hacia abajo) durante 1981-2010 y cada una de las ocho regiones climatológicas (código de colores) para los tres tipos de OC (Diurnas, Nocturnas y Húmedas), y para cada base de datos de temperatura (Livneh, Daymet y ERA5-Land). En cada diagrama, la línea negra es la mediana y la línea roja el promedio; los puntos son valores extremos representados por 1.5 intercuartiles por debajo del primer cuartil y 1.5 intercuartiles por arriba del tercer cuartil.

En la Figura 9 se muestran diagramas de caja y bigote por regiones para destacar de manera resumida y visual las diferencias de cada métrica y su distribución. La línea roja es el promedio. En todas las bases de datos analizadas, las OC diurnas se muestran como las más frecuentes, mientras que las nocturnas destacan por su mayor intensidad. Las OC húmedas, en general, aparecen con menor frecuencia, lo que podría ser un efecto de las limitaciones en los cálculos realizados con ERA5-Land. En términos de frecuencia y días de OC diurnas por año, la región de CAs resalta, mientras que las OC nocturnas tienen una mayor prevalencia en las regiones NEM y SBC. Las regiones que más destacan en la frecuencia de OC húmedas son DES y ANM. Se observa que la duración promedio de las OC, medida en días, presenta una variación mínima entre las diferentes regiones y tipos de eventos, todas durando un promedio aproximado de 4 días. En cuanto a la intensidad, el SBC, DES, ANM y MNZ destacan en las OC diurnas con valores de HWMI entre 25 y 30. En las OC nocturnas, las mismas regiones junto con el HPL muestran la mayor intensidad con valores cercanos a 30 en las bases observadas, especialmente el MNZ, DES y SBC, mientras que durante las OC húmedas, DES y ANM son las regiones con mayor intensidad con un HWMI de 22.

Los diagramas de la Figura 9 también permiten identificar los casos atípicos en cada índice, como Livneh y Daymet que muestran los casos más extremos en varias regiones e índices. Con Livneh, las OC diurnas extremas superan los 15 días/año en CAs, y en HPL ocurre con las OC diurnas y nocturnas. Además, se identifican valores de duración promedio superiores a 8 días, con los casos más notables localizados en ANM, MNZ Y HPL para las OC nocturnas. Las OC con intensidad de HWMI mayor a 100 ocurren especialmente en las OC nocturnas en CAs, DES, MNZ, HPL y NEM, pero también en NEM para las OC diurnas. Estos casos puntuales extremos son una oportunidad para estudios futuros.

Es de especial interés lo que ocurre con los índices de OC en la región DES. Las OC nocturnas son intensas y las OC húmedas son intensas y frecuentes, a pesar de que esta región es, por definición, seca. Esta anomalía sugiere que podrían estar influyendo procesos atmosféricos particulares, como la entrada de humedad del Golfo de California o la presencia de nubosidad asociada a eventos convectivos, que contribuyan a intensificar las condiciones de calor nocturno y húmedo.

En la Tabla 2 se muestran los promedios de los índices de OC de toda la región y las bases de datos para los tres tipos de OC. Las OC diurnas se caracterizan por ser las más frecuentes, con un promedio de 1.75 eventos al año, y acumular la mayor cantidad de días de OC, alcanzando 7.18 días por año. Su duración promedio es de 3.98 días, ligeramente superior a las nocturnas y húmedas. También presentan HWMI de 22.38. Las OC nocturnas, por su parte, ocurren en promedio 1.29 veces al año, con 5.09 días de OC, y una duración promedio de 3.83 días; sin embargo, son las más intensas de las tres, alcanzando un valor

promedio de HWMI de 24.88. Finalmente, las OC húmedas son las menos frecuentes, con 1.06 eventos al año, y los días de OC son igualmente los más bajos, sumando apenas 4.01 días por año. Su duración promedio es de 3.78 días y tienen una intensidad con HWMI de 19.83, lo que las convierte en las menos duraderas y severas. Los valores bajos de las OC húmedas puede ser reflejo de la subestimación de ERA5-Land. Cabe destacar que, aunque los tres tipos de OC pueden ocurrir de manera independiente o traslaparse en el tiempo (p. ej., una OC diurna puede coincidir con una nocturna o una húmeda en el mismo día), este análisis no consideró dichos traslapes. Por lo tanto, los valores presentados en la Tabla 2 no deben sumarse, ya que corresponden a eventos que pueden ser concurrentes o independientes.

Tabla 2. Promedios de los índices anuales de OC en toda la región de estudio para los tres tipos de OC: diurnas, nocturnas, húmedas. Los promedios se calcularon considerando las tres bases de datos utilizadas para ese tipo de OC, con excepción de las húmedas que se calculan únicamente con ERA5-Land.

	OC Diurnas	OC Nocturnas	OC Húmedas
Frecuencia (OC/año)	1.75	1.29	1.06
Días de OC (días de OC/año)	7.18	5.09	4.01
Duración (días)	3.98	3.83	3.78
Intensidad (HWMI)	22.38	24.88	19.83

3.1.4 Olas de calor sinópticas del verano extendido

Para analizar las OC de gran escala en la región, denominadas aquí como “OC sinópticas”, seleccionamos las fechas en que al menos 30% de los puntos de malla de la región presentaron temperaturas correspondientes (Tmax, Tmin o Tw) superiores a su P95 durante tres días consecutivos, utilizando una ventana móvil de 31 días. Posteriormente, se seleccionaron todos los eventos que ocurrieron en el verano extendido (abril a septiembre). En esta sección se describen las características estadísticas asociadas a los tres tipos de estas OC con Daymet (OC diurnas y nocturnas) y ERA5-Land (todos los tipos) antes de evaluar los compuestos de las variables atmosféricas. Aunque los promedios en las secciones previas abarcan 1981-2010, en esta sección también se incluyen resultados para 2011-2020.

La Figura 10 muestra que en el periodo de 1981-2010, Daymet registró 0.6 OC diurnas/año (3 días de OC /año) y solo 0.1 días de OC nocturnas/año. En contraste, ERA5-Land estimó una mayor frecuencia de días de OC para este mismo periodo: las OC diurnas alcanzaron 0.9 OC/año (4 días de OC/año), mientras que

las OC nocturnas fueron 0.3 OC/año (1 día de OC/año). Adicionalmente, con ERA5-Land se identificaron las OC húmedas de gran escala, aunque estas fueron poco frecuentes, aproximadamente 0.1 OC/año.

En el periodo más reciente, 2011-2020, ambos conjuntos de datos evidencian un aumento en la frecuencia de OC. Según Daymet, las OC diurnas se incrementaron a 2.6 OC/año (15 días de OC/año) y las OC nocturnas aumentaron notablemente a 5.1 OC/año (37 días de OC/año), representando cerca del 10% de los días en esa década. Con ERA5-Land, las OC diurnas pasaron de 0.9 eventos/año en el periodo de referencia a 2.3 eventos/año (14 días de OC/año) en los últimos 10 años, mientras que las OC nocturnas se incrementaron de 0.3 a 1.8 OC/año (11 días de OC/año). Por su parte, la frecuencia de las OC húmedas se mantuvo igual para ambos periodos, con 0.1 eventos al año.

Estos resultados indican un aumento reciente en la frecuencia de eventos de OC, especialmente las nocturnas. Sin embargo, no es claro si el aumento en la frecuencia de OC representa un cambio real en las condiciones sinópticas o si refleja un sesgo derivado de las características de las bases de datos, particularmente en el periodo más reciente, ya que no validamos los datos de Daymet y ERA5-Land con otra base de datos observada. También habría que tener en cuenta que la diferencia de duración de los periodos influye en los resultados. El primer periodo es tres veces más largo, por lo que la variabilidad interanual natural de las OCs tiene más influencia en el cálculo de la frecuencia promedio. En el segundo periodo, al haber menos datos, la estimación del promedio puede estar más sujeta a errores estadísticos.

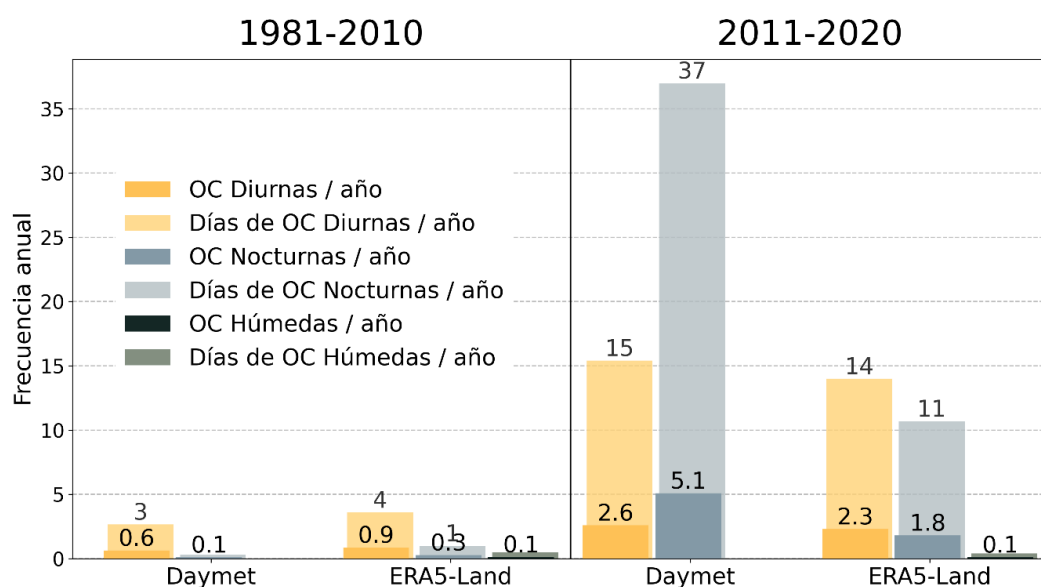


Figura 10. Número de eventos (color intenso) y duración en días (color claro) de OC diurnas (amarillo), nocturnas (azul) y húmedas (gris) durante abril-septiembre de 1981-2010 y 2011-2020 para Daymet y ERA5-Land.

Para examinar en forma resumida el comportamiento y distribución de las categorías de OC durante el periodo de referencia, la Figura 11 presenta diagramas de caja y bigotes para su extensión en área, duración promedio, temperatura promedio y temperatura máxima por día de OC. La temperatura promedio fue calculada considerando únicamente los puntos de malla cuya temperatura correspondiente superara el P95 en cada día de OC y varía entre tipos de OC debido a las diferentes métricas utilizadas (Tmax, Tmin y Tw), como se observa en la Figura 11b. La Figura 11d muestra la distribución de las temperaturas máximas por día de OC con el propósito de dimensionar la intensidad de estos eventos.

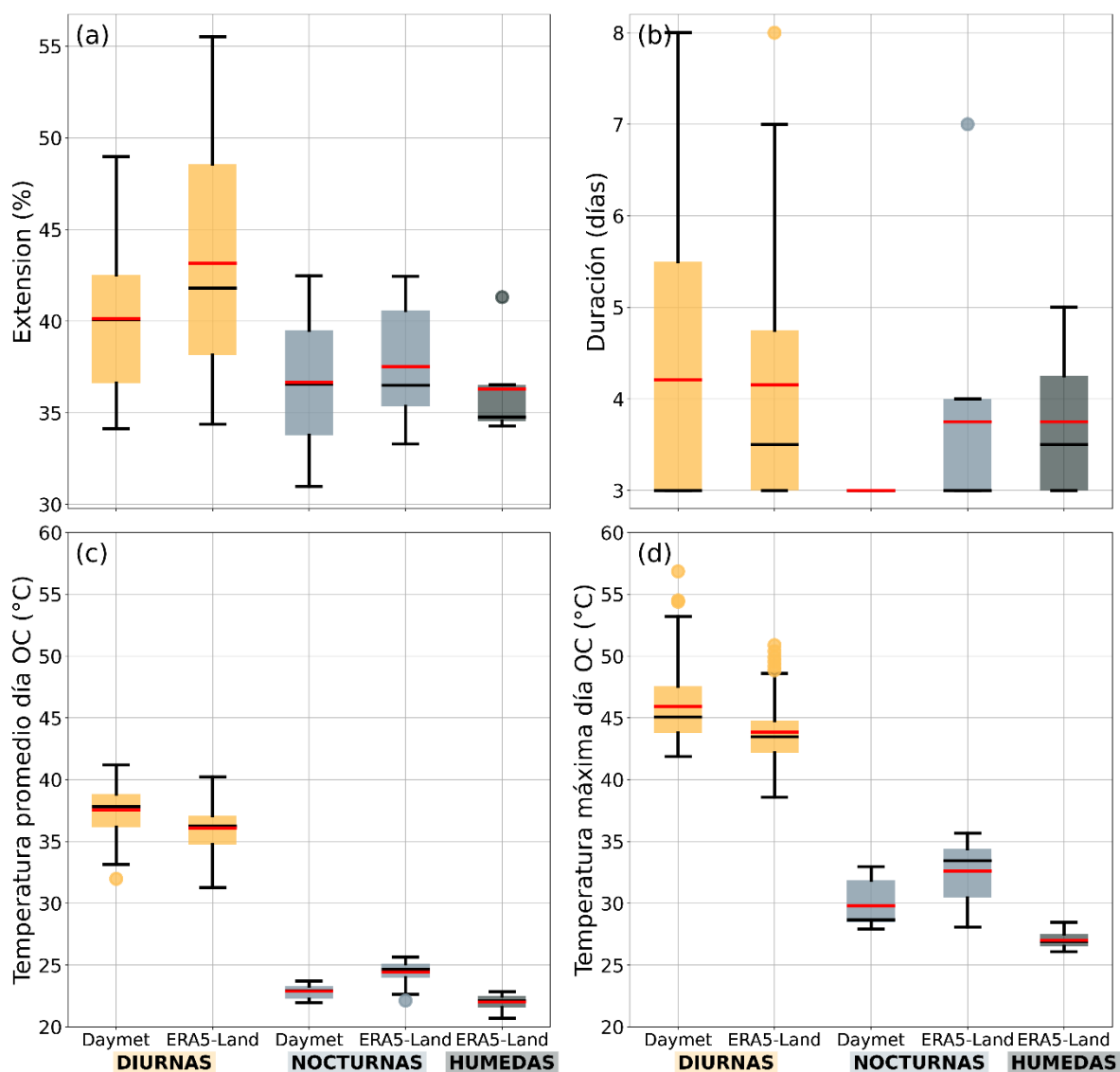


Figura 11. Diagramas de caja y bigotes de las características promedio de las OC de verano (abril-septiembre) con extensión mínima de 30% en la región de estudio durante 1981-2010. (a) Extensión (%), (b) duración promedio (días), (c) temperatura promedio (°C) y (d) temperatura máxima por día (°C) según el tipo de OC con las bases de datos Daymet y ERA5-Land para las OC diurnas (Tmax en amarillo), nocturnas (Tmin en azul) y húmedas (Tw en gris). La línea negra en cada caja es la mediana y la línea roja el promedio.

Las OC diurnas muestran mayor variabilidad en todas las métricas, como era de esperarse debido a que son más días en total. También son las que alcanzan los valores más extremos, siendo las únicas con eventos que cubren más del 50% de la región, llegan a durar más de una semana y las temperaturas son mucho más altas con Tmax superando los 50°C. Más específicamente, las OC diurnas tienen medianas con extensiones entre 40-45% de la región y de duración de 3-4 días. Además, la mediana de Tmax es de 35-40°C y su valor máximo alrededor de los 45°C.

Las OC nocturnas y húmedas, aunque con menor registro de eventos, también muestran patrones claros en sus índices. Considerando Daymet y ERA5-Land, las OC nocturnas tienen medianas de cobertura entre 35-40%, mientras que las húmedas se mantienen por debajo del 35%. En cuanto a las temperaturas, las OC nocturnas presentan una mediana de Tmin promedio de 20-25°C, al igual que la Tw de las húmedas. Sin embargo, más de la mitad de las OC nocturnas con ERA5-Land alcanzan Tmin máximas superiores a 30°C, y más de un cuarto con Daymet. Por su parte, las Tw máximas de las OC húmedas se mantienen entre 25-30°C, lo cual es alto y puede tener impactos relevantes en la salud dependiendo de su duración (Raymond et al., 2020; Wilson et al., 2024). Cabe destacar que las diferencias entre Daymet y ERA5-Land no son considerables. Si bien, ERA5-Land tiende a subestimar la temperatura de las OC diurnas y sobreestimar las de OC nocturnas, los rangos de distribución son similares. El rango reducido de la distribución de duración y temperatura promedio para las OC nocturnas con Daymet se explica porque solo se registraron tres eventos sinópticos.

Tabla 3. Número de eventos y días de OC sinópticas encontradas durante abril-septiembre de 1981-2010 utilizando ERA5-Land para cada tipo de OC.

	OC Diurnas	OC Nocturnas	OC Húmedas
Eventos de OC	26	8	4
Días	108	30	15

A partir de la siguiente sección, se utilizan las fechas de OC derivadas de ERA5-Land debido a su parecido con los resultados obtenidos con datos observados y a la mayor cantidad de eventos disponibles. La cantidad de días y eventos de OC resultantes se muestran en la Tabla 3. Se observa que las OC diurnas son las más frecuentes, mientras que las OC húmedas son las menos comunes, como se vio con la estadística de OC regionales. Cabe aclarar que seis eventos de OC se observaron durante el día y la noche, como se muestra en el Anexo A. Esto significa que 6 de las 8 OC nocturnas afectaron o intensificaron el impacto de esos eventos durante las OC diurnas correspondientes. Estos 6 eventos compuestos por OC diurnas y

nocturnas también son un área de oportunidad para investigar sus posibles impactos y sus características sinópticas y ver qué tan diferentes son de los resultados presentados en este trabajo.

3.2 Patrones sinópticos

A continuación se describen los patrones promedio de diversas variables atmosféricas para entender los efectos que los procesos físicos relevantes que ocurren en diferentes niveles verticales de la atmósfera tienen sobre la temperatura en superficie durante cada tipo de OC en la región de estudio. El periodo analizado es de 1981-2010 para el verano extendido de abril a septiembre y corresponden a las OC sinópticas, que en este trabajo se definieron como las que cubrieron por lo menos un 30% del dominio de estudio. En el Anexo A se muestran las fechas de cada tipo de OC.

3.2.1 Olas de calor diurnas

En la Figura 12 se observa la climatología de diversas variables atmosféricas asociadas a las 26 OC diurnas del verano extendido de 1981-2010, así como los patrones correspondientes a los compuestos de días de OC diurnas y la anomalía entre los dos. La primera columna es la climatología del verano y muestra que típicamente entre abril y septiembre la T2m mayor a 25°C se concentra alrededor del Golfo de México y el Golfo de California, la mayor OLR (290-305 W/m²) generalmente asociada a menor nubosidad o a cielos despejados se ubica en las regiones de CAs y el DES, mientras que la Sierra Madre Occidental presenta mayor nubosidad, con valores de OLR menores a 230 W/m². También, la máxima q850 varía entre 10-12.5 g/kg en el NEM, disminuyendo por debajo de 5 g/kg en el DES. El espesor promedio de la capa troposférica media (Th850-500, que es proporcional a la temperatura promedio de la capa) varía entre 4.3 y 4.4 km; durante OC diurnas la capa aumenta entre 30 y 60 m por arriba de la climatología, siendo mayor sobre la región fronteriza de México-Estados Unidos. La climatología de los vientos a 850 hPa (uv850) muestra la presencia de los anticiclones subtropicales del Pacífico y del Atlántico norte, típicos del verano, con valores máximos cerca de los 32°N, así como la influencia de los vientos alisios (con dirección proveniente del sureste) cruzando el Golfo de México y la presencia del jet de bajos niveles del Caribe (CLLJ, por sus siglas en inglés) con vientos máximos del este (~12 m/s) al norte de Colombia. En el nivel de 500 hPa destacan la corriente en chorro que atraviesa Estados Unidos de oeste a este cerca de 45°N.

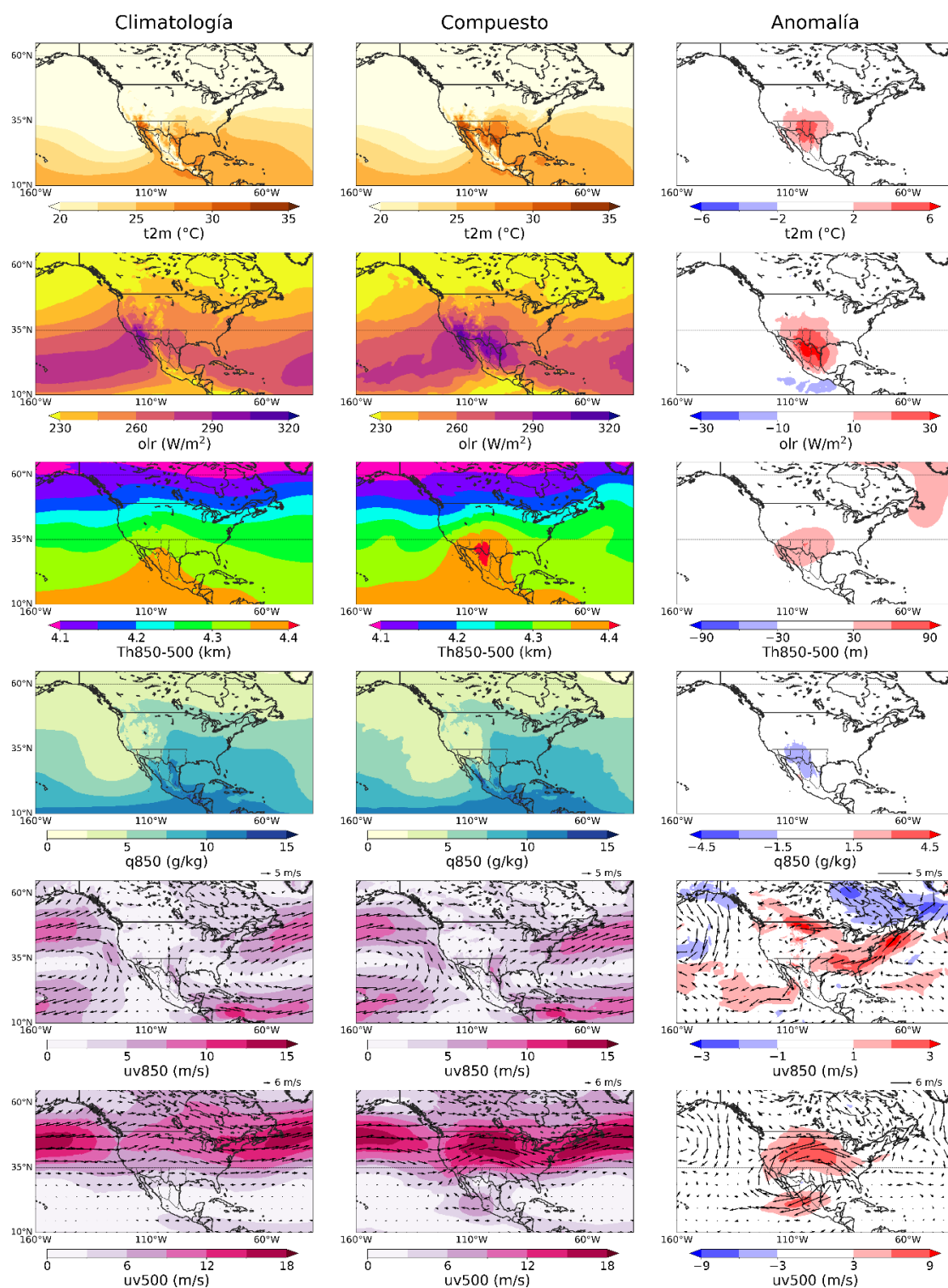


Figura 12. Climatologías de seis variables atmosféricas asociadas a las OC durante abril-septiembre de 1981-2010 (primera columna), climatología durante los compuestos de días de OC diurnas de escala sinóptica (segunda columna) y anomalías diarias (tercera columna) durante OC diurnas con respecto a la climatología (primera columna). (Fila 1) temperatura a 2 metros (T2m), (fila 2) radiación de onda larga saliente (OLR), (fila 3) espesor de la capa de 850-500 hPa (Th850-500), (fila 4) humedad específica a 850 hPa (q_{850}), (fila 5) vectores de viento a 850 hPa (uv_{850}) y (fila 6) vectores de viento a 500 hPa (uv_{500}) con datos de ERA5. Las líneas grises delimitan las regiones climáticas de la región de estudio alrededor de la región fronteriza México-Estados Unidos.

Conociendo las condiciones características del verano, procedimos a evaluar los compuestos para los días de OC diurnas y sus anomalías. En primer lugar, la T2m aumenta entre 2-6°C, especialmente en el HPL y el suroeste de Estados Unidos, llegando a promedios entre 30-35°C en DES y NEM. Esto podría explicarse a partir de la anomalía positiva de OLR, donde se observa un aumento de al menos 10 W/m² en toda la región, llegando a más de 30 W/m² sobre el NEM y el HPL, relacionado con cielos despejados y la presencia de un anticiclón de altura. El anticiclón se asocia con calentamiento en la capa troposférica (Th850-500), la cual es 30-60 m más alta sobre la región durante OC diurnas. Además, estos eventos muestran una anomalía negativa de q850 de -1.5 a -3 g/kg sobre la misma región fronteriza.

En el Golfo de México y el Caribe, los vientos alisios normalmente transportan humedad al este de México y al sur de Estados Unidos lo que favorece inestabilidades convectivas, la formación de nubes y ascenso orográfico sobre la Sierra Madre Oriental. En contraste, durante las OC del norte de México se observa un debilitamiento de los alisios, generando en las anomalías vientos contra-alisios sobre el norte del Golfo de México y el sureste de Estados Unidos, reduciendo así la entrada de humedad al continente, factor que se corrobora con la q850 (Figura 12, cuarta fila). En el noroeste de México, los vientos son del continente hacia el Pacífico, lo que tampoco favorece la entrada de humedad a esa región. Por la presencia del anticiclón, en niveles bajos esperaríamos ver los efectos de la subsidencia y, en efecto, en el compuesto de uv850 se observan vientos débiles en el centro de la región de estudio, en contraste con el viento que pasa a los alrededores o hacia fuera. Especialmente sobre TEX se nota un aumento de una corriente en dirección hacia el noreste, cruzando la costa este de Estados Unidos. El centro del anticiclón subtropical del Atlántico Norte está ligeramente más al norte que en la climatología, pero es débil en comparación con el del Pacífico, mientras que la CLLJ no muestran cambios significativos.

A 500 hPa, el jet del Pacífico se encuentra a 46°N, dominando el verano de las latitudes medias. En las anomalías del compuesto de las OC, se observa claramente un anticiclón de altura intenso sobre todo el norte de México, centrado en la región fronteriza, que no se observa a 850 hPa. Este anticiclón, si se desplazara más al norte, se asemejaría al anticiclón asociado con las lluvias monzónicas en el noroeste de México. Sin embargo, su ubicación sobre la región de estudio implica subsidencia y menos cobertura de nubes. La advección de humedad podría ocurrir del Golfo de México hacia el centro y sur del país; sin embargo, en el norte esta advección se ve bloqueada por el anticiclón.

Las anomalías de uv500 muestran un patrón de tres anticiclones, el del norte de México y a los lados en el Pacífico y Atlántico norte, con este último más débil. Todas las variables indican claramente que hubo forzamientos térmicos (calentamiento en la capa, incremento del grosor troposférico, menor cobertura

de nube) y dinámicos (un anticiclón sinóptico centrado en la región fronteriza y menos entrada de humedad al norte de México) durante las OC diurnas.

Por otro lado, en la Figura 13 se observa, en el mismo formato que la figura anterior, la variable de la adv q_{850} . Lo primero que resalta en la climatología es el efecto de sombra orográfica que se genera por la Sierra Madre Oriental, donde la humedad acarreada desde el Golfo de México primero genera una adv q_{850} positiva en la costa oriental, con valores mayores a 3×10^{-5} (g/kg)/s. Después, en regiones más altas, se observa adv q_{850} negativa de la misma magnitud. Al comparar esto con el compuesto de OC diurnas, se nota un pequeño incremento en TEX y la costa este de Estados Unidos y una reducción de adv q_{850} en el NEM y la costa este mexicana. Esto último coincide con el debilitamiento de los vientos alisios en uv850 sobre el Golfo de México. Por otro lado, hay un pequeño aumento de adv q_{850} sobre la Sierra Madre Occidental (de 1 a 1.5×10^{-5} (g/kg)/s).

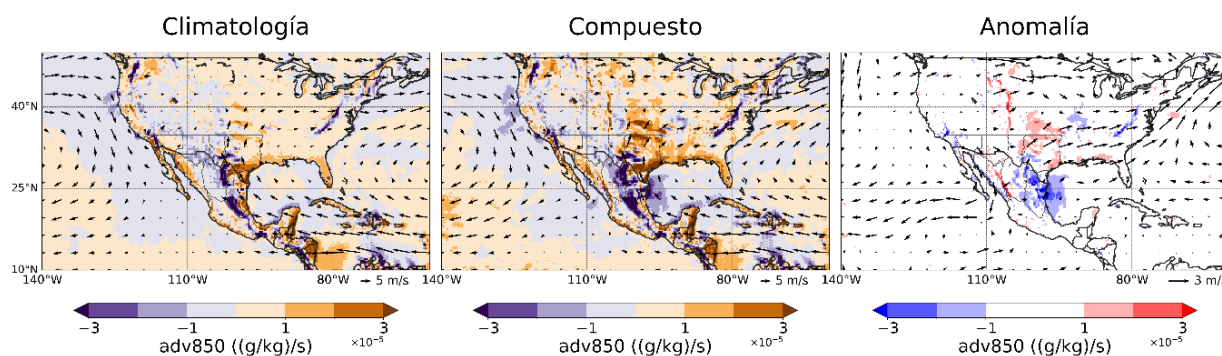


Figura 13. Climatologías, compuestos de días de OC diurnas y anomalías diarias promedio para el verano extendido de advección de humedad a 850 hPa (adv q_{850}) con datos de ERA5 para 1981-2010.

3.2.2 Olas de calor nocturnas

Durante los ocho episodios de OC nocturnas se observa una anomalía de T2m positiva de 4 a más de 6°C, no solo en la región de estudio, sino también en áreas del sur de Estados Unidos y Canadá (Figura 14). La región bajo análisis presenta temperaturas mayores a 35°C. En las anomalías destaca la Sierra Madre Occidental por tener menor cambio de T2m (aumento de 0-4°C), una característica que no se observa durante las OC diurnas, posiblemente debido a que la temperatura en altura no varía tanto durante la noche.

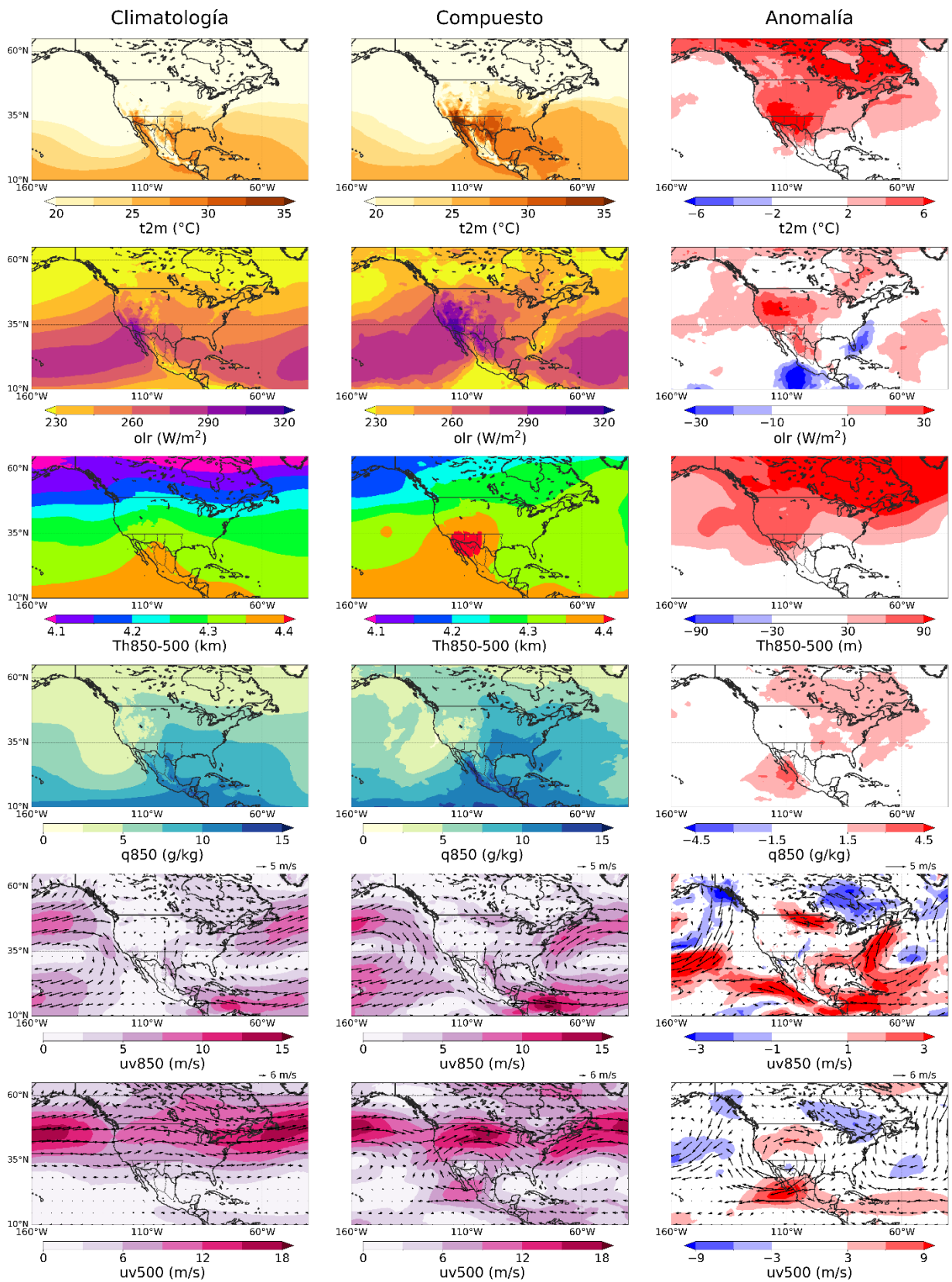


Figura 14. Igual que la Figura 12, pero para las OC nocturnas.

Las anomalías de OLR muestran valores positivos de entre 10 y 30 W/m^2 sobre la región de estudio, a excepción del MNZ donde no se observan cambios relevantes. Los valores más altos de anomalías se observan en el oeste de Estados Unidos con un aumento de más de 30 W/m^2 . En contraste, se observan valores negativos al sur de México, el Golfo de México y Florida con menos de -30 W/m^2 . Esto indica que las OC nocturnas se asocian a cobertura de nubes reducida en la región de estudio y en el suroeste de Estados Unidos y con mayor nubosidad y posible convección sobre los océanos al sur y oeste de la región. La q850 presenta una anomalía positiva, particularmente en la Sierra Madre Occidental y la región del MNZ y SBC, con valores que oscilan entre 1.5 y 4.5 g/kg. Por otro lado, en el resto de la región no se observan anomalías relevantes. Otras anomalías positivas se notan sobre el sur de Estados Unidos, incluido TEX y Canadá. Este contraste sugiere variaciones en la distribución de humedad, posiblemente influenciadas por patrones regionales de circulación.

El Th850-500 aumenta especialmente al noroeste de México y oeste de Estados Unidos, en donde coincide con el anticiclón que se presenta en uv500 con vientos superiores a 12 m/s, sobre ANM y parte del MNZ. Además, la corriente en chorro en el compuesto promedio se muestra más zonal que en las OC diurnas. Este patrón es ligeramente diferente al de las OC diurnas por la posición más al noroeste y la uv500 más intensa (anomalía > 9m/s) sobre la boca del Golfo de California. Aparecen anomalías positivas de Th850-500 (60 a más de 90 m) sobre gran parte de Canadá y el compuesto de uv500 también muestra anticiclones sobre el Pacífico Norte y el Atlántico Norte. El patrón de tres anticiclones se observa mucho más claro que en las OC diurnas, pudiendo estar relacionado con una onda planetaria.

En la anomalía de uv850, también se observan los anticiclones subtropicales más intensos, especialmente el del Atlántico Norte, mientras que en las diurnas el más intenso fue el del Pacífico. Asociado, se observa un aumento en la intensidad de los vientos del sur sobre el Golfo de México y del CLLJ, con vientos alisios > 3 m/s durante los días de OC nocturnas, situándose este último ligeramente más al sur en latitud. Este patrón podría generar mayor advección de humedad a TEX, coincidiendo con las anomalías de q850 y T2m sobre el océano. Las corrientes de viento se intensifican también en el sur de México y en la frontera entre Canadá y Estados Unidos.

Los resultados de adv q850 (Figura 15) muestran patrones similares a los de las OC diurnas, resaltando la advección positiva en la climatología promedio en el este de México, el sureste de Estados Unidos y el Caribe y una fuerte sombra orográfica en la Sierra Madre Oriental. Las anomalías muestran una reducción de advección de humedad hacia NEM y el HPL. En cambio, sobre la Sierra Madre Occidental se observan anomalías positivas de advección, como en el caso de las OC diurnas, y también en partes del sureste de

Estados Unidos. Esto coincide con la intensificación de los vientos del sur (uv850) sobre el Golfo de México, lo que explica la fuente de q850 en gran parte de TEX y el sureste de Estados Unidos. Por otro lado, la disminución de adv q850 alrededor del Golfo de California contrasta con el aumento de q850 visto en la Figura 14. Otra manera por la que podría aumentar la humedad en este tipo de OC es a través de la evaporación por la mayor temperatura sobre el Golfo de California.

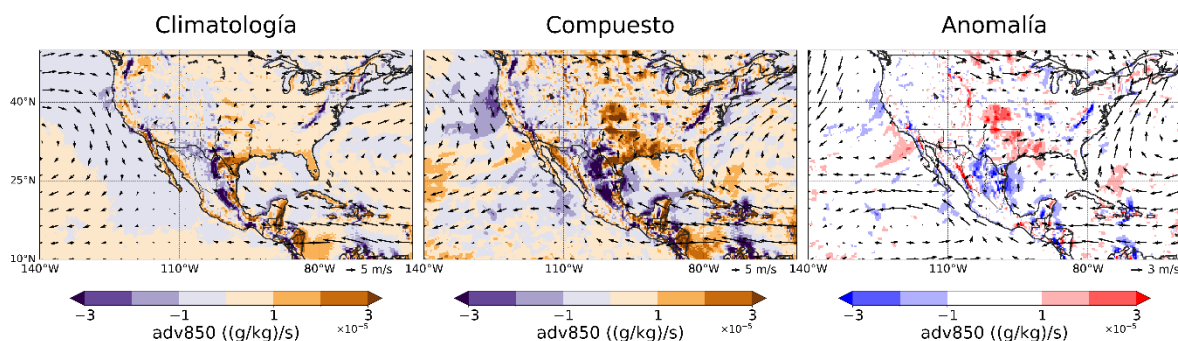


Figura 15. Igual que la Figura 13, pero para las OC nocturnas.

3.2.3 Olas de calor húmedas

Los resultados de la Figura 16 muestran que las cuatro OC húmedas observadas en la región se caracterizan, en promedio, por un incremento de T2m que varía entre 2 y 6°C, siendo más intensos en la región fronteriza y el sur de Estados Unidos, donde las temperaturas alcanzan entre 30-35°C. Solo en DES la T2m sobrepasa los 35°C, pero menos que en las OC nocturnas. La OLR presenta anomalías mixtas: positivas en NEM, TEX y gran parte de Estados Unidos, especialmente en Nevada, y negativas en el oeste de México, particularmente en la región MNZ al oeste de la Sierra Madre Occidental, el Golfo de California, una sección de SBC y la región del Pacífico Norte que se encuentra al sur de México. Este patrón indica un aumento de nubosidad al noroeste de México y cielos despejados al noreste de la región. La q850 muestra anomalías positivas en la zona de interés, especialmente sobre las regiones SBC, DES, MNZ y HPL (>4.5 g/kg), y sobre la costa oeste de Estados Unidos. Las únicas disminuciones ocurren sobre el Atlántico Norte. La anomalía negativa de OLR coincide con el patrón espacial sin anomalía de T2m sobre el MNZ, justo al oeste de la Sierra Madre Occidental. Sobre la región del Golfo de California se observa un aumento general de humedad, sin ningún cambio de temperatura, pero con mayor cobertura de nubes de acuerdo con las anomalías negativas de OLR (-30 W/m²). En cambio, donde hubo aumento de T2m, se mantuvo despejado.

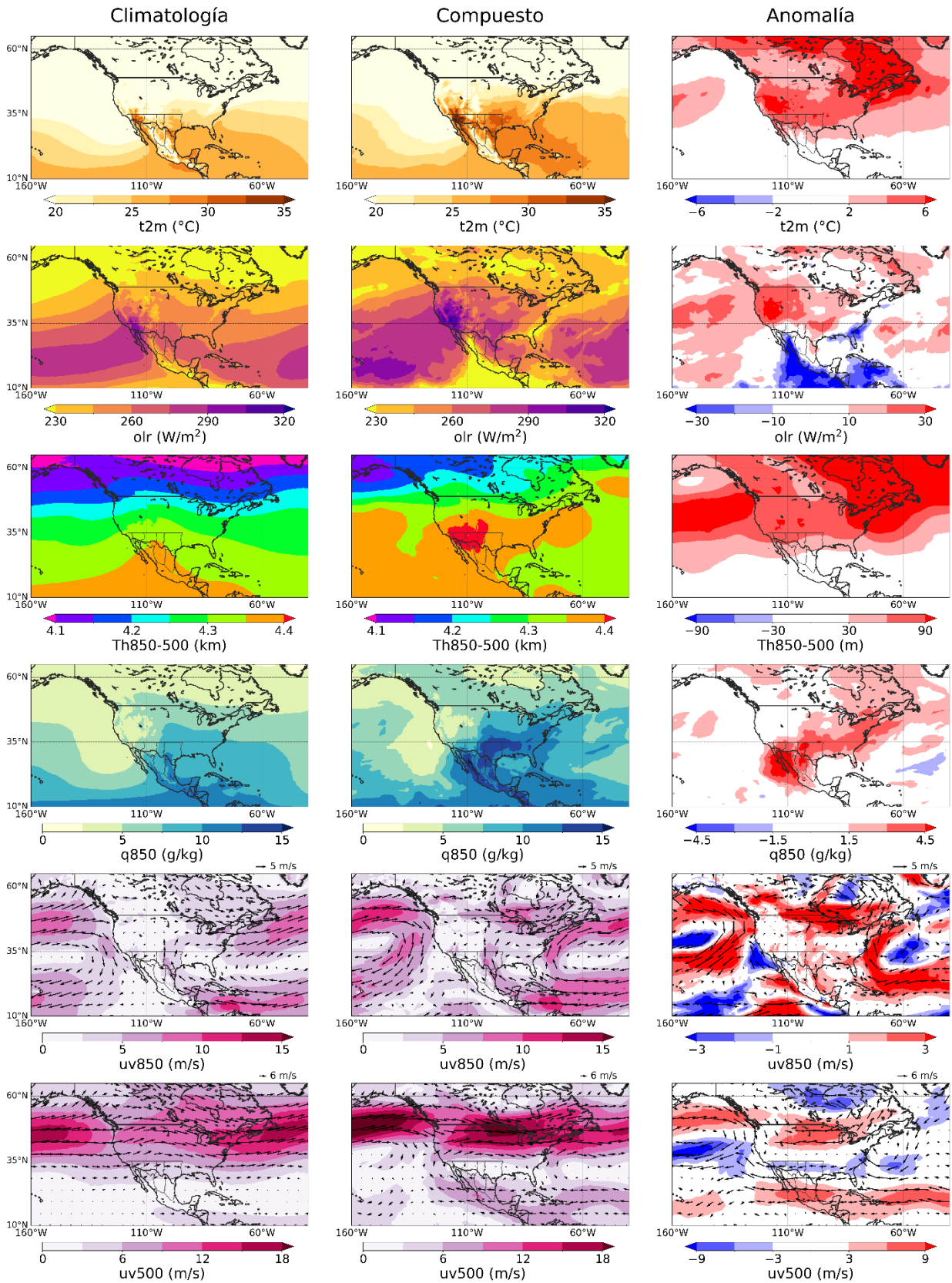


Figura 16. Igual que la Figura 12, pero para las OC húmedas.

En el patrón de los vientos en niveles bajos (850 mb) se observan los anticiclones subtropicales del Pacífico y Atlántico Norte más intensos de los tres tipos de OC, con anomalías de uv_{850} mayores a 3 m/s, y se localizan más al norte que en la climatología. Asimismo, los vientos alisios muestran una intensificación moderada de 1 a 1.5 m/s sobre el Golfo de México y la dirección anómala resultante indica mayor flujo hacia NEM y TEX, lo que favorece el transporte de humedad a estas regiones. En niveles altos (500 mb), a diferencia de los demás tipos de OC, la presencia de un anticiclón dominante no es clara. En cambio, se observa un patrón con tres centros de circulación anticiclónica sobre el Océano Pacífico Norte, la zona de estudio y el Océano Atlántico Norte. En el compuesto de $Th_{850-500}$ se puede ver un máximo de espesor sobre la región, pero en las anomalías se nota que el aumento ocurre de manera zonal. El mayor aumento de espesor (90 m) ocurre en donde se encuentran los anticiclones subtropicales. La anomalía de espesor coincide con el de la $T2m$, siendo mayor en el norte con valores de 30-90 m. Por otro lado, la dirección de uv_{500} sobre la región también favorece el transporte de humedad desde el Golfo de México hacia el oeste. Estos patrones indican una circulación que combina temperaturas elevadas con alta humedad, que era de esperarse para las OC húmedas en la región estudiada. Sin embargo, solo se encontraron 4 OC húmedas en el periodo de estudio, por lo que esto podría ser la razón de que no se observe un anticiclón cerrado sobre el continente.

De manera complementaria, la adv_{q850} presenta una anomalía positiva sobre NEM y TEX de más de 3×10^{-5} (g/kg)/s, coincidiendo con la entrada de vientos alisios desde el Golfo de México. En contraste, se observan anomalías negativas sobre el HPL, la península de Baja California y la costa del Golfo de California. Esto sugiere que el aumento de q_{850} en estas regiones no se debe a la advección. En el caso de HPL, la convección local y el ascenso orográfico son los procesos principales de precipitación. Estos factores, sumados al aumento de la temperatura, podrían aumentar la q_{850} . Además, los cuatro eventos de OC húmedas se registraron en verano (junio, julio y agosto), estación de mayor precipitación para HPL. Esto podría explicar la anomalía negativa de OLR sobre la región. En cambio, en los alrededores del Golfo de California, donde el aumento de q_{850} es especialmente fuerte pero la adv_{q850} es negativa o cero, la respuesta puede deberse a un proceso similar o al aumento de la evaporación forzado asociado a las anomalías de $T2m$. Sin embargo, consideramos que los resultados de las OC húmedas no son concluyentes por tener una muestra muy pequeña de eventos.

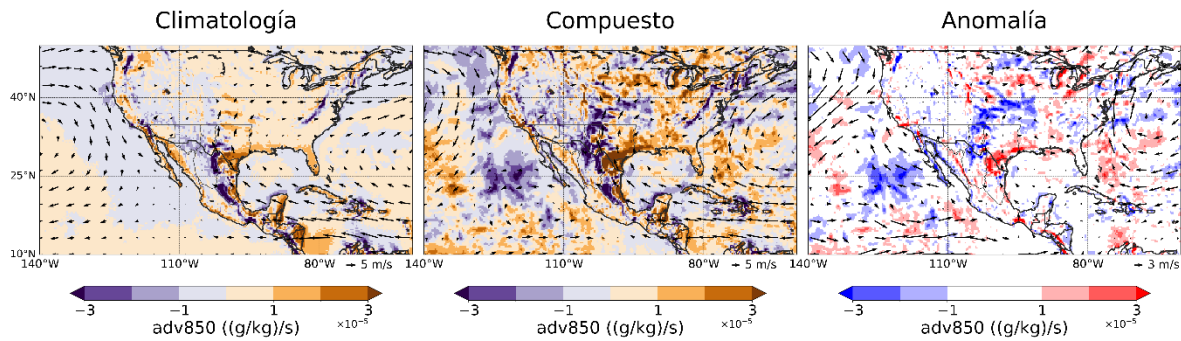


Figura 17. Igual que la Figura 13, pero para las OC húmedas.

3.2.4 Síntesis

Después de analizar exhaustivamente el comportamiento promedio de las variables atmosféricas durante los días de los tres tipos OC, resalta que cada OC tiene factores dinámicos y termodinámicos distintos, pero algunos factores son comunes. Este subcapítulo sintetiza las características más destacables de las OC diurnas, nocturnas y húmedas en el norte de México y sur de Estados Unidos. Las OC diurnas se caracterizan por aumentos de T2m de 2-6°C centradas en la región fronteriza de México-Estados Unidos. Estos eventos se asocian con cielos despejados y menos humedad, especialmente en NEM y HPL, debido a que los vientos alisios se reducen. En niveles bajos, los vientos alisios pierden intensidad en el Golfo de México y reducen la entrada de humedad a la región de estudio. En niveles altos, se forma un anticiclón centrado en la frontera entre México y Estados Unidos, con subsidencia y calentamiento en la región. A gran escala, se observan también los anticiclones del Pacífico, fortalecido, y del Atlántico Norte (más débil que el del Pacífico).

Las OC nocturnas presentan T2m más altas que las OC diurnas, desde 2 hasta más de 6°C, en la región de estudio, además del resto de Estados Unidos y Canadá. Sin embargo, en la Sierra Madre Occidental, este aumento es menos pronunciado, con valores de 2-4°C. Los cielos también son despejados en la región de estudio, y la advección de humedad es mayor en TEX y sur de Estados Unidos a través del Golfo de México. En los niveles superiores, se identifican anticiclones subtropicales intensos a 850 hPa, especialmente el del Atlántico Norte, lo que ocasionó un CLLJ y vientos alisios más intensos, pero con vientos del sur en el Golfo de México lo que desvió la entrada de humedad hacia el sureste de Estados Unidos. En cambio, a 500 mb, se observa un anticiclón centrado más hacia la región fronteriza en el noroeste de México, el cual forma parte de una serie de tres anticiclones a una latitud similar.

Por último, las OC húmedas también se caracterizan por temperaturas de 2 a 6°C más altas en el norte de la región, con algunos puntos que llegan a aumentar más de 6°C sobre el suroeste de Estados Unidos y Canadá. La humedad aumenta en toda la zona y la costa sureste de Estados Unidos, con máximos de más de 4.5 g/kg en SBC, MNZ, DES, HPL. Hay cielos despejados en el noreste y el este de Estados Unidos, pero más nubosidad en el noroeste de México, donde no hubo cambio significativo de temperatura. La adv q850 de humedad positiva explica el aumento de humedad en NEM, TEX y la Sierra Madre Occidental. En cambio, en el resto de la región esto podría estar asociado a otro proceso, como la convección local. En niveles bajos, las OC húmedas tienen los anticiclones subtropicales más intensos de los tres tipos de OC y desplazados hacia el norte. Además, se observa un ligero incremento en la intensidad de los vientos alisios en el Golfo de México que por el cambio de dirección permite la advección de humedad hacia el este de la región. En los niveles superiores, parecen formarse tres centros de circulación anticiclónica alineados, y sobre el continente la circulación anticiclónica es elongada y no cerrada como en el caso de las OC diurnas y nocturnas.

En general, las tres categorías de OC comparten como factor común la influencia de un sistema de alta presión persistente en niveles altos, mayor calentamiento de la tropósfera media y superficial, y más salida de OLR, la cual se asocia con cielos despejados y por lo tanto más entrada de radiación solar. Las diferencias clave radican en la presencia y el origen de la humedad, lo que podría modificar la intensidad de la estabilidad estática de la atmosférica. La Sierra Madre Occidental presenta advección positiva de humedad durante OC diurnas, nocturnas y húmedas, mientras que en el noreste de México la advección es negativa durante las OC diurnas y nocturnas debido al debilitamiento de los alisios. Estas distinciones ayudan a comprender la variabilidad espacial y temporal de las OC en el área de estudio.

Capítulo 4. Discusión

El presente trabajo tuvo como objetivo determinar índices climáticos para caracterizar tres tipos de OC a escala anual en el norte de México y el sur de los Estados Unidos, así como identificar los patrones atmosféricos asociados a las OC de escala sinóptica durante el verano extendido. Este es el primer estudio que sintetiza tanto el comportamiento como las causas de las OC diurnas, nocturnas y húmedas en esta región específica. Para garantizar la robustez de los resultados, se utilizaron tres bases de datos en malla (Livneh, Daymet y ERA5-Land) correspondientes al periodo 1981-2010. Se evaluaron la distribución espacial de la frecuencia, el número de días de OC al año, la duración y la intensidad para cada tipo de OC. Las bases de datos mostraron resultados espaciales similares para las OC diurnas y nocturnas. En cuanto a los patrones sinópticos, se seleccionaron las OC que cubrieran al menos el 30 % de los puntos de malla, evaluando su extensión espacial, duración y temperaturas promedio y máxima con datos de ERA5-Land para el verano extendido (abril-septiembre) del mismo periodo. Los días consecutivos de estas OC se analizaron para obtener compuestos y anomalías de diversas variables atmosféricas de ERA5 en superficie y a distintos niveles de la atmósfera (T2m, OLR, Th850-500, q850, uv850, uv500 y adv q850) para tener un diagnóstico de los forzamientos que las generan.

Los resultados revelaron que las OC diurnas ocurren, en promedio, 1.75 veces/año con 7.18 días de OC/año, siendo más frecuentes en la península de Baja California y el centro de México. Su duración media es de 3.98 días, con un HWMI promedio de 22.38 por punto de malla, destacando el noroeste de México en la región del Golfo de California. Para contextualizar la intensidad promedio, del 30 de agosto al 5 de septiembre de 2022 ocurrió una OC de extensión continental que afectó desde Baja California hasta Groenlandia, atravesando el oeste de Estados Unidos y Canadá. Este evento generó un pico anómalo de deshielo en septiembre en Groenlandia (NASA Earth, 2022) y temperaturas máximas superiores a 40°C en Ensenada, con un HWMI acumulado de 40 en el noroeste de Baja California según nuestros datos.

Para resumir los patrones sinópticos, la Figura 18 muestra un diagrama conceptual de los mecanismos asociados a los tres tipos de OC analizadas. Las OC diurnas se caracterizan por la presencia de un anticiclón intenso en niveles altos sobre la región fronteriza, aumentos significativos de temperatura en superficie y mayor salida de OLR, así como reducción de humedad específica y vientos alisios más débiles en el Golfo de México (Figura 18a). Algunos de estos factores coinciden con los mecanismos descritos en la literatura para otras regiones, especialmente el sistema sinóptico de alta presión en la tropósfera media (Chen et al., 2023; Ortiz Martin, 2023; Wu et al., 2023).

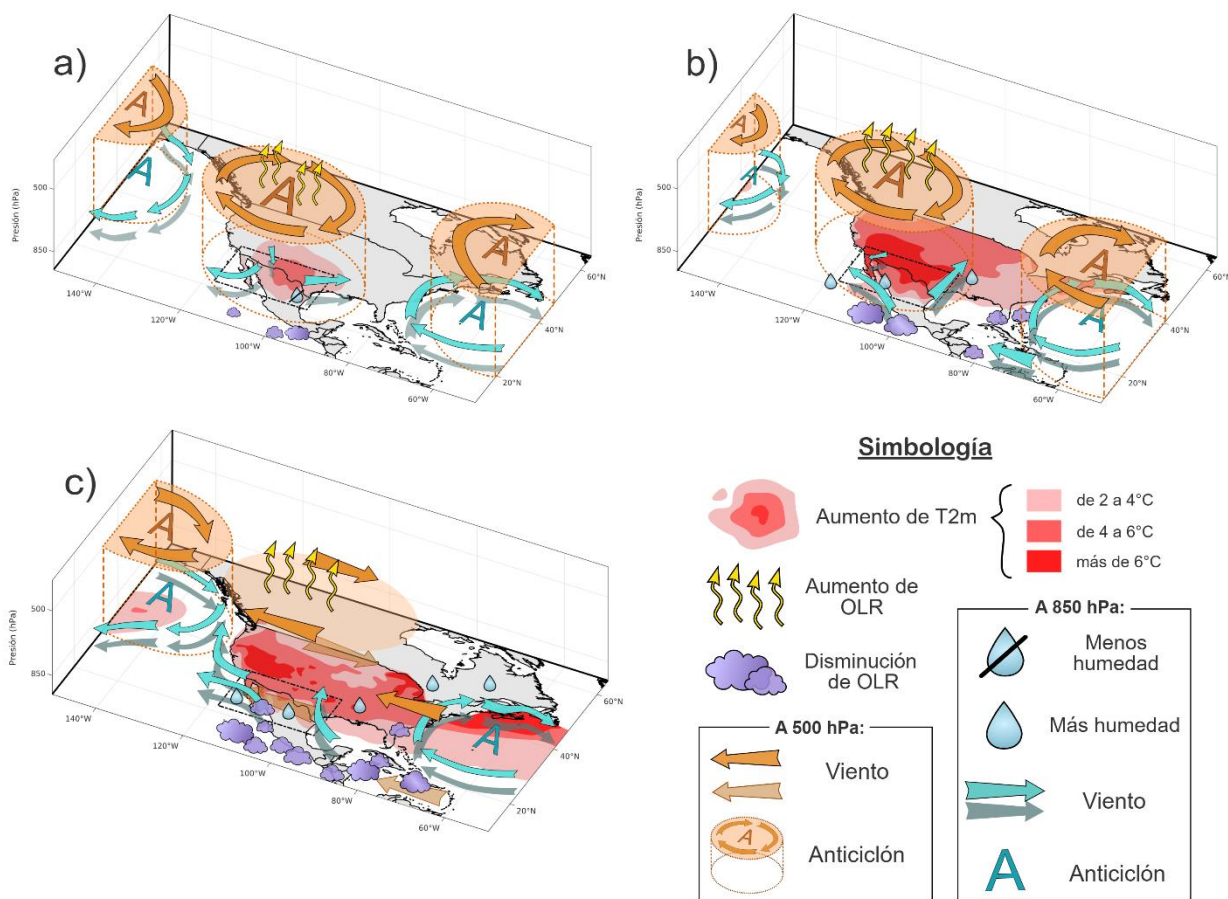


Figura 18. Principales patrones sinópticos basados en las anomalías de (a) OC diurnas, (b) OC nocturnas y (c) OC húmedas del norte de México y sur de Estados Unidos en el verano extendido de 1981-2010. En cada caso, el mapa se presenta en el plano XY, con la región de estudio delimitada por un recuadro punteado, mientras que el eje Z representa los niveles de presión. La circulación en azul corresponde al nivel bajo (850 hPa) y la circulación en naranja al nivel alto (500 hPa).

Fenómenos como los sistemas de alta presión casi estacionarios o “blocking highs” (Perkins, 2015), los bloqueos atmosféricos en los que un anticiclón en altura queda delimitado por dos bajas presiones, conocidos como “omega blocks” (Zschenderlein et al., 2019), y las ondas de Rossby cuasiestacionarias (Kornhuber et al., 2020; Chen et al., 2023) suelen ser responsables de mantener el anticiclón en una misma región por un periodo prolongado, lo que incrementa la temperatura en superficie por subsidencia y por advección horizontal de temperatura. En este trabajo se encontró que en las zonas del anticiclón continental la OLR se incrementó hasta 30 W/m^2 ; varios estudios han reportado una correlación negativa estadísticamente significativa entre la precipitación y nubosidad en los trópicos y la OLR (Xie y Arkin, 1998; Allan et al., 1999).

Las condiciones dominantes de tres OC que afectaron a casi todo México en la primavera del 2024, pero especialmente el centro y este del país, son consistentes con lo observado durante las OC diurnas

sinópticas en este trabajo: anticiclón del Pacífico norte muy intenso y otro sobre México, pero localizado en el centro del país por ser un evento de primavera, lo que generó un domo de calor y disminución de entrada de humedad al este de México (Cavazos, 2024). Las OC de la primavera 2024 también presentaron un anticiclón del Atlántico Norte más débil, lo que redujo la entrada de vientos alisios a México (Cavazos, 2024). Ortiz Martin (2023) estudió las OC diurnas en el centro de México durante 1979-2021 y encontró que las anomalías positivas de T_{max} a 700 hPa llegaban a la región de dos maneras: desde el continente, provenientes de Estados Unidos, o desde el océano, debido al calentamiento del Pacífico Norte; por ejemplo, una de las OC de 1998 estuvo asociada a un anticiclón formado por una onda de Rossby que se propagó del Pacífico a México. En el caso de las 26 OC diurnas para el norte de México y sur de Estados Unidos aquí detectadas, las anomalías muestran tres anticiclones alineados casi en la misma latitud (aproximadamente a 30-46°N). Sin embargo, el análisis compuesto no es concluyente para vincular este patrón a una onda de Rossby, ya que requiere un estudio de propagación de ondas o evolución de los eventos que se puede realizar en el futuro.

Las OC nocturnas ocurren 1.29 veces/año con 5.09 días de OC/año. Son más frecuentes en las costas, donde su duración media es de 3.83 días y presentan una intensidad de 24.88 HWMI, siendo en promedio las más intensas de los tres tipos de OC. Estos eventos generaron incrementos de T_{2m} de 2 a 6 °C en la región de estudio, Estados Unidos y Canadá. Además, están asociados con incrementos de humedad y OLR. Wu et al. (2023) observaron fenómenos contrastantes al estudiar las OC nocturnas globales durante 1979–2020, destacando un aumento de nubosidad que atrapa la radiación terrestre, generando calentamiento nocturno. En el análisis sinóptico que se muestra en la Figura 18b, se identificó un incremento de humedad sobre el Golfo de California y el este de Estados Unidos y Canadá, acompañado de la intensificación del anticiclón subtropical del Atlántico Norte en niveles bajos. Las OC nocturnas en China también se relacionaron con el fortalecimiento de los anticiclones subtropicales que rodean la zona afectada (Luo et al., 2022a). Los estudios previos de Thomas et al. (2020) señalaron que las OC nocturnas en Estados Unidos se asocian con la advección de temperatura y humedad del océano hacia el continente, reforzadas por el jet de bajos niveles de las Grandes Planicies. En nuestro caso, se intensificaron el CLLJ y los vientos del sur sobre el Golfo de México (asociados posiblemente al jet de las Grandes Planicies) (Figura 18b). Factores como la evapotranspiración y la humedad del suelo también desempeñan un papel clave en estos eventos.

El análisis de las OC húmedas indicó que estas ocurren 1.06 veces con 4.01 días de OC/año. Se concentran en la península de Baja California, y el noroeste y centro de México, con una duración media de 3.78 días e HWMI de 19.86. Los valores bajos de todos sus índices a comparación de las demás OC podrían deberse

a la subestimación de los extremos de la única base de datos utilizada para su cálculo, ERA5-Land, vista desde las climatologías de P95 (Figuras 2 y 3). Para las OC sinópticas húmedas, limitadas a solo cuatro eventos detectados con ERA5-Land, los patrones sinópticos asociados (Figura 18c) incluyen aumentos de T2m (2-6°C), q850 (hasta 4.5 g/kg) y nubosidad sobre el Golfo de California y la Sierra Madre Occidental (de acuerdo con las anomalías negativas de OLR), junto con un anticiclón superior más alargado sobre la región fronteriza de México-Estados Unidos y advección positiva de humedad hacia NEM y TEX.

Los centros de acción de temperatura y presión de las OC húmedas en nuestro estudio coincidieron con la zona de mayor intensidad de 3 OC diurnas del verano de 2021 que ocurrieron casi seguidas sobre México, Estados Unidos y Canadá. Estos eventos fueron asociadas a domos de calor casi-estacionarios (Lo et al., 2023), las cuales establecieron récords de temperatura, y a valores de Tw mayores al umbral crítico para la salud (31°C; Vecellio et al., 2022) en los tres países (Cvijanovic et al., 2023). Comparaciones entre OC húmedas y secas han mostrado que sus características dependen de las condiciones climáticas locales predominantes y que una se puede convertir en la otra al moverse de región (Chen y Li, 2017; An y Zuo, 2021). En Asia Oriental han establecido seis categorías de OC en la literatura, combinando su nivel de humedad (seca o húmeda) con el momento del día (diurna, nocturna o compuesta) (Liu, et al., 2024) y han identificado que las húmedas se asocian a anomalías anticiclónicas formadas localmente que generan procesos de retroalimentación entre el calentamiento de superficie, la humedad y el flujo de calor latente (Ha et al., 2022). Este tipo de OC es de especial importancia por su incremento en la afectación humana (Russo et al., 2017). Recientemente se encontró una relación entre los extremos de calor húmedo con un incremento en la mortalidad de jóvenes en México (Wilson et al., 2024).

Otra particularidad encontrada en nuestro estudio fue que la región del HPL tuvo OC nocturnas muy intensas (HWWMI promedio de 26.44) y OC húmedas frecuentes (1.25 OC húmedas/año con casi 5 días de OC/año). Al comparar esto con los compuestos de OC nocturnas, vemos que la región muestra un gradiente de sur (2°C) a norte (6°C) en las anomalías de temperatura. También se caracteriza por anomalías positivas de OLR (entre 10-20 W/m² más) sin cambios espaciales en la humedad (q850). La característica sobresaliente durante las OC húmedas es que muestran un pequeño aumento de q850, con vientos zonales provenientes del este (del Golfo de México hacia el Pacífico) a lo largo de la región en niveles altos. Sin embargo, la anomalía de la advección de humedad (adv q850) durante OC nocturnas es negativa en el HPL; por lo tanto, es posible que los valores altos observados en los promedios anuales de los índices de OC se deban a otros factores no identificados por patrones sinópticos durante el verano. Las OC nocturnas en el suroeste de Estados Unidos, región climática que coincide con la parte norte del HPL, se relacionaron con una mayor cobertura de nubes y un aumento en la cantidad de agua precipitable (Thomas et al., 2020).

Para profundizar en este tema, sería recomendable analizar compuestos de OC específicos para el HPL, ya que esta región presenta un interés particular debido a su alta probabilidad de experimentar un aumento en la frecuencia de OC nocturnas (Guirguis et al., 2017).

Una de las limitaciones de este estudio es que, al tratarse de eventos meteorológicos, las OC pueden estar asociadas a más de un patrón sinóptico de una misma variable atmosférica. No obstante, al emplear compuestos basados en promedios se pierde la capacidad de diferenciar entre estos posibles tipos, lo que podría influir en los resultados y las conclusiones del análisis. Además, el uso de promedios en periodos con una tendencia subyacente puede ser estadísticamente problemático, ya que estos tienden a suavizar las variaciones temporales y pueden ocultar patrones relevantes, lo que podría derivar en interpretaciones sesgadas. En investigaciones futuras podría hacerse un análisis quitando las tendencias y se podría profundizar en el estudio de algunos eventos extremos específicos destacados en los diagramas de cajas y bigotes, con el objetivo de identificar los mecanismos que conducen a los episodios más intensos y ver si se relacionan con ondas Rossby estacionarias. Se sabe que las ondas Rossby con números de onda 5 y 7 pueden generar eventos extremos como OC prolongadas o lluvias intensas durante el verano del hemisferio norte (Luo et al., 2022b). Asimismo, sería relevante analizar la contribución de los principales términos de la ecuación termodinámica durante eventos de OC, lo que permitiría una comprensión más detallada de los procesos involucrados. En particular, el papel de la advección horizontal de la temperatura y la velocidad vertical omega para analizar la subsidencia y calentamiento adiabático. Esto podría hacerse con los seis eventos compuestos de OC diurnas y nocturnas que detectamos (Anexo A) para ver su dinámica y termodinámica y compararla con lo encontrado en este trabajo.

Por último, se podría examinar la década más reciente con una base de datos más completa para poder determinar el impacto del aumento de la temperatura global en las OC regionales, dada la creciente evidencia que confirma el aumento en la frecuencia e intensidad de estos eventos en diferentes partes del país (Martínez-Austria et al., 2016; Navarro-Estupiñan et al., 2018; García-Martinez y Bollassina, 2021), así como el papel que podría jugar el aumento del calentamiento del Océano Atlántico y el Golfo de México (Cheng et al., 2024; Copernicus, 2024) en la formación de las OC (Cavazos, 2024).

Capítulo 5. Conclusión

Este trabajo constituye un primer paso para comprender el comportamiento de las OC en el norte de México y sur de Estados Unidos, incluyendo sus características específicas por punto de malla y región, así como la circulación sinóptica asociada a cada tipo de evento durante 1981-2010. Se encontró que a escala anual las OC diurnas son las más frecuentes, mientras que las nocturnas presentan la mayor intensidad, según los datos arrojados por las tres bases de datos utilizadas. Las OC diurnas y nocturnas destacan por su intensidad en zonas entre Baja California y Sinaloa. Además, las OC diurnas muestran *hotspots* en el noroeste de México y suroeste de Estados Unidos (regiones ANM y MNZ), mientras que las OC nocturnas presentan máximos de frecuencia en la península de Baja California, DES y HPL, y una mayor intensidad en el noroeste de la región y SBC. Este comportamiento promedio señala las áreas más vulnerables según el tipo de OC, lo que podría guiar medidas de acción específicas para proteger a la población.

En los patrones sinópticos del verano extendido, se identificaron características comunes en todos los tipos de OC, como anticiclones subtropicales más intensos, especialmente el del Pacífico y un anticiclón dominante sobre la zona afectada que generó subsidencia, cielos despejados y calentamiento significativo (2-6°C) en la superficie en el noroeste de México y suroeste de Estados Unidos. El fenómeno de tres anticiclones alineados a 500 hPa, uno sobre la región afectada y los otros en los océanos subtropicales, es más evidente en las OC nocturnas y después en las diurnas. Por otro lado, las OC húmedas muestran vientos zonales en 500 hPa sobre la región, favoreciendo la entrada de humedad desde el Golfo de México hacia el Pacífico Mexicano. Estas OC se asocian con mayor humedad sobre MNZ, la Sierra Madre Occidental, SBC, TEX, el sur de los EUA y Canadá, además de mayor nubosidad sobre el Golfo de California y sus alrededores; sin embargo, solo se detectaron 4 OC húmedas, por lo que estos resultados podrían no ser representativos de su climatología.

Estudios futuros podrían enfocarse en explorar las relaciones específicas entre los patrones de circulación atmosférica y los efectos diferenciados de los distintos tipos de OC, particularmente en zonas áridas que presentan anomalías asociadas a eventos húmedos y nocturnos. Además, sería muy relevante determinar si las OC detectadas se relacionan con la propagación de ondas Rossby.

Literatura citada

- Allan, R. P., Shine, K. P., Slingo, A., y Pamment, J. A. (1999). The dependence of clear-sky outgoing long-wave radiation on surface temperature and relative humidity. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 125(558), 2103–2126. <https://doi.org/10.1002/qj.49712555809>
- Almazroui, M., Islam, M. N., Saeed, F., Saeed, S., Ismail, M., Ehsan, M. A., Diallo, I., O'Brien, E., Ashfaq, M., Martínez-Castro, D., Cavazos, T., Cerezo-Mota, R., Tippet, M. K., Gutowski, W. J., Alfaro, E. J., Hidalgo, H. G., Vichot-Llano, A., Campbell, J. D., Kamil, S., ... Barlow, M. (2021). Projected changes in temperature and precipitation over the United States, Central America, and the Caribbean in CMIP6 gcms. *Earth Systems and Environment*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00199-5>
- Alsaqali, M., de Troeyer, K., Casas, L., Hamdi, R., Faes, C. y van Pottelbergh, G. (2022). The effects of heatwaves on human morbidity in primary care settings: a case-crossover study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(2). <https://doi.org/10.3390/ijerph19020832>
- Amante, C., & Eakins, B. W. (2009). *ETOPO1 1 arc-minute global relief model: Procedures, data sources and analysis* (Technical Memorandum NESDIS NGDC-24) [Conjunto de datos]. National Geophysical Data Center, NOAA. https://www.ngdc.noaa.gov/thredds/catalog/global/ETOPO2022/60s/60s_bed_elev_netcdf/catalog.htm?dataset=globalDatasetScan/ETOPO2022/60s/60s_bed_elev_netcdf/ETOPO_2022_v1_60s_N90W180_b.ed.nc
- An, N. & Zuo, Z. (2021). Investigating the influence of synoptic circulation patterns on regional dry and moist heat waves in North China. *Climate Dynamics*, 57(3–4), 1227–1240. <https://doi.org/10.1007/S00382-021-05769-X/METRICS>
- Arias, P.A., Bellouin, N., Coppola, E., Jones, R.G., Krinner, G., Marotzke, J., Naik, V., Palmer, M.D., Plattner, G.-K., Rogelj, J., Rojas, M., Sillmann, J., Storelvmo, T., Thorne, P.W., Trewin, B., Achuta Rao, K., Adhikary, B., Allan, R.P., Armour, K., ... Zickfeld, K. (2021). Technical Summary. In Masson- Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou, B. (Eds.) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33–144. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002>
- Barriopedro, D., García-Herrera, R., Ordóñez, C., Miralles, D. G. y Salcedo-Sanz, S. (2023). Heat waves: physical understanding and scientific challenges. *Reviews of Geophysics*, 61(2). <https://doi.org/10.1029/2022RG000780>
- Campbell, S., Remenyi, T. A., White, C. J. y Johnston, F. H. (2018). Heatwave and health impact research: A global review. *Health and Place*, 53, 210–218. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2018.08.017>
- Cavazos, T. (2024). Spring 2024: unprecedented atmospheric heatwaves in Mexico. *Frontiers in Climate*, 6. <https://doi.org/10.3389/fclim.2024.1449710>
- Cavazos, T., Luna-Niño, R., Cerezo-Mota, R., Fuentes-Franco, R., Méndez, M., Pineda Martínez, L. F. y Valenzuela, E. (2020). Climatic trends and regional climate models intercomparison over the CORDEX-CAM

- (Central America, Caribbean, and Mexico) domain. *International Journal of Climatology*, 40(3), 1396–1420. <https://doi.org/10.1002/joc.6276>
- Chen, Y. & Li, Y. (2017). An inter-comparison of three heat wave types in China during 1961-2010: Observed basic features and linear trends. *Scientific Reports*, 7. <https://doi.org/10.1038/srep45619>
- Chen, Z., Lu, J., Chang, C. C., Lubis, S. W. y Leung, L. R. (2023). Projected increase in summer heat-dome-like stationary waves over Northwestern North America. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00511-2>
- Cheng, L., Abraham, J., Trenberth, K. E., Boyer, T., Mann, M. E., Zhu, J., Wang, F., Yu, F., Locarnini, R., Fasullo, J., Zheng, F., Li, Y., Zhang, B., Wan, L., Chen, X., Wang, D., Feng, L., Song, X., Liu, Y., ... Lu, Y. (2024). New record ocean temperatures and related climate indicators in 2023. *Advances in Atmospheric Sciences*, 41(6), 1068–1082. <https://doi.org/10.1007/s00376-024-3378-5>
- Colorado-Ruiz, G. & Cavazos, T. (2021). Trends of daily extreme and non-extreme rainfall indices and intercomparison with different gridded data sets over Mexico and the southern United States. *International Journal of Climatology*, 41(11), 5406–5430. <https://doi.org/10.1002/joc.7225>
- Colorado-Ruiz, G., Cavazos, T., Salinas, J. A., de Grau, P., y Ayala, R. (2018). Climate change projections from Coupled Model Intercomparison Project phase 5 multi-model weighted ensembles for Mexico, the North American monsoon, and the mid-summer drought region. *International Journal of Climatology*, 38(15), 5699–5716. <https://doi.org/10.1002/joc.5773>
- Contreras-Navarro, E., García-Cueto, O. R., González-Navarro, F. F. y Valenzuela-Palacios, E. A. (2016). Modelado de las temperaturas del aire a 850 milibares: Un potencial indicador de las ondas cálidas en el noroeste de México. *Informacion Tecnologica*, 27(2), 141–152. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000200017>
- Copernicus (2024). *Global climate highlights 2023*. <https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2023>
- Cvijanovic, I., Mistry, M. N., Begg, J. D., Gasparrini, A. y Rodó, X. (2023). Importance of humidity for characterization and communication of dangerous heatwave conditions. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00346-x>
- Deng, K., Ting, M. y Yang, S. (2018). Increased frequency of summer extreme heat waves over Texas area tied to the amplification of Pacific zonal SST gradient. *Journal of Climate*, 31(14), 5629-5647. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0554.s1>
- Díaz-Caravantes, R. E., Castro-Luque, A. y Aranda-Gallegos, P. (2014). Mortalidad por calor natural excesivo en el noroeste de México: Condicionantes sociales asociados a esta causa de muerte. *Frontera norte*, 26(52), 155-177. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73722014000200007&lng=es&tling=es .
- Díaz-Lázaro, M. (2011). *Ondas de calor en seis zonas urbanas del estado de Veracruz* [Tesis de Maestría, Universidad Veracruzana]. Archivo PDF.
- Espinoza Tamarindo, B. E. (2013). *Variabilidad de las ondas de calor observadas en el Noroeste de México* [Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada , Baja California]. Repositorio Institucional <https://biblioteca.cicese.mx/catalogo/tesis/ficha.php?id=23252>

- García-Cueto, R. O., Tejeda-Martínez, A. y Jáuregui-Ostos, 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. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0283-7>
- García-Martínez, I. M. & A Bollasina, M. (2021). Identifying the evolving human imprint on heat wave trends over the United States and Mexico. *Environmental Research Letters*, 16(9). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1edb>
- Gershunov, A., Cayan, D. R., y Iacobellis, S. F. (2009). The Great 2006 Heat Wave over California and Nevada: Signal of an Increasing Trend. *Journal of Climate*, 22(23), 6181–6203. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2465.1>
- Guirguis, K., Gershunov, A., Cayan, D. R. y Pierce, D. W. (2018). Heat wave probability in the changing climate of the Southwest US. *Climate Dynamics*, 50(9–10), 3853–3864. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3850-3>
- Guo, Y., Gasparrini, A., Armstrong, B. G., Tawatsupa, B., Tobias, A., Lavigne, E., de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho, M., Pan, X., Kim, H., Hashizume, M., Honda, Y., Leon Guo, Y. L., Wu, C. F., Zanobetti, A., Schwartz, J. D., Bell, M. L., Scortichini, M., Michelozzi, P., Punnasiri, K., ... Tong, S. (2017). Heat wave and mortality: A multicountry, multicomunity study. *Environmental Health Perspectives*, 125(8). <https://doi.org/10.1289/EHP1026>
- Ha, K. J., Seo, Y. W., Yeo, J. H., Timmermann, A., Chung, E. S., Franzke, C. L. E., Chan, J. C. L., Yeh, S. W. y Ting, M. (2022). Dynamics and characteristics of dry and moist heatwaves over East Asia. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/s41612-022-00272-4>
- He, C., Kim, H., Hashizume, M., Lee, W., Honda, Y., Kim, S. E., Kinney, P. L., Schneider, A., Zhang, Y., Zhu, Y., Zhou, L., Chen, R., y Kan, H. (2022). The effects of night-time warming on mortality burden under future climate change scenarios: a modelling study. *The Lancet Planetary Health*, 6(8), e648–e657. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00139-5](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00139-5)
- Heo, S., Bell, M. L. y Lee, J. T. (2019). Comparison of health risks by heat wave definition: Applicability of wet-bulb globe temperature for heat wave criteria. *Environmental Research*, 168, 158–170. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.09.032>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D. y Thépaut, J-N. (2023). ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present. [Conjunto de datos]. C3S Climate Data Store. <https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>
- Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I., Diedhiou, A., Djalante, R., Ebi, K. L., Engelbrecht, F., Guiot, J., Hijioka, Y., Mehrotra, S., Payne, A., Seneviratne, S. I., Thomas, A., Warren, R., & Zhou, G. (2018). Impacts of 1.5°C global warming on natural and human systems. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, & T. Waterfield (Eds.), *Global warming of 1.5°C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (pp. 175–312). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.005>

- Horton, R. M., Mankin, J. S., Lesk, C., Coffel, E. y Raymond, C. (2016). A review of recent advances in research on extreme heat events. *Current Climate Change Reports* 2, 242–259 (2016). <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0042-x>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2022). Producto Interno Bruto Por Entidad Federativa 2021. <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2022/PIBEF/PIBEF.pdf>
- IPCC. (2023). Summary for Policymakers. In Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (Eds.), *Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, 36 pages. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002>
- Jáuregui, E. (2009). The heat spells of Mexico City. *Boletín del Instituto de Geografía*, (70), 71-76. <https://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n70/n70a5.pdf>
- Jia, G., Shevliakova, E., Artaxo, P., De Noblet-Ducoudré, N., Houghton, R., House, J., Kitajima, K., Lennard, C., Popp, A., Sirin A., Sukumar R. y Verchot, L. (2019). Land-climate interactions. In Shukla, P.R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., van Diemen, R., Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Portugal Pereira, J., Vyas, P., Huntley, E.,... Malley, J. (Eds.), *Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* (pp. 131–248). www.ipcc.ch/srccl/chapter/chapter-2
- Kornhuber, K., Coumou, D., Vogel, E., Lesk, C., Donges, J. F., Lehmann, J., y Horton, R. M. (2020). Amplified Rossby waves enhance risk of concurrent heatwaves in major breadbasket regions. *Nature Climate Change*, 10(1), 48–53. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0637-z>
- Leonard, M., Westra, S., Phatak, A., Lambert, M., van den Hurk, B., McInnes, K., Risbey, J., Schuster, S., Jakob, D. y Stafford-Smith, M. (2014). A compound event framework for understanding extreme impacts. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 5(1), 113–128. <https://doi.org/10.1002/wcc.252>
- Li, M., Gu, S., Bi, P., Yang, J., y Liu, Q. (2015). Heat waves and morbidity: Current knowledge and further direction-a comprehensive literature review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(5), 5256–5283. <https://doi.org/10.3390/ijerph120505256>
- Li, Y., Zhao, M., Motesharrei, S., Mu, Q., Kalnay, E. y Li, S. (2015). Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations. *Nature Communications*, 6(1), 6603. <https://doi.org/10.1038/ncomms7603>
- Liu, L., Chu, L., Liang, Y., Li, J., Yu, M. y He, C. (2024). Unveiling the dynamics of dry-and-humid, day-and-night, and compound heat waves across 209 Cities in China during 1974–2021. *Urban Climate*, 58, 102230. <https://doi.org/10.1016/J.UCLIM.2024.102230>
- Livneh, B., Bohn, T. J., Pierce, D. W., Muñoz-Arriola, F., Nijssen, B., Vose, R., Cayan, D. R. y Brekke, L. (2015). *A spatially comprehensive, meteorological data set for Mexico, the U.S., and southern Canada (NCEI Accession 0129374)*. Version 1.1. [Conjunto de datos]. National Centers for Environmental Information. <https://doi.org/10.7289/v5x34vf6>
- Lo, S. H., Chen, C. T., Hsu, H. H., Shih, M. F. y Liang, H. C. (2023). The unprecedented spatial extent and intensity of the 2021 summer extreme heatwave event over the Western North American regions. *Weather and Climate Extremes*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2023.100576>

- Luo, M., Lau, N. C. y Liu, Z. (2022a). Different mechanisms for daytime, nighttime, and compound heatwaves in southern China. *Weather and Climate Extremes*, 36. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100449>
- Luo, F., Selten, F., Wehrli, K., Kornhuber, K., Le Sager, P., May, W., Reerink, T., Seneviratne, S. I., Shiogama, H., Tokuda, D., Kim, H. y Coumou, D. (2022b). Summertime Rossby waves in climate models: substantial biases in surface imprint associated with small biases in upper-level circulation. *Weather Clim. Dynam.*, 3, 905–935. <https://doi.org/10.5194/wcd-3-905-2022>
- Martinez-Austria, P. F. & Bandala, E. R. (2017). Temperature and heat-related mortality trends in the Sonoran and Mojave Desert region. *Atmosphere*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/atmos8030053>
- Martínez-Austria, P. F., Bandala, E. R. y Patiño-Gómez, C. (2016). Temperature and heat wave trends in northwest Mexico. *Physics and Chemistry of the Earth*, 91, 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.07.005>
- McElroy, S., Schwarz, L., Green, H., Corcos, I., Guirguis, K., Gershunov, A. y Benmarhnia, T. (2020). Defining heat waves and extreme heat events using sub-regional meteorological data to maximize benefits of early warning systems to population health. *Science of the Total Environment*, 721. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137678>
- McGregor, G. (2024). Synoptic scale atmospheric processes and heatwaves. In *Heatwaves (Biometeorology*, Vol. 6). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-69906-1_6
- Montero Martínez, M.J., Martínez Jiménez, J., Castillo Pérez, N.I. y Espinoza Tamarindo, B.E. (2010). Escenarios climáticos en México proyectados para el siglo XXI. Precipitación y temperaturas máxima y mínima. En Martínez-Austria, P., Patiño Gómez, C. (Eds.), *Atlas de vulnerabilidad ante el cambio climático. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*, Cuernavaca, pp. 39–63. <https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros/atlas.pdf>
- Mora, C., Dousset, B., Caldwell, I. R., Powell, F. E., Geronimo, R. C., Bielecki, C. R., Counsell, C. W. W., Dietrich, B. S., Johnston, E. T., Louis, L. v., Lucas, M. P., Mckenzie, M. M., Shea, A. G., Tseng, H., Giambelluca, T. W., Leon, L. R., Hawkins, E. y Trauernicht, C. (2017). Global risk of deadly heat. *Nature Climate Change*, 7(7), 501–506. <https://doi.org/10.1038/nclimate3322>
- Mukherjee, S. & Mishra, A.K. (2021). Increase in compound drought and heatwaves in a warming world. *Geophysical Research Letters*, 48(1), <https://doi.org/10.1029/2020GL090617>
- Muñoz Sabater, J. (2019). *ERA5-Land hourly data from 1950 to present*. [Conjunto de datos]. C3S CDS. <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac>
- Nairn, J. R. & Fawcett, R. J. B. (2014). The excess heat factor: A metric for heatwave intensity and its use in classifying heatwave severity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(1), 227–253. <https://doi.org/10.3390/ijerph120100227>
- Navarro-Estupiñan, J., Robles-Morua, A., Vivoni, E. R., Zepeda, J. E., Montoya, J. A. y Verduzco, V. S. (2018). Observed trends and future projections of extreme heat events in Sonora, Mexico. *International Journal of Climatology*, 38(14), 5168–5181. <https://doi.org/10.1002/joc.5719>
- Ortiz Martin, R. M. (2023). *Caracterización climática de las olas de calor en el centro de México* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. TesiUNAM https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/L5LNC3YYJVSPBVHFTT3LF5KYQBYXPXAH324IS8GXYS2CURRJS-10346?func=full-set-set&set_number=102421&set_entry=000002&format=999

- Parker, T. J., Berry, G. J. y Reeder, M. J. (2014). The structure and evolution of heat waves in *Southeastern Australia*. *Journal of Climate*, 27(15), 5768–5785. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00740.1>
- Pascaline, W., & Rowena, H. (2018). *Economic losses, poverty & disasters: 1998-2017*. https://www.unisdr.org/2016/iddr/IDDR2018_Economic%20Losses.pdf
- Pavia, E. G., Graef, F. y Reyes, J. (2009). Annual and seasonal surface air temperature trends in Mexico. *International Journal of Climatology*, 29(9), 1324–1329. <https://doi.org/10.1002/joc.1787>
- Perkins, S. E. (2015). A review on the scientific understanding of heatwaves-Their measurement, driving mechanisms, and changes at the global scale. *Atmospheric Research*, 164–165, 242–267. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.05.014>
- Pezza, A. B., van Rensch, P. y Cai, W. (2012). Severe heat waves in Southern Australia: Synoptic climatology and large scale connections. *Climate Dynamics*, 38(1–2), 209–224. <https://doi.org/10.1007/S00382-011-1016-2/METRICS>
- Raymond, C., Matthews, T., y Horton, R. M. (2020). The emergence of heat and humidity too severe for human tolerance. *Science Advances*, 6(19). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw1838>
- Russo, S., Sillmann, J. y Fischer, E. M. (2015). Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades. *Environmental Research Letters*, 10(12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124003>
- Russo, S., Sillmann, J. y Sterl, A. (2017). Humid heat waves at different warming levels. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07536-7>
- Sánchez-Benítez, A., Barriopedro, D. y García-Herrera, R. (2020). Tracking Iberian heatwaves from a new perspective. *Weather and Climate Extremes*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2019.100238>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2003). *Atlas Digital Geográfico*. http://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/atm_climas.html
- Secretaría de Salud. (2023). *Informes Semanales para la Vigilancia Epidemiológica de Temperaturas Naturales Extremas*. <https://www.gob.mx/salud/documentos/informes-semanales-para-la-vigilancia-epidemiologica-de-temperaturas-naturales-extremas-2023>
- Seneviratne, S.I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S.M., Wehner, M. y Zhou, B. (2021). Weather and climate extreme events in a changing climate. In Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R. y Zhou, B. (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 1513–1766). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>
- Sherwood, S. C., & Huber, M. (2010). An adaptability limit to climate change due to heat stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(21), 9552–9555. <https://doi.org/10.1073/pnas.0913352107>
- Sonntag, D. (1994). Advancements in the field of hygrometry. *Meteorologische Zeitschrift*, 3(2), 51–66. <https://doi.org/10.1127/metz/3/1994/51>

- Spinoni, J., Vogt, J. y Barbosa, P. (2015). European degree-day climatologies and trends for the period 1951–2011. *International Journal of Climatology*, 35(1), 25–36. <https://doi.org/10.1002/joc.3959>
- Stull, R. (2011). Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(11), 2267–2269. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0143.1>
- Suli, S., Barriopedro, D., García–Herrera, R. y Rusticucci, M. (2023). Regionalisation of heat waves in southern South America. *Weather and Climate Extremes*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2023.100569>
- Thomas, N. P., Bosilovich, M. G., Marquardt Collow, A. B., Koster, R. D., Schubert, S. D., Dezfuli, A. y Mahanama, S. P. (2020). Mechanisms associated with daytime and nighttime heat waves over the contiguous United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59(11), 1865–1882. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-20-0053.1>
- Thornton, M.M., Shrestha, R., Wei, Y., Thornton, P.E., Kao, S-C. y Wilson, B.E. (2022). *Daymet: Daily surface weather data on a 1-km grid for North America* (Version 4 R1). [Conjunto de datos]. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/2129>
- United States Agency for International Development. (2019). *Heat waves and human health emerging evidence and experience to inform risk management in a warming world*. <https://www.climatelinks.org/projects/atlas>
- Vecellio, D. J., Tony Wolf, S., Cottle, R. M. y Larry Kenney, W. (2022). Evaluating the 35°C wet-bulb temperature adaptability threshold for young, healthy subjects (PSU HEAT Project). *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 132(2), 340–345. <https://doi.org/10.1152/JAPPLPHYSIOL.00738.2021>
- Wang, J., Chen, Y., Tett, S. F. B., Yan, Z., Zhai, P., Feng, J. y Xia, J. (2020). Anthropogenically-driven increases in the risks of summertime compound hot extremes. *Nature Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14233-8>
- Wilson, A. J., Bressler, R. D., Ivanovich, C., Tuholske, C., Raymond, C., Horton, R. M., Sobel, A., Kinney, P., Cavazos, T., y Shrader, J. G. (2024). Heat disproportionately kills young people: Evidence from wet-bulb temperature in Mexico. *Science Advances*, 10(49), 3367. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adq3367>
- Wu, S., Luo, M., Zhao, R., Li, J., Sun, P., Liu, Z., Wang, X., Wang, P. y Zhang, H. (2023). Local mechanisms for global daytime, nighttime, and compound heatwaves. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00365-8>
- Xie, P., & Arkin, P. A. (1998). Global Monthly Precipitation Estimates from Satellite-Observed Outgoing Longwave Radiation. *Journal of Climate*, 11(2), 137–164. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<0137:GMPEFS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<0137:GMPEFS>2.0.CO;2)
- Zhang, X., Hegerl, G., Zwiers, F. W., y Kenyon, J. (2005). Avoiding Inhomogeneity in Percentile-Based Indices of Temperature Extremes. *Journal of Climate*, 18(11), 1641–1651. <https://doi.org/10.1175/JCLI3366.1>
- Zschenderlein, P., Fink, A. H., Pfahl, S. y Wernli, H. (2019). Processes determining heat waves across different European climates. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145(724), 2973–2989. <https://doi.org/10.1002/qj.3599>

Anexos

Anexo A. Fechas de OC sinópticas en verano extendido (abril a septiembre) de 1981-2010 en el norte de México y sur de Estados Unidos. Las letras a-f que aparecen en las OC diurnas y nocturnas indican días de eventos compuestos en las que seis OC coincidieron durante algunos días, tanto durante el día como en la noche.

Diurnas		Nocturnas		Húmedas	
N. de evento	Fechas	N. de evento	Fechas	N. de evento	Fechas
1	06/04/1989	1a	26/06/1990	1	25/08/1998
	07/04/1989		27/06/1990		26/08/1998
	08/04/1989		28/06/1990		27/08/1998
	09/04/1989	2b	25/06/1994	2	27/06/1999
22/05/1989	26/06/1994		28/06/1999		
23/05/1989	27/06/1994		29/06/1999		
24/05/1989	28/06/1994		3	13/07/2010	
25/05/1989	29/06/1994			14/07/2010	
3a	24/06/1990			30/06/1994	15/07/2010
	25/06/1990			01/07/1994	16/07/2010
	26/06/1990	3	18/06/1998	15/08/2010	
4b	25/06/1994		19/06/1998	16/08/2010	
	26/06/1994		20/06/1998	4	17/08/2010
	27/06/1994	4c	27/06/1998		18/08/2010
	28/06/1994		28/06/1998		19/08/2010
	29/06/1994		29/06/1998		5d
	30/06/1994	11/07/1998			
	01/07/1994	12/07/1998			
5	24/07/1995	13/07/1998	6e	09/08/2003	
	25/07/1995	14/07/1998		10/08/2003	
	26/07/1995	7f		11/08/2003	
	27/07/1995		27/07/2009		
	28/07/1995				
	29/07/1995				

	30/07/1995		28/07/2009
6	24/04/1996		29/07/2009
	25/04/1996		30/07/2009
	26/04/1996	8	23/08/2010
	27/04/1996		24/08/2010
			25/08/2010
7	11/05/1996		
	12/05/1996		
	13/05/1996		
8	20/05/1996		
	21/05/1996		
	22/05/1996		
9	31/05/1998		
	01/06/1998		
	02/06/1998		
	03/06/1998		
	04/06/1998		
10c	26/06/1998		
	27/06/1998		
	28/06/1998		
11d	11/07/1998		
	12/07/1998		
	13/07/1998		
	14/07/1998		
12	01/09/2000		
	02/09/2000		
	03/09/2000		
	04/09/2000		
	05/09/2000		
	06/09/2000		
	07/09/2000		
13	10/09/2000		
	11/09/2000		
	12/09/2000		

14	29/04/2002
	30/04/2002
	01/05/2002
15	25/08/2002
	26/08/2002
	27/08/2002
	28/08/2002
16	14/05/2003
	15/05/2003
	16/05/2003
17e	06/08/2003
	07/08/2003
	08/08/2003
	09/08/2003
	10/08/2003
18	21/05/2005
	22/05/2005
	23/05/2005
19	03/07/2005
	04/07/2005
	05/07/2005
20	17/09/2005
	18/09/2005
	19/09/2005
21	22/09/2005
	23/09/2005
	24/09/2005
	25/09/2005
	26/09/2005
	27/09/2005
	28/09/2005
29/09/2005	
22	13/04/2006

	14/04/2006
	15/04/2006
	16/04/2006
	17/04/2006
	18/04/2006
23	01/06/2008
	02/06/2008
	03/06/2008
	04/06/2008
24	07/05/2009
	08/05/2009
	09/05/2009
25	14/07/2009
	15/07/2009
	16/07/2009
26f	26/07/2009
	27/07/2009
	28/07/2009