



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

**ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA DE LOS
CICLONES TROPICALES DEL ATLÁNTICO NORTE QUE
AFECTAN DIRECTAMENTE A MÉXICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciado en Ciencias de la Tierra

P R E S E N T A:

Julio Gómez Camacho

DIRECTOR DE TESIS:

Dra. Paulina Ordóñez Pérez

Ciudad Universitaria, Cd.Mx., 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

No acabaría de agradecer a todos y cada uno de aquellos que han formado parte de esta gran aventura que ha sido para mi el estudiar una carrera enfocada en la ciencia. Pero podría empezar por las personas que siempre serán las más importantes para mi, mis padres, sin duda Pepe y Lulú se llevan todo el crédito de mis buenas acciones y decisiones, siempre les estaré infinitamente agradecido y me enorgullece totalmente dedicarles un logro más, los amo y siempre lo haré. Junto con ellos vienen mi hermano Pepin y mi hermana Pina, con los cuales no precisamente siempre he estado de acuerdo, pero vamos, eso hace aún más divertido el camino juntos. Gracias a sus aciertos y desaciertos he podido vivir experiencias através de sus ojos y no he tenido que sufrir ni un poco, gracias por siempre apoyarme y estar a mi lado, son los mejores amigos que alguien puede tener.

Enseguida esta la mujer de mi vida, Paola, no tienes idea de la felicidad que llega a mi al decirte que eres mi más grande inspiración (junto con nuestra Leia, claro esta) para lograr cada vez cosas más importantes, gracias al gran amor que me brindas me permites ser la mejor version de mí mismo, te amare por el resto de mi vida. Tambien les agradezco mucho a tus padres Auu y Tere y tu hermano Dieguito, que son familia para mi.

Que sería de la vida de un caballero sin sus amigos, aquellos amigos que siempre te acompañan en cada aventura y te apoyan incondicionalmente. Ante todos esta mi hermano de otra madre, Ricardo, muchas gracias por tu amistad, es invaluable. Junto con Alexis, Agustín, Elpella y Orlando tenemos infinidad de anécdotas que recordaré por siempre. Además están todos aquellos amigos que he hecho a lo largo de la carrera y han sido muy importantes en los últimos años de mi vida: Jorge, Shaden, Happy, Ana, Olmo, Ángel, Mapache, Denichi, Petitz, etc. Gracias infinitas, amigos.

Últimos en orden, pero no en importancia, debo agradecer a todos los profesores de la licenciatura que de una manera u otra influenciaron en mi formación como Licenciado en Ciencias de la Tierra, gracias a todos. Muchas muchas gracias a mi tutora, la Dra. Paulina, que me ha apoyado de manera incondicional en mi proceso de titulación y gracias a ella he aprendido demasiado, además le agradezco por haberme dejado formar parte de su proyecto IA103116 'Principales fuentes de humedad de la República Mexicano y su variabilidad climática', que forma parte del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT).

Y a ti, por tomarte la molestia de leer este texto, también te doy las gracias.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. MARCO TEÓRICO.....	5
1.1.1. Los ciclones tropicales.....	5
1.1.2. Actividad ciclónica del Atlántico Norte.....	8
1.1.3. Modos de variabilidad climática.....	10
1.2. ANTECEDENTES.....	15
2. OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN	19
3. DATOS Y MÉTODOS	20
4. RESULTADOS.....	25
4.1 REGIONES DE IMPORTANCIA EN EL DESARROLLO DE LOS CT.....	25
4.2 FRECUENCIA Y DURACIÓN DE LOS CT	28
4.3 CORRELACIÓN DE LOS CT CON LOS MODOS CLIMÁTICOS	30
4.3 REGIONES DE IMPORTANCIA DE LOS CT QUE AFECTAN A MÉXICO	36
4.4 FRECUENCIA Y DURACIÓN DE LOS SISTEMAS QUE AFECTAN A MÉXICO	38
4.6 CORRELACIÓN ENTRE MODOS Y LOS SISTEMAS QUE AFECTAN A MÉXICO	41
5. RESUMEN Y CONCLUSIONES	47
6. BIBLIOGRAFÍA.....	50
APÉNDICE A.....	53
APÉNDICE B.....	59

1. INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se estudia desde un punto de vista climático la actividad de los ciclones tropicales (en adelante CT) del Atlántico Norte (en adelante AN) en general. Y en particular, se analizan aquellos que afectan de manera más directa a la República Mexicana.

A lo largo de la tesis se determinarán zonas críticas en la vida de los CT: de ciclogénesis, de presión mínima y de ciclólisis, las cuales se explicarán con mayor profundidad más adelante en el texto. Así mismo, se analizará la distribución anual y mensual de la frecuencia y duración de los ciclones. Y por último se estudiará la variabilidad climática natural que presentan estos fenómenos, para ello se analizará su relación con algunos patrones climáticos con cierta dominancia en el AN como pueden ser el Modo Meridional del Atlántico (AMM, por sus siglas en inglés), El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), etc.

En la presente sección se exponen los principales conceptos teóricos que se abordarán en la tesis y los antecedentes que existen sobre estudios de variabilidad climática para los CT del Atlántico Norte. En la sección 2 se enumeran los principales objetivos del trabajo. Los datos y la metodología empleados se describen en la sección 3. A lo largo de la sección 4 se presentan los resultados obtenidos. En la sección 5 se exponen las principales conclusiones alcanzadas.

1.1. MARCO TEÓRICO

1.1.1. Los ciclones tropicales

Los ciclones tropicales son un sistema rotatorio de nubes/tormentas organizadas que se originan sobre los océanos tropicales o subtropicales y presentan una circulación cerrada de niveles bajos (Landsea, 2016).

La energía de los ciclones tropicales proviene del calor latente liberado por grandes cantidades de vapor de agua que se eleva en corrientes ascendentes ocasionando una caída de presión. Puesto que la energía de un ciclón es más grande mientras mayor sea la diferencia de presión entre su centro y su límite exterior, es de gran importancia medir la presión mínima central, además de los vientos máximos sostenidos. Estos fenómenos se pueden clasificar de acuerdo a un sistema denominado Escala de Saffir-Simpson (ver la tabla 1). Dicha escala puede subdividirse en dos grupos: huracanes menores y mayores, siendo estos últimos de categoría 3 o más grandes.

Categoría	Presión central (mb)	Vientos (km/h)
Perturbación tropical	1008.1 a 1010	-
Depresión tropical	1004.1 a 1008	<62
Tormenta tropical	985.1 a 1004	62.1 a 118
Huracán categoría 1	980.1 a 985	118.1 a 154
Huracán categoría 2	965.1 a 980	154.1 a 178
Huracán categoría 3	945.1 a 965	178.1 a 210
Huracán categoría 4	920.1 a 945	210.1 a 250
Huracán categoría 5	<920	>250

Tabla 1. Escala de Saffir-Simpson (Moshinsky et al., 2002)

Los CT en el Atlántico Norte se forman por encima de los 5° de latitud Norte, típicamente tienen un movimiento hacia el Oeste, sin embargo, en algunas ocasiones el viento de los niveles medios y altos de la atmosfera cambia, dirigiendo los ciclones hacia el Norte y Noroeste. Además requieren de ciertas condiciones en el ambiente como precursores para su formación; las condiciones aquí expuestas son necesarias, pero no suficientes para el desarrollo de los ciclones tropicales (Landsea, 2016):

- Océanos cálidos que tengan mínimo 26.5°C superficialmente, por lo menos dentro de una profundidad mínima de 50 m, pues esto representa el combustible que alimentará al ciclón tropical.
- Una atmosfera con un rápido enfriamiento con respecto a la altura, de modo que sea potencialmente inestable para la convección húmeda profunda.
- Capas cercanas a la troposfera relativamente húmedas que permitan el continuo desarrollo de las tormentas.
- Una perturbación cercana a la superficie pre-existente con suficiente vorticidad y convergencia que confiera cierta organización y rotación inicial.
- Valores pequeños de cizalladura vertical del viento de la capa comprendida entre la superficie y el tope de la troposfera, para que no interfiera con la convección profunda alrededor del centro del ciclón, se considera un valor umbral $\frac{\partial U}{\partial z} < \frac{8\frac{m}{s}}{H}$.

Los efectos que provocan los CT, sobre todo aquellos que alcanzan la intensidad de un huracán, son muy extremos pues conllevan a generación de fuertes lluvias e inundaciones, así como mareas de tormenta y oleaje elevados. En el Atlántico, los CT tienen una temporada que comienza en junio y termina en noviembre, pero los meses de mayor incidencia de estos fenómenos es agosto, septiembre y octubre (ASO).

Estos sistemas, al lograr la categoría de huracán consisten en dos sistemas de circulación, el primero son los vientos en espiral que resultan por la conservación de momento angular, al fluir el aire hacia al centro del ojo en los niveles bajos se logra un sistema ciclónico. Asimismo, al ascender rápidamente estos vientos, cuando van alcanzando a la tropopausa el viento tiene que fluir hacia fuera del ojo del huracán, teniendo entonces un sistema anticiclónico en los niveles más altos. (ver figura 1)

Asumiendo entonces que se cumple el balance de viento térmico lejos del centro del ciclón, esta configuración de un sistema ciclónico en superficie y uno anticiclónico cercano a la tropopausa correspondería a un fenómeno de núcleo caliente, lo cual quiere decir que el aire en el centro del mismo es más cálido que aquel en sus alrededores.

El segundo sistema de circulación es aquel referido a las zonas más externas del huracán, y comúnmente se le equipará con una máquina de Carnot. Ya que la fuente de energía primaria de estos sistemas es el calor obtenido de la superficie del océano, el ciclo comienza cuando el aire cercano a la superficie adquiere calor, lo cual calienta la atmósfera y enfría el océano en ese punto; posteriormente este aire caliente asciende y se va enfriando para conformar la pared del ojo conservando su contenido total de entropía.

Después de esto, el aire fluye hacia fuera del ojo y pierde calor debido a la liberación de radiación infrarroja hacia el espacio, pues se encuentra cercano a la tropopausa que es mucho más fría. Para cerrar el ciclo, este aire desciende y se calienta en superficie en la zona más externa del ciclón conservando el calor total.

Junto con estas circulaciones internas del sistema, tenemos también el flujo del ambiente comprendido en toda la troposfera, que se encarga de dirigir el movimiento neto del sistema. En las latitudes tropicales, los ciclones usualmente se mueven hacia el Oeste con una ligera desviación hacia el Polo Norte. Esto es debido a la existencia de un eje de alta presión llamado cresta subtropical que se extiende de Este a Oeste, en la cual generalmente prevalecen los vientos del Oeste. Sin embargo, si la cresta subtropical es débil (en ocasiones debido a la presencia de una vaguada en la corriente de chorro) el ciclón puede tomar un rumbo hacia el polo y curvar su camino de regreso hacia el Este. Muchas veces es difícil

determinar si la cresta permitirá al ciclón recurvar su camino de regreso al océano, o seguirá su camino directo al continente.

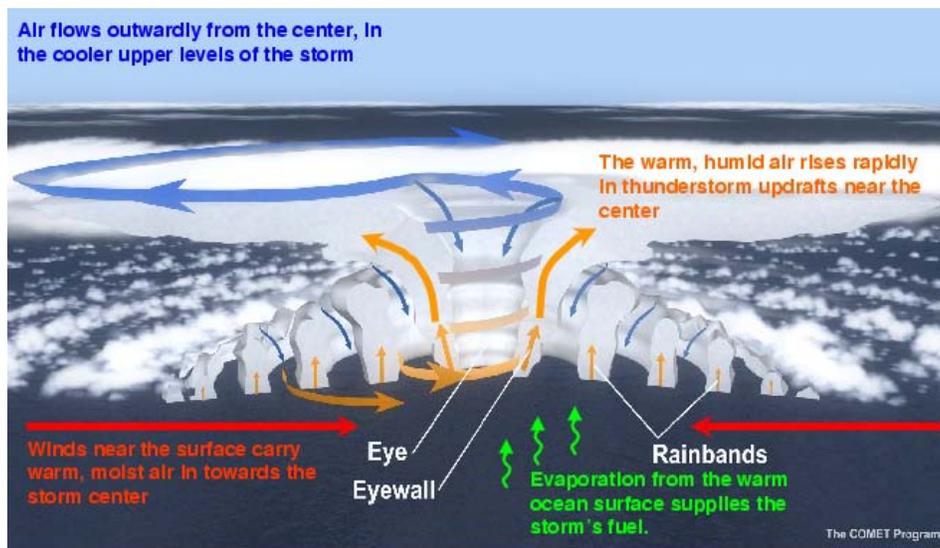


Figura 1. Diagrama que muestra la circulación que presentan los ciclones tropicales intensos/huracanes. Figura tomada de NOAA- Geophysical Fluid Dynamics Laboratory.

1.1.2. Actividad ciclónica del Atlántico Norte

Debido a que la fuerza de Coriolis juega un papel importante en la circulación de estos sistemas, el desarrollo de los mismos se ve limitado entre 5° y 30° en general, y como se explico previamente, se requiere de ciertas características ambientales para que se desarrollen, en la figura 2 se notan las diferentes cuencas en las cuales hay ocurrencia de estos fenómenos. En la cuenca del Pacífico Norte Occidental es donde hay mayor número de ciclones y también donde hay mayor ocurrencia de los más intensos, mientras que para el Pacífico Norte Oriental y el Pacífico Sur Occidental la actividad es regular, así como también lo es en las cuencas Norte y Sur del Océano Índico. Cabe destacar que la cuenca del Atlántico es muy peculiar debido a la estructura de la temperatura superficial del océano, pues tiene cierto comportamiento dipolar, donde dichas temperaturas suelen ser más cálidas en la parte Norte y más frías en la parte Sur, es por eso que ésta última no presenta actividad ciclónica históricamente.

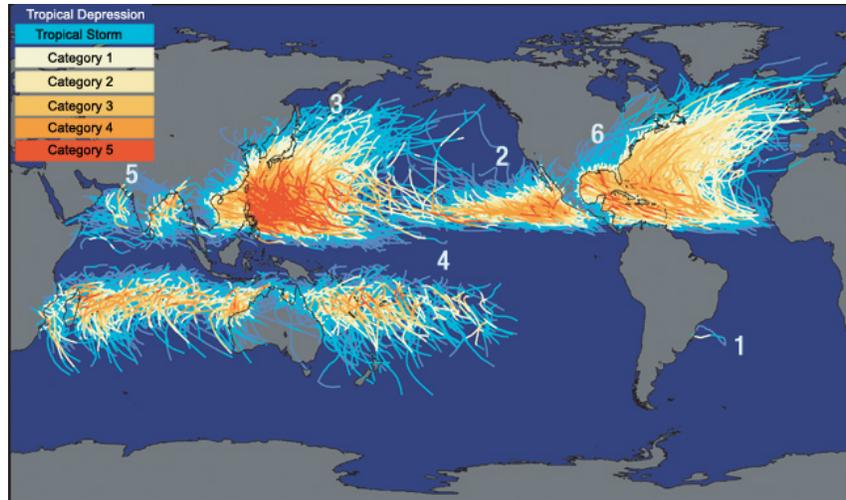


Figura 2. Trayectorias de los ciclones tropicales en el globo. Los ciclones tropicales tratan de evitar las zonas próximas al ecuador, donde la fuerza de Coriolis es muy baja y nula sobre ella. Figura NASA.

La actividad ciclónica está definida como el número de tormentas tropicales que suceden dentro de una temporada o frecuencia, su intensidad y su duración (Kossin y Vimont, 2007). Dentro de la cuenca del AN, la mayoría de los CT se forman a partir de las ondas del este provenientes de África, las cuales se propagan hacia el Oeste desde las costas de Cabo Verde en África a través del AN y el mar Caribe, pasando por cierta región del planeta, comprendida entre los 10°N y 20°N, conocida como la Región Principal de Desarrollo (MDR, por sus siglas en inglés). En la MDR se intensifican las perturbaciones en la atmosfera para aumentar su intensidad y dar lugar a la formación de CT, es decir, la ciclogénesis; y en algunos casos, debido a lo extenso que es esta zona, también es donde estos sistemas alcanzan una intensidad considerable. Se entiende que los vientos de los CT están íntimamente relacionados con el gradiente radial de presión considerando que se tiene un balance gradiente o uno ciclostrofico, pero usualmente se cuenta con solo el valor de su presión mínima cerca del centro de la tormenta y con este último pueden inferirse los vientos máximos (Kossin, 2010).

Mientras que la localización de los últimos puntos de su trayectoria, cuando los CT se están disipando, es decir, la ciclólisis, usualmente se encuentran en las costas de México, Estados Unidos y unos cuantos recurvan su trayectoria hacia el océano Atlántico más al Norte. Algunos CT que se forman usualmente 5° más arriba de la región de la MDR son sistemas más baroclínicos, que no necesariamente se forman a partir de ondas del Este

A pesar de que el promedio climatológico durante los meses que comprenden la temporada de huracanes en el AN de algunas características atmosféricas como la cizalladura vertical del viento o la convección profunda, indicarían que dicha cuenca no es

propicia para permitir un desarrollo de CT importante, sin embargo, se observa variabilidad interanual e interdecadal de la actividad ciclónica (Goldenberg et al., 2001).

A pesar de que la era satelital para el estudio de los CT empieza en los años 60's, se tienen registros anteriores de estos fenómenos en la cuenca del Atlántico, en los cuales se encuentran dos épocas importantes de niveles más bajos de lo normal comprendidos entre 1900-1920 y 1970-1990, mientras que la temporada entre 1920-1960 muestra niveles de mayor actividad ciclónica con respecto al promedio, además de que en los años 1995-2005 se experimentó el más alto nivel de actividad de huracanes en el Atlántico Norte.

Esta alta actividad resulta de un simultáneo incremento de temperatura superficial del océano del AN y un decremento en la cizalladura vertical del viento, mientras estas dos características se mantengan presentes en la cuenca, es probable que persista una alta actividad ciclónica.

Estos cambios pueden estar o no asociados con el calentamiento global, sin embargo nos muestran el gran aumento tanto de ciclones tropicales como de huracanes intensos durante los últimos años y nos obligan a replantear las estrategias de prevención y protección civil, pues es claro que debido al aumento de población cada vez hay más comunidades expuestas al peligro que representan los CT.

1.1.3. Modos de variabilidad climática

Las características generales en la configuración océano-atmosfera pueden estar modulados por una serie de oscilaciones climáticas, o bien, por una combinación de las mismas. Estas oscilaciones afectan a un gran número de variables climáticas como pueden ser la presión y circulación atmosféricas, la temperatura superficial del aire o la temperatura de la superficie del mar. Además pueden tener efecto en una o más regiones geográficas considerablemente alejadas de la 'región de origen'. Estos efectos en zonas alejadas de donde se origina la oscilación se denominan tele-conexiones y pueden ocurrir en diferentes escalas espaciales y temporales. En esta tesis nos centraremos en las oscilaciones climáticas de escalas de tiempo interanual o mayores. Algunas de estas oscilaciones que pueden ser importantes para el desarrollo de los ciclones tropicales en el Atlántico, y por lo tanto, de los ciclones que potencialmente afectan la República Mexicana son las siguientes:

- Modo Meridional del Atlántico (AMM)

Es una fuente importante de variabilidad en el atlántico para los sistemas acoplados de océano-atmósfera. Su variabilidad va de interanual a decadal. La intensidad de esta oscilación se ve influenciada por diversos factores: temperatura superficial del océano, cizalladura vertical del viento, vorticidad y convergencia de niveles bajos, estabilidad estática y la presión sobre el nivel del mar (Vimont y Kossin, 2007).

En la figura 3 se muestran las anomalías de temperatura superficial del océano correspondientes a la fase positiva de la AMM. Durante esta fase, la zona intertropical de convergencia se desplaza ligeramente hacia el norte, causando sequías en las zonas cercanas al Norte de Brasil. Además de temperaturas superficiales del mar más cálidas que lo normal y la cizalladura vertical del viento más débil que la habitual, lo que tiende a fortalecer el desarrollo de los CT. Y viceversa durante la fase negativa. La presión a nivel del mar corresponde con las anomalías de temperatura en la superficie del océano.

Vientos anómalos en la superficie fluyen de las superficies frías a las cálidas, debilitando entonces los alisios en el Atlántico Norte. (ver figura 3) Estas anomalías de viento producen una retroalimentación positiva en las anomalías iniciales de temperatura superficial del océano, forzando un cambio en el enfriamiento por evaporación del océano inducido por los vientos. Otro modo de variabilidad climático que tiene una especial conexión con éste es la AMO, pues se ha afirmado que la AMM es fuertemente modulada por esta última en las escalas de tiempo multidecadales. (Vimont y Kossin, 2007).

Los huracanes se vuelven más frecuentes e intensos durante las fases positivas de la AMM debido a mayores temperaturas superficiales del océano y reducida cizalladura del viento dentro de la MDR. Durante la fase negativa se tienen las características opuestas, que finalmente resultan en un ambiente no apto para la formación de CT. También se pueden ver influenciados tanto la duración de las tormentas, como la localización de la ciclogénesis.

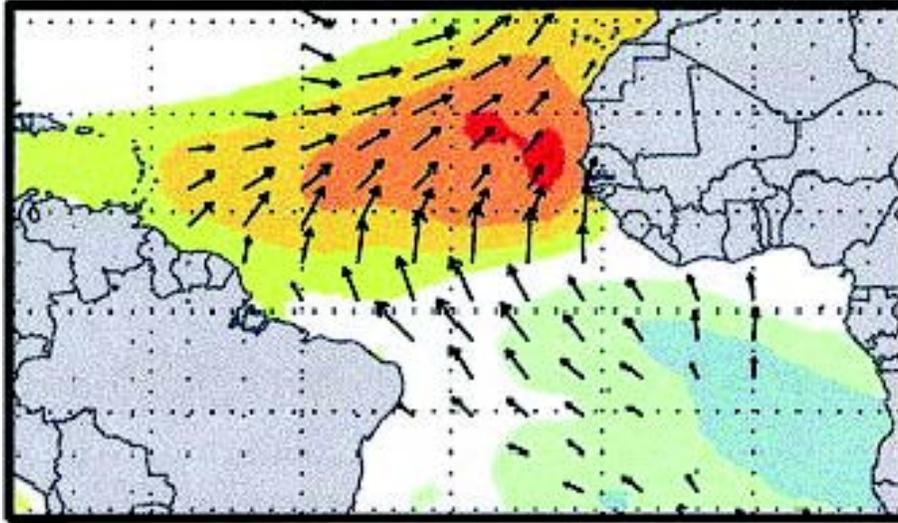


Figura 3. Anomalías de la temperatura superficial del océano durante la fase positiva de la AMM. Los vectores muestran los vientos a 10 m de altura donde el máximo es de 0.5 m/s y los contornos de temperatura son de cada 0.2 °C, desde +0.5°C a -5°C. (Chiang y Vimont, 2004).

- Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO)

Esta oscilación tiene períodos de 60 a 80 años y consiste en los cambios en la temperatura superficial del océano y los cambios en la cizalladura vertical de los vientos en la zona del Atlántico Norte.

Esta oscilación refleja una variación multidecadal dentro de las temperaturas superficiales del océano sobre la cuenca del Atlántico Norte con las fases negativas y positivas alternándose después de múltiples décadas. Cuando se tiene una fase cálida (ver figura 4), las anomalías de la temperatura superficial del océano son mayores que cero, y viceversa para las fase fría. Es más probable que una tormenta tropical se convierta en huracán durante la fase cálida.

También suele ser un preludio de variaciones multidecadales tales como sequías del Sahel, precipitación en el Caribe, intensificación del verano en el Hemisferio Norte y de la presión a nivel del mar sobre la región Noratlántica (Bell y Chelliah, 2006).

Se ha discutido ampliamente que el cambio de dicha temperatura superficial del océano se deba a un cambio importante de la circulación Termohalina en esta zona (Zhang and Wang, 2013).

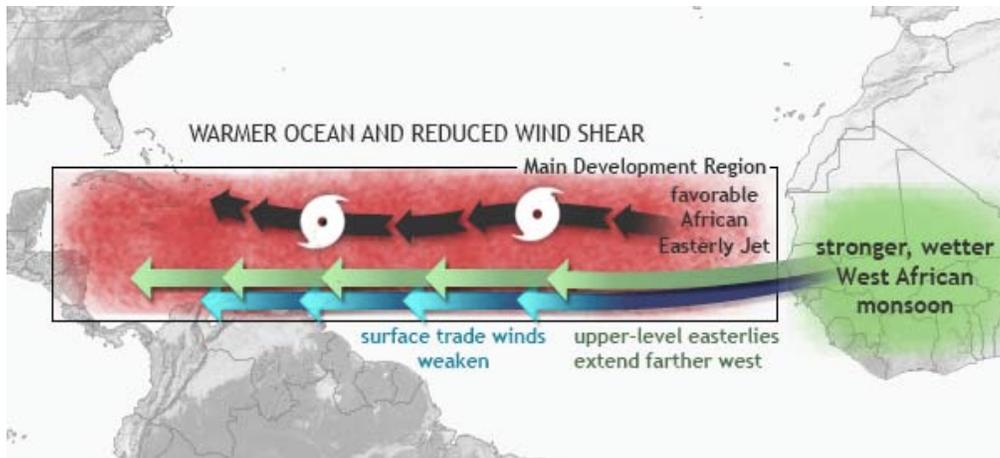


Figura 4. Condiciones que se generan en el océano Atlántico durante la fase cálida de la OMA que favorece el desarrollo de CT, pues se tiene mayor temperatura de la superficie del océano y una cizalladura vertical del viento reducida mientras se tiene una actividad importante del monzón de África. (Bell y Chelliah, 2006).

- El Niño-Oscilación del Sur (ENSO)

Climatológicamente, existe una baja presión sobre Australia en el Pacífico Oeste, mientras que en las costas Oeste de Sudamérica existe una alta presión, esto es conocido como la fase Neutra de la ENSO. La Oscilación del Sur describe las diferencias meridionales de las anomalías de presión sobre el nivel del mar, mientras que El Niño son las anomalías de las temperaturas superficiales del océano a lo largo del océano Pacífico tropical.

ENSO es un fenómeno natural a gran escala del sistema océano-atmósfera, el cual implica temperaturas en la superficie del océano fluctuantes en la región ecuatorial del Pacífico y éstas influyen en la fluctuación de la circulación atmosférica suprayacente. Este fenómeno, causa variaciones en los patrones climáticos en todo el globo, ocasionando precipitaciones o sequías que no se presentan normalmente.

El afloramiento de aguas frías en las costas oeste de Sudamérica tiene consecuencias importantes en la atmósfera, pues el aire que está cercano al océano se enfría e impide la convección y esto genera cierta circulación conocida como Celda de Walker (ver figura 5). Esta oscilación se presenta en dos diferentes fases, El Niño y La Niña, los cuales se relacionan con cambios en la temperatura superficial del océano Pacífico.

Durante El Niño, existe un incremento considerable de la temperatura superficial del océano dentro del Pacífico este ecuatorial. Estos aumentos ocurren de manera intermitente con intervalos de 2 a 7 años y con una duración entre 9 y 12 meses. También se asocia a esta fase temperaturas oceánicas más frías dentro del Atlántico ecuatorial (Landsea, 2000). Análogamente, durante La Niña se presenta un enfriamiento de las temperaturas oceánicas

en el Pacífico Este-central, y una fase de temperaturas oceánicas más cálidas en el Atlántico Ecuatorial, pero sus intervalos son desde 3 hasta 5 años y duran de 1 a 3 años.

Concretamente en la cuenca del Atlántico Norte, El Niño (La Niña) se asocian con un incremento (decremento) en el número de huracanes, debido a cierta circulación de los vientos en superficie y en altura que aumentan (disminuyen) la cizalladura vertical del viento (Gray, 1984). Debido a esto, ENSO es un factor importante que dicta el desarrollo de los ciclones tropicales tanto en el Océano Pacífico como en el Atlántico.

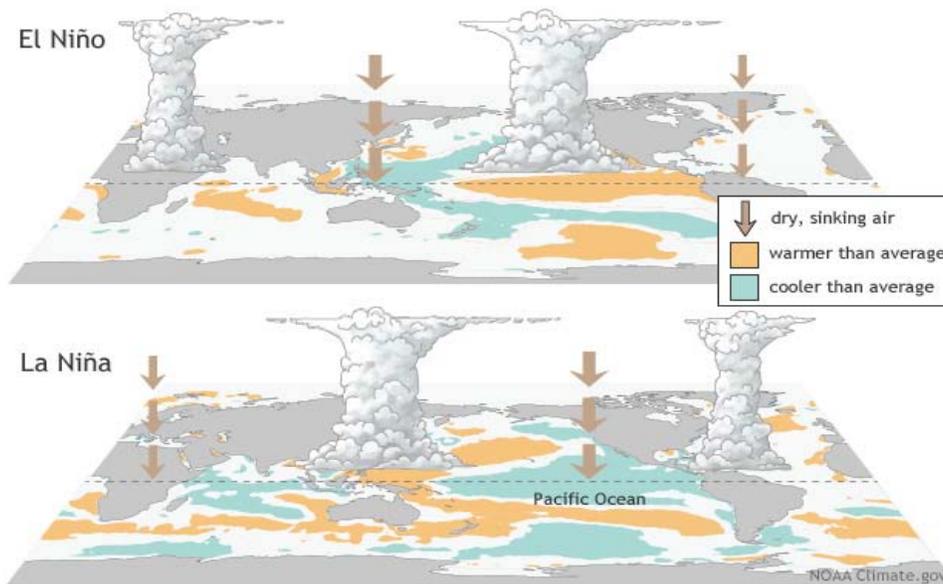


Figura 5. Diagrama de cómo se ve afectada la circulación de Walker durante períodos de El Niño/La Niña, los sombreados naranjas son anomalías cálidas, mientras los azules son anomalías frías y las flechas indican las zonas de aire descendente; cabe destacar que la convección húmeda profunda se propicia en el Atlántico durante períodos de La Niña (Recuperado de (NOAA)).

- Índice de la temperatura superficial del mar Caribe (CAR, en su siglas en inglés)

Este índice describe las anomalías de la temperatura superficial del océano en una región delimitada en el mar Caribe (ver figura 6), se realiza una medición promedio cada mes, cada año desde 1950 hasta 2015. Las anomalías están calculadas tomando como referencia la climatología de 1981 a 2010.

Es importante notar el comportamiento de la temperatura superficial del océano en esta región, pues dentro de ella transitan la mayoría de los sistemas que afectan las costas del mar Caribe y el golfo de México.

- Índice de la temperatura superficial del Atlántico Norte Tropical (TNA, en sus siglas en inglés)

Es un índice en el cual se promedian las anomalías de la temperatura superficial del océano dentro de un área delimitada por 60°W, 20°W y 6°N, 18°N sumada al área delimitada por 20°W, 10°W y 6°N, 10°N (ver figura 6). Se tiene una medición promedio cada mes, cada año desde 1948 hasta 2015, las anomalías están calculadas tomando como referencia la climatología de 1981 a 2010.

La importancia de notar la estructura de la temperatura superficial del océano en esta área yace en el hecho de que en ella se encuentra la antes mencionada MDR, que es de vital importancia para los sistemas tropicales que provienen de las ondas del Este de África.

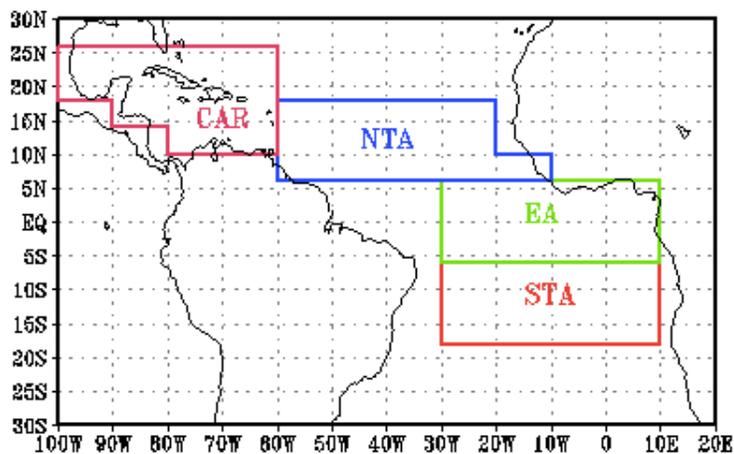


Figura 6. Se muestra en el mapa, las regiones que se consideran para calcular el índice CAR y el índice NTA, los cuales son promedios mensuales de temperatura superficial del océano, también se muestran las regiones del Atlántico Este y del Atlántico Sur Tropical, que no están consideradas para este estudio. Recuperado de NOAA.

1.2. ANTECEDENTES

La caracterización climática de los CT y/o huracanes y los cambios en cualquier tipo de estas características ha suscitado un gran interés desde principios del siglo XXI (Landsea, 2007). Son numerosos los trabajos que se han llevado a cabo sobre la distribución espacio-temporal de los CT y/o huracanes, así como tendencias y su variabilidad climática. Así por ejemplo, Webster et al (2005) examinaron la frecuencia y duración de los CT durante 35 años, encontrando un incremento en la proporción de huracanes de categoría 4 y 5. Xie et al (2005) estudiaron la variabilidad espacio-temporal de las trayectorias de los huracanes

sobre el AN. Holland y Webster (2007) analizaron la frecuencia de los CT en el Atlántico desde 1855, encontrando el doble de CT durante los pasados 100 años.

En un amplio panorama, se encuentra que la temperatura de la superficie del océano es el proxy más utilizado para determinar la actividad ciclónica, ya que es uno de los principales factores que influyen en la formación de CT (Goldenberg et al. 2001; Mann y Emanuel, 2006). Por tanto, la actividad de CT se ha asociado con aquellos ciclos climáticos con los que varían ciertas características en el sistema océano-atmósfera en la región del AN, particularmente la temperatura superficial del océano, y la circulación de los vientos.

Se acepta el hecho de que El Niño disminuye la actividad de ciclones en el Atlántico, mientras que La Niña crea condiciones favorables para el desarrollo de dichos sistemas. Esta influencia se da primordialmente por el cambio en el flujo de niveles altos que a su vez intervienen en la cizalladura vertical del viento, la cual aumenta en la cuenca del Atlántico durante eventos de El Niño y disminuye en La Niña (Landsea et al, 1999). A pesar del aumento general de los CT durante los años La Niña, existe una pequeña diferencia en la probabilidad de que los huracanes impactan a lo largo de las costas del Golfo, y estas áreas suelen conducir a un mayor transporte hacia dentro del continente. (Xu, et al., 2017).

El Modo Meridional del Atlántico (AMM) es el modo dominante en la variabilidad tropical del acoplamiento SST/viento (Amaya et al., 2016). Incluso se ha observado una significativa correlación entre el Modo Meridional del Atlántico (MMA) y El Niño – Oscilación del Sur (ENOS) con respecto a la cizalladura vertical del viento, cuando se tiene una fase cálida de la AMM y una fase fría de ENSO se muestra una cizalladura anómalamente baja en el Atlántico. (Vimont y Kossin, 2007).

En lo que respecta a la variabilidad multidecadal, la AMO afecta la actividad ciclónica en la cuenca del Atlántico, mientras se tiene una fase cálida (fría) la actividad ciclónica aumenta (disminuye). Goldenberg et al (2001) encontraron periodos multidecadales de baja/alta actividad coincidiendo con las fases de la AMO. Así, estos autores detectaron un periodo de elevada actividad hasta el 1925, entre 1926 y 1970 la actividad fue baja y alta de nuevo a partir de 1995. También se ha encontrado una relación entre la AMM y la AMO, pues una fase positiva de la AMO genera un desplazamiento hacia el Norte de la Zona Inter Tropical de Convergencia, lo cual hace que la AMM sea más persistente y otorga a las tormentas tropicales que se formen mayor duración durante esta fase (Klotzbach y Gray, 2008).

ENSO y AMM han mostrado tener influencias intra-cuenca en las tormentas del AN a través de corrientes atmosféricas direccionadas, cizalladura vertical del viento, y otros fenómenos océano-atmósfera. Estos cuatro modos de variabilidad están conectados a la actividad de huracanes y a la temperatura superficial del Océano Atlántico; además de tener cierto impacto en la localización de la génesis de los huracanes y en la trayectoria que estos siguen. (Kossin et al., 2010).

Por otro lado, durante la última parte de la estación lluviosa, que va de Agosto a Octubre (ASO), la variabilidad de la convección profunda en el Caribe está modulada por la SST tanto en el Pacífico como en el Atlántico ecuatorial, mediante la modulación de la estructura de la cizalladura vertical del viento en la troposfera, por lo que eventos cálidos (fríos) en el Pacífico ecuatorial aumentan (disminuyen) la cizalladura vertical del viento en el Caribe, lo que trabaja en contra (a favor) de la convección profunda en esa región. (Alfaro, 2007).

La cuenca del Atlántico es muy peculiar, por ejemplo, en la temporada de huracanes de 2016 se presentaron diversas variables que favorecían las condiciones para la formación de huracanes durante los meses de mayor actividad en la MDR, sin embargo, la humedad relativa de niveles medios no fue favorable para el desarrollo de CT, y por solo esta condición se tuvo un decremento de la actividad ciclónica durante ASO (Collins y Roache, 2017).

La influencia de la temperatura superficial del océano en la frecuencia de los CT categoría 5 que llegan a tierra es más notable en la costa norte mexicana. El incremento de la frecuencia en los impactos en tierra de los CT categoría 5 fue consistente en un análisis independiente para el océano Pacífico, que muestra el hecho de que la temperatura superficial del océano tiene su mayor impacto en la formación de los CT más intensos dentro del Pacífico noreste. (Hall y Tippett, 2017).

Son numerosos los trabajos que han analizado distintos aspectos de los CT y/o huracanes del AN que llegan a tocar tierra sobre EUA (ej, Solow y Moore, 2002; Pielke, 2008; Landsea, 2007; Estrada et al., 2015). Sin embargo, en el mejor de nuestros conocimientos, apenas existen estudios acerca de los CT y/o huracanes del AN que afectan a México. Gutzler et al (2013) analizan la variabilidad interanual de los CT que afectan a la costa del Pacífico nororiental tanto de EUA como de México. Larson et al (2005) examinan la variabilidad interanual de los CT que tocan tierra en EUA y México y la relación de éstos con la precipitación. Ellos afirman que existe una variabilidad asociada a ENSO y la oscilación del Ártico (AO, en sus siglas en inglés). Díaz (2010) investiga la influencia en México de los CT

que se generan tanto en el océano Atlántico como en el Pacífico Nororiental. Esta autora llega a la conclusión de que en el Pacífico se genera la mayor densidad de ciclones tropicales, aunque por las circulaciones oceánicas y atmosféricas tienden a alejarse de las costas mexicanas, no ocurriendo así para el Atlántico. El estudio muestra que no existe una tendencia clara hacia el aumento en intensidad o frecuencia de los ciclones tropicales en México. En este trabajo también se afirma que la frecuencia destructiva de algunos CT en los últimos años en México habría provocado que se crea que los hidrometeoros asociados a los mismos se han incrementado en intensidad como consecuencia del cambio climático global. (Díaz, 2010)

2. OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN

El principal objetivo de este trabajo consiste en determinar las principales características climáticas de los CT de la cuenca del AN y las de los CT que afectan a México. Para ello se ha articulado el trabajo en una serie de objetivos específicos que se enumeran a continuación.

1. Para determinar las principales características climáticas de los CT de la cuenca del AN se analizará:
 - (a) La distribución espacial de las zonas de ciclogénesis, presión mínima y ciclólisis.
 - (b) La distribución anual y mensual de la frecuencia y duración de CT.
 - (c) La posible relación entre la variabilidad de los CT y los principales modos de variabilidad climática natural que presentan impacto sobre la zona del AN.
 - (d) Se examinarán los factores anteriores para los CT más extremos, es decir, los huracanes y se detallará si se observan diferencias.

2. El segundo objetivo de esta tesis consiste en examinar los puntos anteriores (a) - (d) para los CT del AN que afectan específicamente a la República Mexicana. De esta forma se explorarán las particularidades de los CT y huracanes que afectan a nuestro país, que como se ha mencionado en la sección anterior, son aspectos muy poco investigados hasta el momento.

El estudio de estos sistemas atmosféricos es de vital importancia para poder resguardar el bienestar de ciertos poblados costeros que se ven afectados con gran frecuencia por eventos extremos relacionados con CT. Entonces resulta necesario poder dar un pronóstico con mayor certeza de la ocurrencia de estos fenómenos en nuestro país, para evitar pérdidas materiales y en el peor de los casos incluso pérdidas humanas. Además, será un aporte innovador, ya que no existen apenas estudios de este tipo para el territorio mexicano.

3. DATOS Y MÉTODOS

(a) Datos

La información de los CT fueron obtenidos de la base de datos HURDAT2 (Landsea et al., 2015), la cual es desarrollada por el Centro Nacional de Huracanes (NHC, por sus siglas en inglés) que pertenece a la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés). Para el análisis aquí presentado se tomó la base de datos HURDAT2 con una extensión temporal de 1851 a 2015. La base de datos contiene un indicador, nombre, año, mes, día, hora, categoría, longitud, latitud, presión central y diferentes velocidades medidas en diferentes regiones del ciclón para cada CT que se desarrolle dentro de la cuenca del Atlántico.

También se han recopilados distintos índices mensuales de modos climáticos. Los índices de las oscilaciones climáticas utilizados, se han descargado todos ellos de la página web del Earth System Research Laboratory (ESRL) que depende de la NOAA. Tienen el mismo formato de una medición promedio mensual por cada año y se han descargado los períodos más largos existentes que coincidan temporalmente con el periodo de CT existente. Los detalles de cada uno se comentan a continuación:

- **AMM**

Este índice cuenta con una cobertura temporal de 1948 hasta el 2015, tiene un valor promedio en cada mes, cada año. Describe la variabilidad meridional en el Océano Atlántico, específicamente en la región comprendida entre 32°N, 21°S y 74°W, 15°E. El índice resulta de un análisis de covarianza máxima entre los datos de temperatura superficial del océano y las componentes horizontales del viento a 10 m de altura durante el periodo de 1950-2005, el ciclo estacional se ha eliminado y los datos no tienen tendencia.

- **AMO**

Este índice cuenta con una cobertura temporal más amplia, de 1856 hasta el 2015, y posee un valor promedio cada mes, cada año. Esta serie de tiempo está calculada a partir de una base de datos de temperatura superficial del océano global denominada Kaplan SST (Kaplan et al., 1998). El índice básicamente consta de las anomalías de temperatura superficial del océano para la región del Atlántico Norte (0 a 70°N). Cabe destacar que el índice no tiene ninguna tendencia.

- **ENSO**

Se ha utilizado el índice BEST (Bivariate ENSO Timeseries) que resulta de la combinación de las series de tiempo estandarizadas del índice de la Oscilación del Sur y el índice Niño3.4, los cuáles explican el fenómeno ENSO en su componente atmosférica y oceánica, respectivamente (figura 7). Se tiene una medición promedio mensual, cada año desde 1948 hasta 2015. El índice de la Oscilación del Sur está compuesto por la diferencia de presión entre las anomalías de presión de Tahití y las anomalías de presión de Darwin, Australia. El índice Niño 3.4 consta de las anomalías de temperatura superficial del océano comprendido entre 5°N - 5°S y 170°W - 120°W.

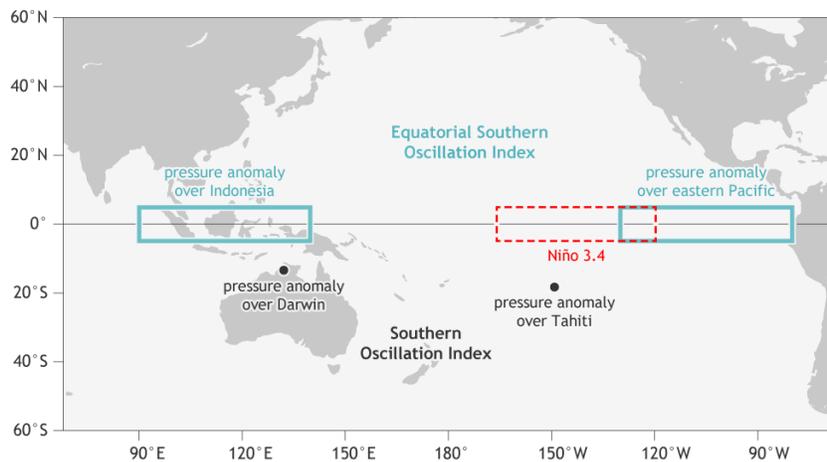


Figura 7. Regiones que se consideran para calcular el índice BEST. La Oscilación del Sur consiste en la diferencia de presión entre las zonas demarcadas por los dos puntos negros, mientras que El Niño3.4 está representado las anomalías se temperatura superficial del océano dentro de las líneas punteadas en rojo (recuperado de NOAA).

- **CAR**

Consiste en una serie de tiempo en la cual se promedian las anomalías de la temperatura superficial del océano dentro de un área delimitada del mar Caribe. Se tiene una medición promedio cada mes, cada año desde 1950 hasta 2015. Los datos son obtenidos de la base de datos NOAA ERSST y las anomalías están calculadas tomando como referencia la climatología de 1981 a 2010.

- **NTA**

Es una serie de tiempo en la cual se promedian las anomalías de la temperatura superficial del océano dentro de un área delimitada por 60°W - 20°W y 6°N - 18°N sumada al área delimitada por 20°W - 10°W y 6°N - 10°N. Se tiene una medición promedio cada mes, cada año desde 1950 hasta 2015. Los datos son obtenidos de

la base de datos NOAA ERSST y las anomalías están calculadas tomando como referencia la climatología de 1981 a 2010.

(b) Métodos

En primer lugar, a la base de datos se le anexó una numeración para saber con cuantos CT se cuenta, y el número de mediciones de la trayectoria de cada uno de ellos. El inicio y el final de cada sistemas registrado viene indicado dentro de la base de datos. También se han despreciado todos aquellos fenómenos que cuenten con menos de 5 mediciones en su trayectoria, pues indicaría que han tenido su ciclogénesis y ciclólisis en un mismo día, ya que las mediciones se realizaron cada 6 horas.

Dentro de la base de datos se contabilizó el punto geográfico inicial de cada una de las trayectorias de los CT en el AN con la ayuda de el número de mediciones, al localizar estos puntos dentro de un mapa y haciendo una densidad de puntos, encontramos las principales zonas de ciclogénesis. Procediendo de manera similar con los puntos geográficos finales de las trayectorias para reconocer las principales zonas de ciclólisis. Por otro lado, dentro de cada una de la trayectorias de los CT, se localizó el punto geográfico donde se registró la presión central mínima del sistema tropical para aquellos que tuvieran disponible esta variable, y de este modo conocer las zonas importantes de mayor intensidad de los CT. Estos tres procedimientos fueron repetidos para el caso de aquellos CT que afectan directamente la Republica Mexicana mediante mareas de tormenta y precipitaciones importantes.

Posteriormente, se construyeron índices de frecuencia y de duración para todos los ciclones de la base de datos y para todos los huracanes de la base de datos. Los índices de frecuencia de CT se construyeron a partir de una matriz con dimensiones 13x164 (el registro consta de 164 años). En la primera columna se registró el año en el que ocurrió el ciclón, mientras que en las columnas restantes, por medio de un contador, se llenaban con el número de ciclones que se tenían registrados por cada mes. Para huracanes, se repitió el mismo método, considerando que en las bases de datos cuando la columna de categoría demarca el número 3, nos indica cuando algún sistema alcanzara la intensidad de huracán.

En cuanto a la duración de CT, de igual manera fue a partir de una matriz de dimensiones 13x164, la primera fue la columna con cada año registrado, para las restantes se nota que las mediciones registradas diariamente se realizan cada 6 horas resultando en 4 mediciones diferentes cada día. Pero existían ciertos sistemas excepcionales que contaban con 5 mediciones los cuales representan solo el 5% de la base de datos total. Con

esto en mente, se contó las horas que acumulaba cada sistema dividiendo dicho valor entre 4 para saber la duración en días de cada sistema, la cual es una medida aproximada considerando el error sistemático que acarreamos por despreciar la existencia de una quinta medición en ciertos sistemas; para completar entonces las demás columnas se realizó el promedio mensual: $\frac{\Sigma \text{días}}{\Sigma \text{números de CT}}$ para un mes dado; cada fila corresponde con el número de años de las bases de datos. Análogamente se crearon los índice de duración de huracanes, pues en las bases de datos la columna de categoría nos indica que sistemas alcanzan la intensidad de huracán.

De este modo, se construyeron 4 índices de actividad ciclónica: frecuencia de ciclones, frecuencia de huracanes, duración de ciclones, duración de huracanes y se estudió su distribución mensual y anual.

Para examinar la variabilidad climática, en general se utilizó un método de correlación de Pearson de ventanas móviles, para lograr identificar con mayor facilidad las escalas de tiempo en las que se ve afectada la actividad ciclónica con respecto a cada uno de los ciclos climáticos. El coeficiente de correlación de Pearson está definido como la covarianza entre dos variables, dividida entre la desviación estándar de ambas y finalmente resultando en valores entre +1 a -1. De ser +1 implica una relación linear perfecta donde la variable dependiente (para nuestro caso es la actividad ciclónica) aumenta si la variable independiente (modos climáticos) aumenta también. De modo que al tener -1 sería una relación linear perfecta pero inversa, es decir, en la cual al decrecer la variable independiente, la variable dependiente crece. Cuando el valor es 0 o muy cercano a él, implica que no existe ninguna correlación entre ambas variables.

El método de ventanas móviles, básicamente consta de calcular la correlación estadística entre 2 series de datos dentro de diferentes períodos. Se define una primera ventana que comienza en el primer punto de las series de datos y la correlación es realizada hasta n datos seleccionados. En la siguiente, el primer dato será el segundo punto y se considera hasta $n+1$ datos seleccionados para realizar la correlación. Así sucesivamente hasta que se alcance el final de la serie de datos. El tamaño de la ventana (n) depende entonces de la cantidad de datos que tienen nuestras series de datos y para el análisis realizado, se ha ideado la forma de tener los resultados para ventanas de diferentes tamaños dentro de un mismo gráfico. De esta manera determinar en qué escala de tiempo se ve influenciada la actividad ciclónica por los diferentes modos climáticos. Se analizó la significancia estadística de las correlaciones mediante la prueba de t de Student. Para todos los casos se consideró un nivel de confianza del 95%.

A continuación, se creó una segunda base de datos que contenía los CT que afectan el territorio mexicano, sin que necesariamente la ciclólisis haya tomado lugar dentro de la república. Para ello, se consideró el territorio mexicano más una extensión de 5º al este desde las costas del golfo de México y del mar Caribe (ver figura 8), de acuerdo con la metodología utilizada por Gutzler et al (2013). A partir de esta base de datos se repitieron los análisis arriba mencionados. Todo lo expuesto en la presente sección se ha calculado con el lenguaje de programación IDL.

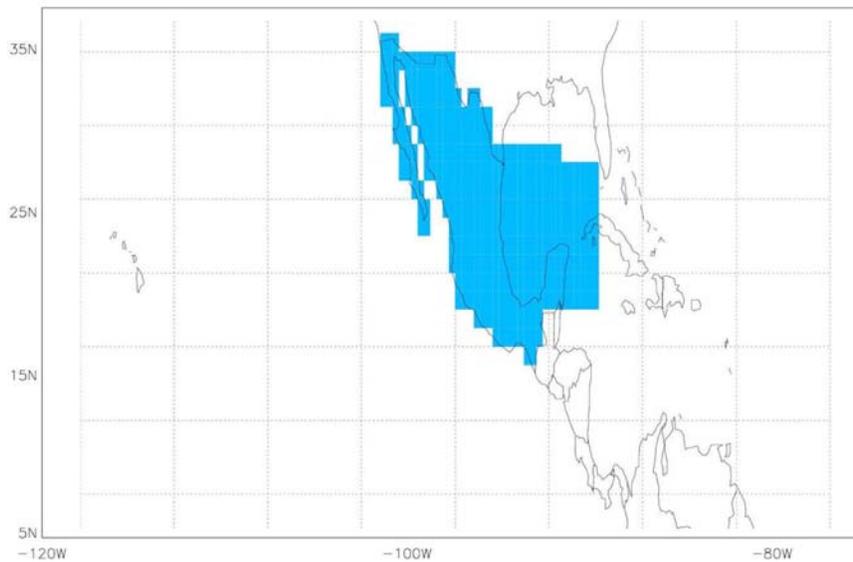


Figura 8. Delimitación geográfica para elaborar la base de datos de CT y huracanes que afectan el territorio mexicano.

4. RESULTADOS

En la presente sección se muestran los principales resultados encontrados.

4.1 Regiones de importancia en el desarrollo de los CT

En la esta sección se muestran las trayectorias que siguieron los CT registrados dentro del Atlántico Norte con un total de 1771 fenómenos, desde 1851 hasta 2015. Así mismo, se muestra la localización de las zonas de ciclogénesis y ciclólisis (puntos inicial y final de la trayectoria) y las zonas donde los CT alcanzan presión mínima central, es decir, las zonas donde los CT alcanzarían mayores velocidades y potencialmente pueden presentar mayores impactos.

Podemos apreciar de la figura 9, la gran cantidad de sistemas tropicales que se presentan en la cuenca del Atlántico Norte, y se puede notar más aún la gran densidad de sistemas que en algún punto de su trayectoria se localizan en el mar Caribe y en el golfo de México.

Es importante diferenciar el punto inicial de la trayectoria de los sistemas tropicales para determinar en qué zonas geográficas se cuentan con las condiciones necesarias climatológicas para que se generen dichos sistemas, las cuales resultan ser la Región Principal de Desarrollo (MDR), el mar Caribe y el golfo de México (ver figura 10a). Esto tiene sentido al saber que estas regiones suelen tener temperatura superficiales oceánicas suficientemente cálidas como para permitir el desarrollo de los CT. (Kushnir, 1994)

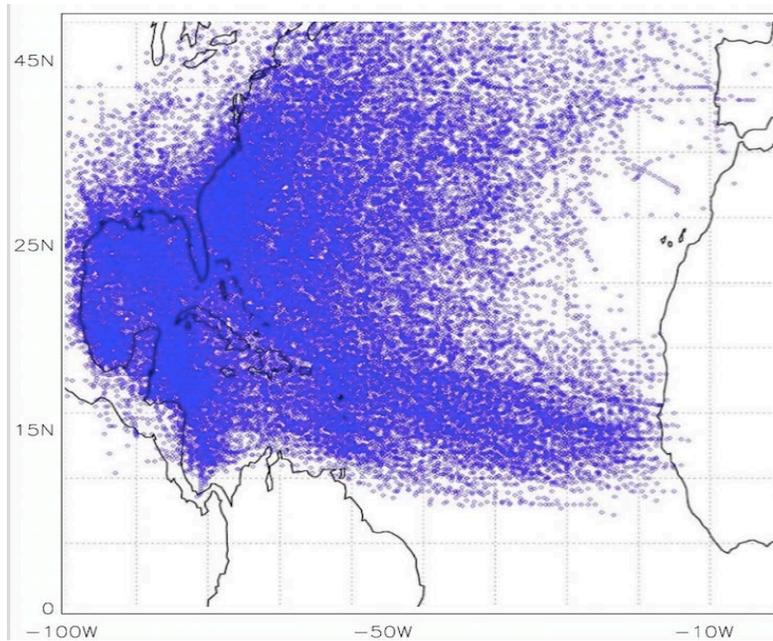


Figura 9. Se muestran las trayectorias de todos los CT en el Atlántico Norte registrados en la base de datos HURDAT2.

Además de ver las zonas importantes de ciclogénesis, también cabe resaltar que la mayoría de los sistemas logran su presión mínima central (lo cual está asociado a una mayor intensidad) estando muy cercanos a las costas del Golfo de México y el Caribe (figura 10b). En algunos casos puede notarse que esto sucede más al Norte, cerca de las costas de EEUU e incluso Canadá. Esto podría explicarse en parte, si suponemos que aquellos ciclones fueron afectados de manera importante por la fase negativa de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO, en sus siglas en inglés) que propicia un recurvamiento de la trayectoria (Choi et al., 2009) y en vez de impactar en alguna costa, se van disipando gracias a que viajan por mayores latitudes donde la temperatura del océano empieza a ser cada vez más fría.

Las zonas de ciclólisis (figura 10c) son importantes, pues nos dan un indicio de donde han afectado los sistemas tropicales históricamente, y podemos saber que poblados tienen mayor probabilidad de ser afectados por algún sistema tropical. Existen zonas sobre el océano donde dichos sistemas se disipan. Sin embargo, las zonas con mayor incidencia de ciclogénesis son zonas terrestres, en su mayoría en el centro de México y sureste de EUA.

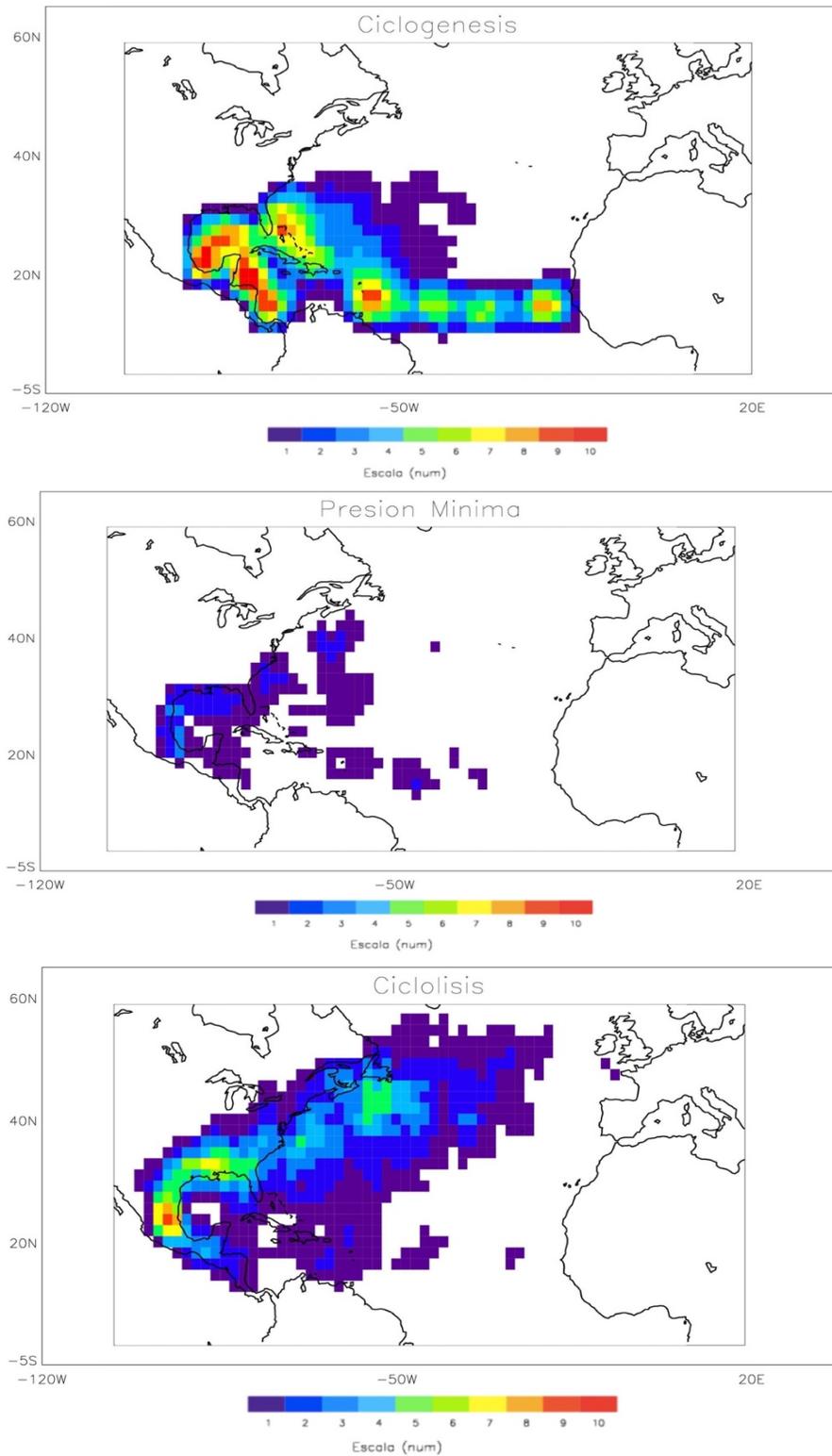


Figura 10. Mapa donde se muestran las regiones de (a) ciclogénesis, (b) presión mínima y (c) ciclólisis de los CT registrados en la base de datos HURDAT2. Nota.-Los valores de la presión mínima central varían de 940 mb a 970 mb. No todos los sistemas tropicales de la base de datos cuentan con esta variable.

4.2 Frecuencia y Duración de los CT

En la figura 11 se presentan los gráficos de frecuencia en los cuales podemos ver la tendencia anual y mensual tanto de ciclones tropicales, como de huracanes.

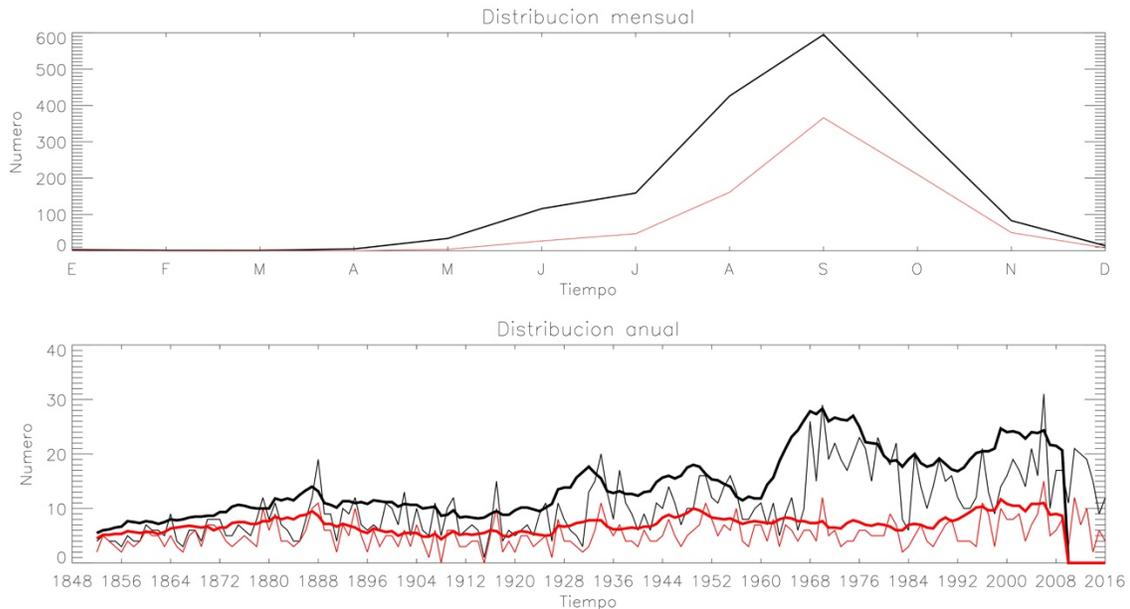


Figura 11. Distribución (a) mensual y (b) anual de la frecuencia de los CT (línea negra) y los huracanes (línea roja) dentro de la cuenca del Atlántico Norte. Las líneas gruesas representan un suavizado con una ventana 7 años.

En cuanto a la distribución mensual (figura 11a), es importante notar que la actividad de los CT va en aumento progresivamente desde finales de mayo, para llegar a un máximo en la distribución, que es en septiembre con un registro de 600 CT durante ese mes a lo largo de los 165 años analizados, y de ahí hasta Diciembre la disminución se da de manera abrupta. En cuanto a los huracanes, se nota que la mayoría de los sistemas formados toman lugar de agosto a octubre (ASO) lo cual es consistente con la definición oficial de la temporada de huracanes para el AN dada por el Centro Nacional de Huracanes (NHC, por sus siglas en inglés).

En el caso de la frecuencia de sistemas tropicales, se puede notar que a grandes rasgos, se podría considerar constante la actividad ciclónica en el Atlántico Norte hasta los 1920s. Sin embargo, esta tendencia en la serie de tiempo puede ser debida al gran sesgo que se tienen en las mediciones más antiguas. A pesar de que se han descartado los CT de un día de duración o menor, ya que es probable que a finales del siglo XIX y principios del siglo pasado, muchos de estos sistemas de corta duración no fueran siempre registrados. La

implementación de la tecnología aeronáutica se comenzó a utilizar a partir de los 1940s, mientras que después de los 1960s se comenzó a registrar las mediciones también con tecnología satelital. Esto hace más confiable esta última parte de la base de datos para hacer un mejor análisis.

Es posible notar cierta oscilación interdecadal desde 1920 (figura 11b). Estos cambios en la actividad ciclónica podrían atribuirse a cierta variabilidad climática natural dentro de la cuenca del Atlántico Norte. Pero este análisis será objetivo de futuras investigaciones. A manera de resumen, se identifica una temporada con niveles bajos de actividad ciclónica de 1950 – 1965 y de 1975 – 2000, cabe destacar que se tiene registrado un importante evento del El Niño entre 1990 y 1995; en contraste a esta temporada, entre los períodos de 1965 – 1975 y del 2000 en adelante, se nota importantes niveles altos de actividad ciclónica en la cuenca del Atlántico.

La duración de los CT es mayor durante los meses ASO, con un máximo registrado en Septiembre de 7.5 días de tormenta, esto es, en el análisis de 1851 a 2015 el promedio de duración de los CT en ese mes fue de 7.5 días. Aunque no hay una actividad considerable de CT durante los meses de Mayo a Junio, los que llegan a formarse tienen una duración considerable de aproximadamente 3 días de tormenta. En el caso de los huracanes es consistente con la temporada de huracanes, pues durante ASO la duración es mayor (máximo de 5 días de tormenta), mientras que para los meses restantes es bastante despreciable (figura 12a).

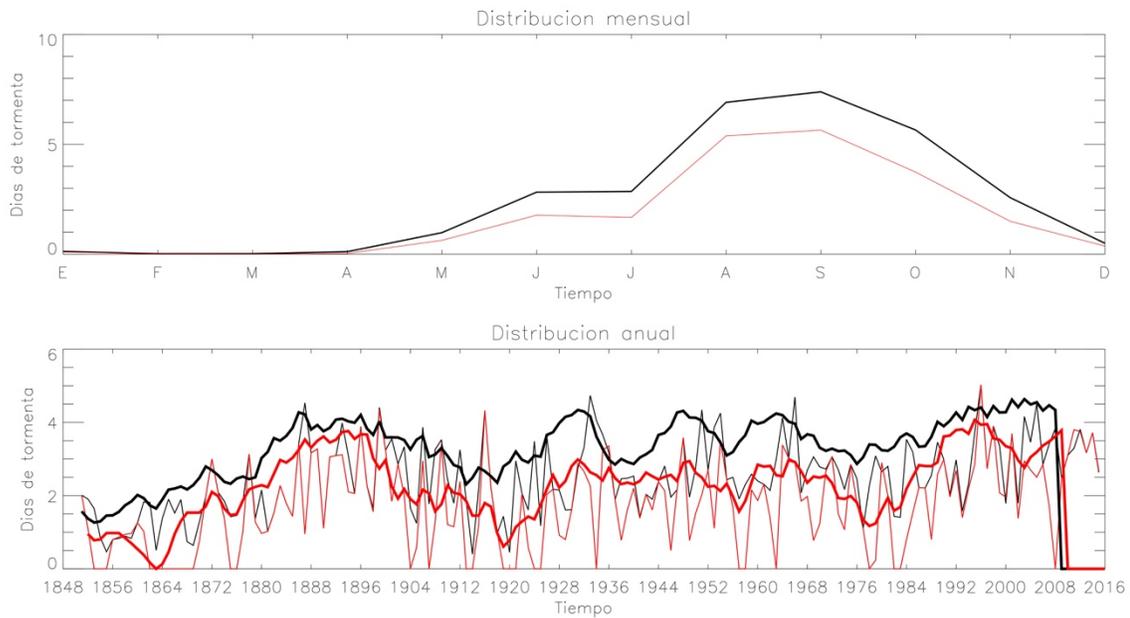


Figura 12. Distribución (a) mensual y (b) anual de la duración de los CT (línea negra) y los huracanes (línea roja) dentro de la cuenca del Atlántico Norte. Las líneas gruesas representan un suavizado con una ventana de 7 años de las curvas antes mencionadas.

Por otra parte, la duración de los sistemas tropicales muestra mayor variación a lo largo de la serie de tiempo (figura 12b), independientemente lo confiable que pueda llegar a ser la información durante las primeras décadas. Tomando en cuenta el período más confiable, que sería a partir de los 1960s, se nota un decremento en la duración de los CT que va de 1968 a 1984 aproximadamente, seguido por un aumento en la duración de los sistemas de 1984 hasta la actualidad. Para el caso de los huracanes, también podemos notar temporadas de mayor duración de dichos fenómenos para los períodos de 1955- 1968 y 1990 – 2005, en el período intermedio de estas temporadas se tiene un período con duraciones pequeñas de huracanes, es decir, entre los años 1970 – 1985 la duración de los huracanes no rebasa los 2.5 días.

Una vez conocida la escala temporal de la actividad ciclónica, tanto en su frecuencia como en su duración, nos proponemos analizar qué modos climáticos, (y, si fuera posible intuir los mecanismos físicos) están interviniendo en la variabilidad de los CT y huracanes.

4.3 Correlación de los CT con los modos climáticos

Para los índices relacionados con los CT y huracanes se han tomado el promedio de los meses con mayor actividad en el AN, agosto, septiembre y octubre (en adelante ASO). En el apéndice A (figura A1) se muestran las correlaciones entre el AMM y todos los índices

de actividad ciclónica realizados. Los contornos de colores indican el valor del coeficiente de correlación, los colores rojizos son correlaciones positivas y los colores azulados indican correlación negativa, entre más fuertes sean los colores, más intensa es la correlación, los valores van de 0.2 en 0.2, desde el -1 hasta el +1. Los diagramas muestran en el eje horizontal los años y en el eje vertical el parámetro de ventana móvil, el cual es básicamente el número de datos que se consideraron para hacer las correlaciones, representado también en años. En la figura 13 se presenta la correlación en ventanas móviles entre el AMM y los índices de duración de CT y frecuencia de huracanes.

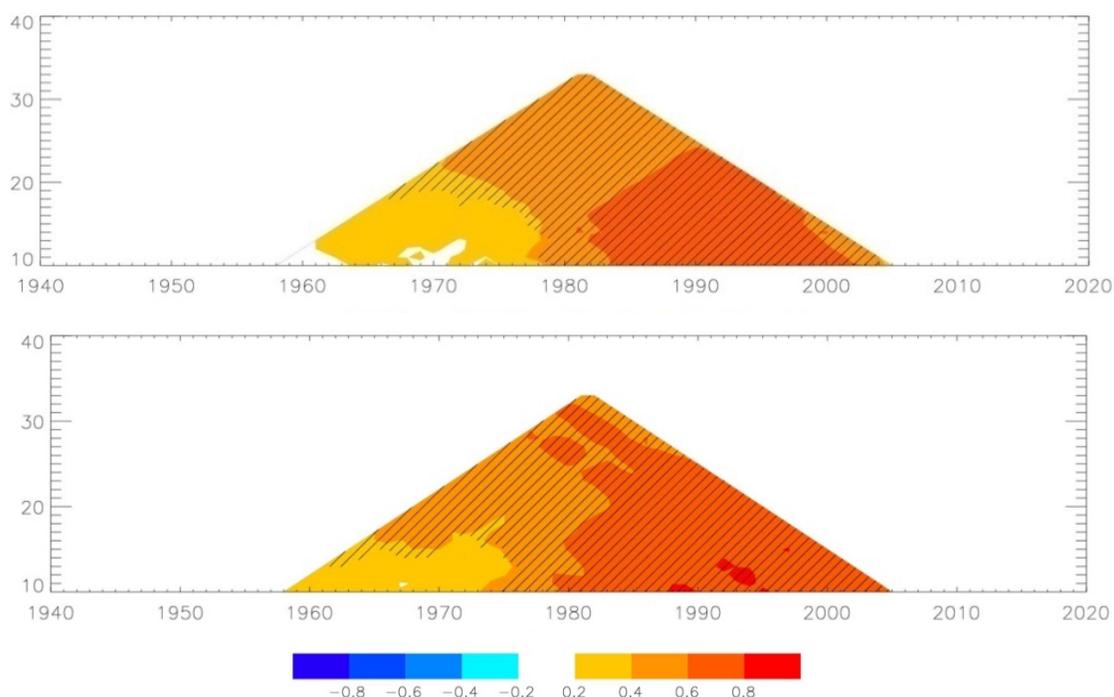


Figura 13. Correlación con ventanas móviles entre el índice AMM y (a) el índice de la duración de los CT (b) la frecuencia de huracanes. En ambos casos durante los meses de mayor actividad ciclónica (ASO). Las zonas rayadas indican que la correlación es significativa al nivel del 95%.

En estas dos gráficas, podemos notar que tenemos mayor duración de ciclones al mismo tiempo que tenemos este modo climático con valores positivos (ver figura 13a), y menor duración para el índice AMM en fase negativa. Es lógico pensar que como durante la fase positiva de la AMM una gran parte de los CT presentan mayor duración, pueden seguir aumentando su intensidad hasta llegar a categoría de huracán (ver figura 13b). Este resultado es consistente con estudios previos en los cuales se describen mecanismos físicos que son alterados durante la fase positiva de la AMM y resultan en una mayor actividad de ciclones. El principal mecanismo podría ser la reducción de la cizalladura vertical del viento gracias a la circulación de los vientos en superficie y en altura en la región del AN, además

de la convección intensa que se da por las anomalías positivas en la temperatura superficial oceánica.

Se puede notar una mayor correlación positiva (y significativa en un nivel de 95%) para los últimos 25 años en todas las ventanas temporales. Para ambos casos, la significatividad de las correlaciones es mayor o igual al 95% para todo el período de estudio, cuando se considera una ventana de 20 años o mayor. Dado que el valor promedio del coeficiente de correlación entre la AMM y la duración de los CT es de 0.6 en general, entonces el 36% de la varianza en la duración de los CT del Atlántico Norte puede estar explicada por la fase positiva de la AMM. Mientras que el promedio del coeficiente de correlación entre la AMM y la frecuencia de huracanes es de 0.7, el 49% de la varianza en la frecuencia de los huracanes del Atlántico puede estar explicada al presentarse una fase positiva de la AMM.

Mientras mayor sea la anomalía positiva de la AMM, se tendrán temperaturas más cálidas que producirán más tormentas y además tendrán mayores posibilidades de ser más intensas. Pero no toda la variabilidad está explicada por la AMM, otros factores deben estar contribuyendo a la incipiente actividad ciclónica. En la figura 14 se presenta la correlación en ventanas móviles entre la AMO y los índices de frecuencia y duración de CT. En el apéndice A (figura A2) se muestran las correlaciones entre la AMO y los índices relacionados con los huracanes.

En cuanto a la AMO, podemos notar cierta influencia de esta oscilación climática en la frecuencia de ciclones tropicales y la duración de los mismos. Para ventanas de entre 20 y 30 años, la correlación es positiva durante la fase cálida de la AMO y negativa en las fases frías. Los resultados para la frecuencia y duración de huracanes es similar (ver figura A2 del apéndice A).

La AMO presentó una fase cálida importante de 1890 a 1930, donde tanto la frecuencia como la duración de CT se vio fuertemente afectada en el Atlántico, posteriormente se observa un cambio de fase en 1950 que dura hasta 1990, en donde la AMO anti-correlaciona con la frecuencia de CT y no muestra conexión con la duración de los mismos. Después de este período hay otro cambio de fase de 1990 que ha durado al menos hasta el 2015. Por tanto, tal y como sugiere Goldenberg et al. (2001) podríamos inferir que la frecuencia y duración de los CT seguirán aumentando - como se ha visto hasta ahora, a partir de 1995 - , al menos por otros 30 años si solo consideramos esta forzamiento climático para el Atlántico.

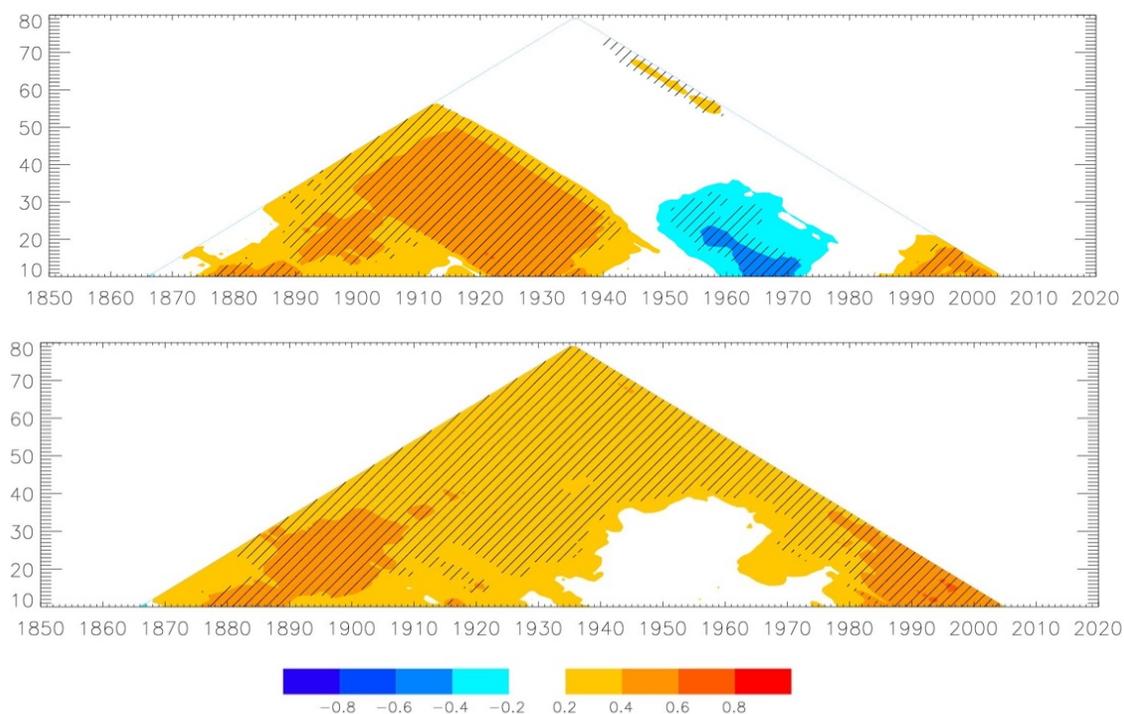


Figura 14. Correlación con ventanas móviles entre el índice AMO, y el índice de la (a) frecuencia de los CT (b) duración de los CT. En ambos casos durante los meses de mayor actividad ciclónica (ASO). Las zonas rayadas indican que la correlación es significativa al nivel del 95%.

Las fases positivas de la AMO reflejan un incremento en las temperaturas superficiales del océano Atlántico Norte, este incremento ha sido asociado a una mayor actividad ciclónica de agosto a octubre en estudios previos, ya que durante su trayectoria sobre aguas cálidas pueden ganar más energía.

En la figura 15 se expone la correlación en ventanas móviles entre ENSO y los índices de frecuencia de CT y huracanes. En el apéndice A (figura A3) se muestran las correlaciones entre ENSO y todos los índices de actividad ciclónica realizados.

Ambas fases de ENSO, El Niño y La Niña, tienen influencia en la frecuencia de tormentas tropicales durante la temporada de mayor actividad en el Atlántico. Durante El Niño, la temperatura superficial del mar en el océano Pacífico tropical incrementa y en el océano Atlántico Norte disminuye, dicha disminución hace que no haya suficiente energía que permita el desarrollo de CT. Mientras en la fase de La Niña, las temperaturas oceánicas en el Atlántico Norte aumentan, lo cual provee una fuente cálida de humedad en la cuenca, facilitando la formación de CT. Además, estas estructuras de temperatura hacen que la cizalladura vertical del viento en el Atlántico Norte disminuya durante La Niña, permitiendo

entonces la convección húmeda profunda que permite la intensificación de los sistemas tropicales. Por otro lado, la cizalladura vertical del viento durante El Niño en el Atlántico se aumenta, inhibiendo la formación de CT o destruyendo los sistemas menos intensos que lleguen a formarse.

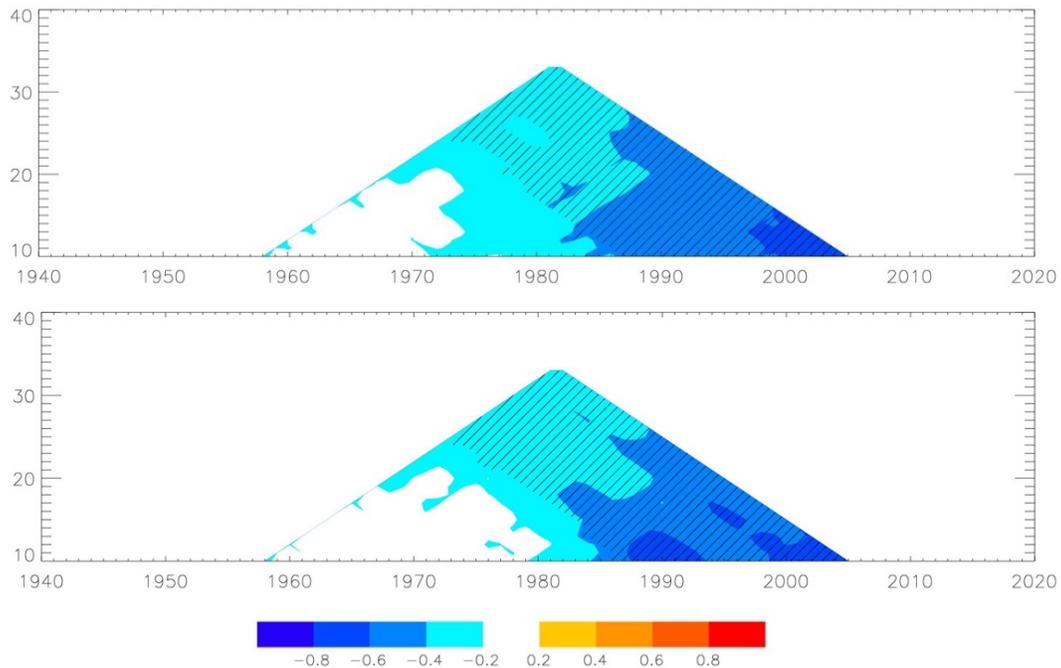


Figura 15. Correlación con ventanas móviles entre ENSO (índice (BEST) contra (a) la frecuencia de CT y (b) frecuencia de huracanes. En ambos casos durante los meses de mayor actividad ciclónica (ASO). Las zonas rayadas indican que la correlación es significativa al nivel del 95%.

Podemos notar que esta relación comienza aproximadamente a partir de los 1970s. Este resultado es consistente con el encontrado por Gallego et al (2015), que afirman que la relación entre ENSO y la precipitación del Sahel cambia de signo durante esta década. A partir de 1970, el Sahel presenta una sequía sin precedentes, cuya causa aún no se ha comprendido completamente. En cambio, no existe relación entre la ENSO y la duración de los sistemas tropicales de cualquier intensidad (ver figura A3).

Analizando particularmente la influencia de zona del mar Caribe en los sistemas tropicales, podemos dar una explicación a la correlación positiva entre la frecuencia y duración de huracanes y el índice de temperatura superficial del mar Caribe (figura 16), la escala temporal de dichas correlaciones es interanual en ventanas pequeñas.

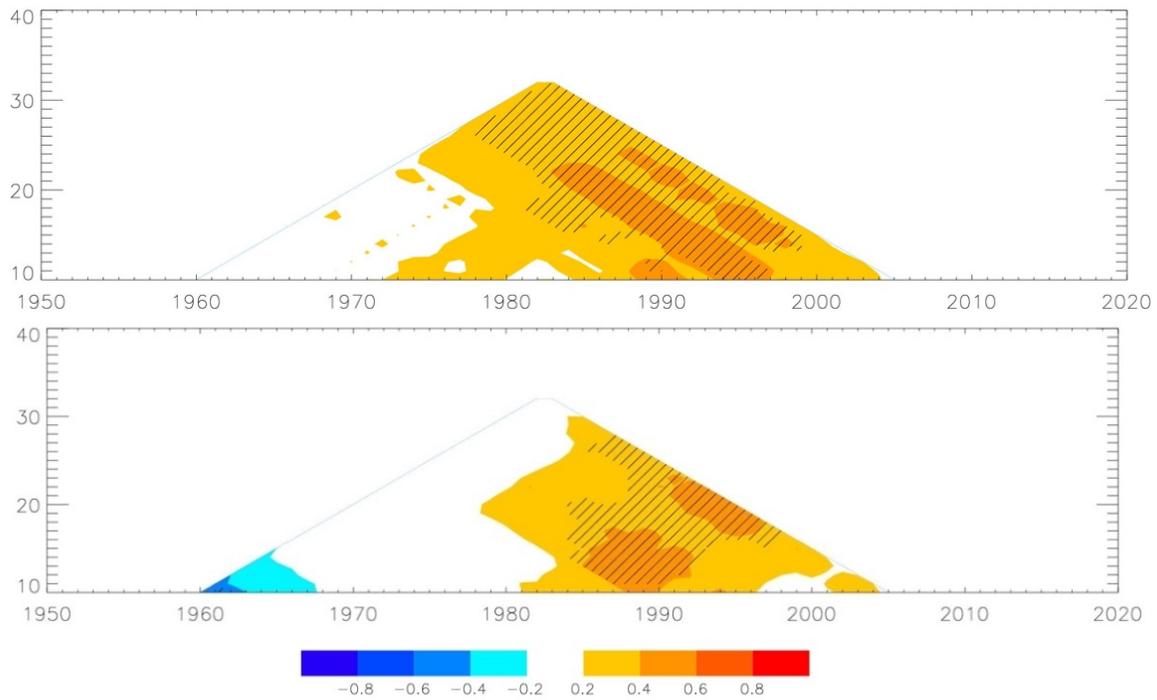


Figura 16. Correlación con ventanas móviles entre el índice CAR y la (a) la frecuencia y (b) duración de huracanes. En ambos casos durante los meses de mayor actividad ciclónica (ASO). Las zonas rayadas indican que la correlación es significativa al nivel del 95%.

Se puede apreciar que durante las últimas décadas, la temperatura del mar Caribe parece estar favoreciendo una mayor cantidad de sistemas intensos y también que estos tengan una mayor duración. Sin embargo, no ocurre lo mismo para sistemas tropicales de menor intensidad (ver figura A4). Aunque la correlación no rebasa 0.6, esta oscilación es importante pues como se describió anteriormente, en esta zona hay una importante cantidad de sistemas tropicales.

Continuando con un análisis de temperatura superficial del mar, se encontraron correlaciones positivas importantes y significativas en una escala interanual entre la duración de los CT (figura 17a) y la frecuencia de los huracanes (figura 17b) con dichas temperaturas, esta vez delimitadas en el Atlántico Tropical. Este resultado tiene sentido ya que en este área se ubica la MDR. Cabe destacar que la variación de la temperatura superficial del océano en esta zona es lenta y está dominada por efectos globales (Nobre y Shukla, 1994).

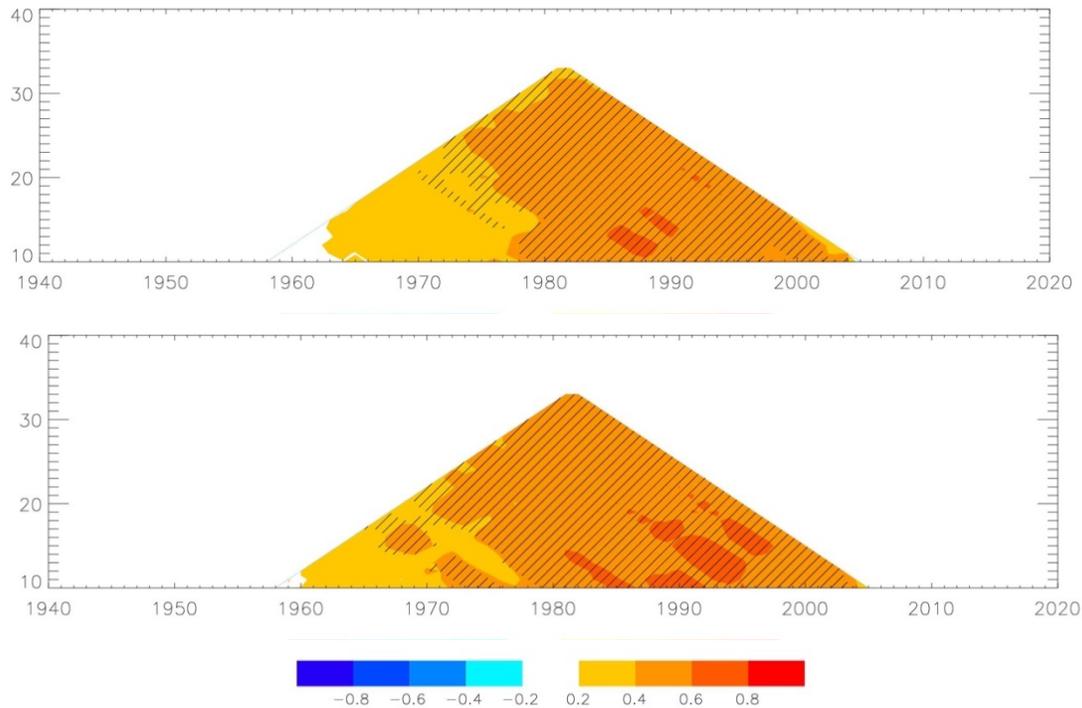


Figura 17. Correlación con ventanas móviles entre el índice NTA, y (a) la duración de los CT y (b) la frecuencia de los huracanes durante los meses de mayor actividad ciclónica (ASO). Las zonas rayadas indican que la correlación es significativa al nivel del 95%.

Las aguas cálidas en esta zona otorgarían la energía necesaria para que, a partir de las ondas del Este, se formen los ciclones tropicales que duran lo suficiente como para intensificarse hasta la categoría de huracán y finalmente estos sistemas tropicales en algún momento impactarán en las costas del Mar Caribe, las costas del Golfo de México y las costas del este de Estados Unidos. Además, estas temperaturas se están incrementando particularmente en los últimos 30 años, lo cual se sospecha que está fuertemente dominado por el calentamiento que infieren los gases de efecto invernadero de fuente antropogénica, que se incrementan cada vez más.

4.4 Regiones de importancia de los CT que afectan a México

En la presente sección se muestran las trayectorias que siguieron aquellos CT que afectaron directamente a México y sus costas en el Atlántico, desde 1851 hasta 2015, con un total de 598 sistemas tropicales. Como se aprecia en la figura 20, la gran cantidad de sistemas tropicales de la cuenca del AN que llegan a afectar costas mexicanas, y se puede notar más aún la gran densidad de sistemas que en algún punto de su trayectoria se localizan en el mar Caribe y en el golfo de México.

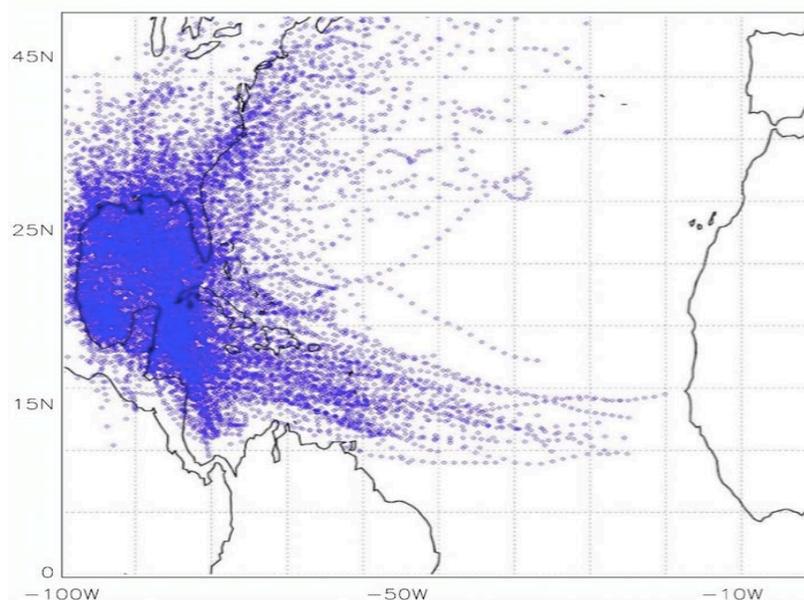


Figura 20. Se muestran las trayectorias de todos los CT en el Atlántico Norte registrados en la base de datos delimitada para aquellos que afectan al territorio mexicano.

En la figura 21 se muestra la localización de las zonas de ciclogénesis y ciclólisis, además de aquellos en donde se tiene registrado su presión mínima central. Por la densidad de puntos en la figura 14a, es notable que la mayoría de estos sistemas no provienen de la MDR, es decir, no son formados precisamente por ondas del Este. Más bien se nota que la gran mayoría se concentra en el golfo de México y el Caribe. Esto se había notado en anteriores estudios (Moshinsky, 2002), sin embargo, no se le había dado gran importancia.

Estos fenómenos en especial, no siempre tienen como perturbación inicial las ondas del Este por su considerable lejanía de la costa Oeste de África, es más probable que estos sistemas sean influenciados por alguna perturbación baroclínica, mediante mecanismos como límites frontales estacionales que generan una considerable cantidad de vorticidad en la troposfera alta o bien por 'gotas frías' en altura (que básicamente son vaguadas en altura que logran cerrar su circulación, generando un vórtice de baja presión central) (referencia). Y gracias a que las temperaturas cálidas sobre el mar Caribe y el golfo de México son persistentes, propician que se cumplan algunos otros factores necesarios para la ciclogénesis.

Por otra parte, algunos de los sistemas que afectan el territorio mexicano logran su presión mínima central, estando muy cercanos a las costas del golfo de México, como se aprecia en la figura 21b, con especial énfasis en aquellos que circundan el estado de

Veracruz, y en segundo lugar los cercanos a las costas de Tamaulipas. Esto es importante de notar, pues se puede inferir que debido a estas bajas presiones centrales registradas, los CT y huracanes que impacten en los estados antes mencionados pueden ser más intensos. Pudiendo generar más precipitación, mareas de tormenta importantes y algunas inundaciones durante la temporada de huracanes, la cual veremos más adelante es un poco diferente cuando consideramos los sistemas que afectan directamente a México, que cuando consideramos los sistemas de toda la cuenca del Atlántico Norte.

Es importante notar que ciertas regiones de presión mínima coinciden con aquellas zonas de mayor incidencia de ciclólisis en las costas mexicanas, apreciable en la figura 14c, pues nos dan un indicio de aquellos estados y/o poblados más propensos a ser afectados por algún sistema tropical de manera importante, ya sea social o económicamente. Existen zonas sobre el océano donde algunos sistemas se disipan, debido a que hay una pequeña participación de algunos CT que se formaron en la MDR.

4.5 Frecuencia y duración de los sistemas que afectan a México

En la figura 22, se presentan los gráficos en los cuales podemos ver la tendencia anual y distribución mensual tanto del número de sistemas tropicales, como de su duración promedio de aquellos CT y huracanes que afectan directamente las costas mexicanas del Atlántico. En el caso de la frecuencia de sistemas tropicales, se puede notar ciertos períodos de actividad ciclónica.

- 1880-1920: muy baja frecuencia de ciclones tropicales, mientras que para los huracanes se mantiene constante la actividad.
- 1920-1940: un pequeño intervalo de mayor actividad tanto para los ciclones como para los huracanes.
- 1940-1960: un descenso en la actividad ciclónica, con un especial decremento en la última década de éste período. La actividad de huracanes se mantuvo contante.
- 1960-1980: un intervalo de importante actividad ciclónica, con la actividad de huracanes permaneciendo casi constante.
- 1980-1995: un intervalo con actividad ciclónica reducida, sin embargo la actividad de huracanes se ve lentamente en aumento.
- 1995-2015: se tiene una alta actividad ciclónica, que incluso registra el pico más alto en toda la serie de tiempo, en cuanto a la actividad de huracanes, se sigue notando un lento pero persistente aumento.

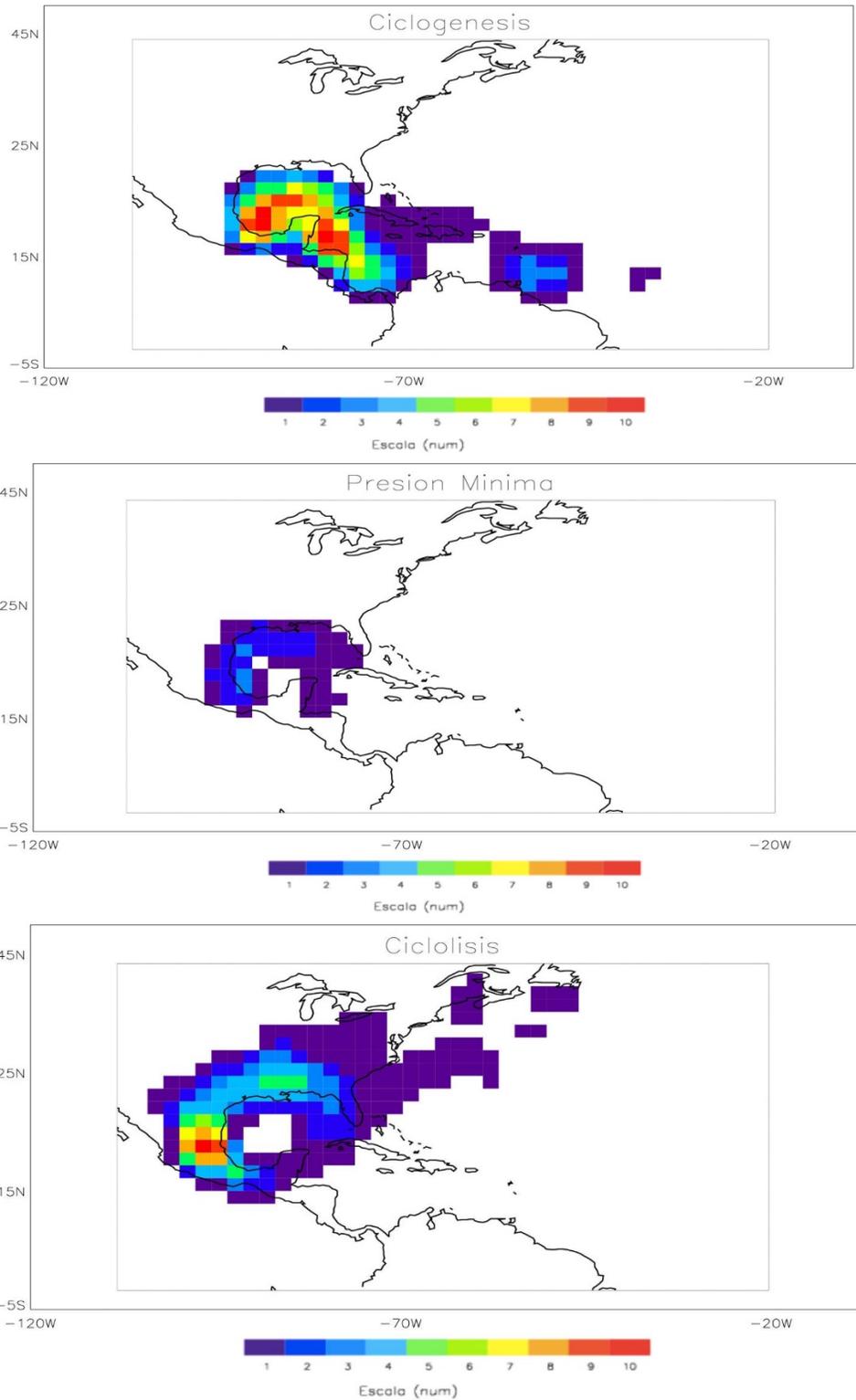


Figura 21. Mapa donde se muestran las regiones de (a) ciclogénesis, (b) presión mínima y (c) ciclólisis de los CT registrados en la base de datos HURDAT2 que afectaron a la Republica Mexicana. Nota.-Los valores de la presión mínima central varían de 940 mb a 970 mb. No todos los sistemas tropicales de la base de datos cuentan con esta variable.

Cabe destacar, que para los sistemas de esta base de datos que afectan directamente a México, los tres meses con mayor actividad ciclónica cambian; mientras se analizaban los meses Agosto, Septiembre y Octubre para los sistemas de toda la cuenca Noratlántica, ahora los tres meses con mayor actividad ciclónica son julio, agosto y septiembre.

Además, podemos notar que la distribución mensual de la frecuencia de CT y huracanes, ahora es bimodal, presentando un pequeño aumento en los CT durante los meses de abril, mayo y junio; mientras que se tiene la temporada importante de CT y huracanes durante los meses antes mencionados. Este aumento pequeño podría darnos indicios del porqué de las lluvias y días nublados que se llegan a presentar durante estos meses, durante los cuales no se esperaría dicho tiempo meteorológico, puesto que astronómicamente es la temporada de primavera.

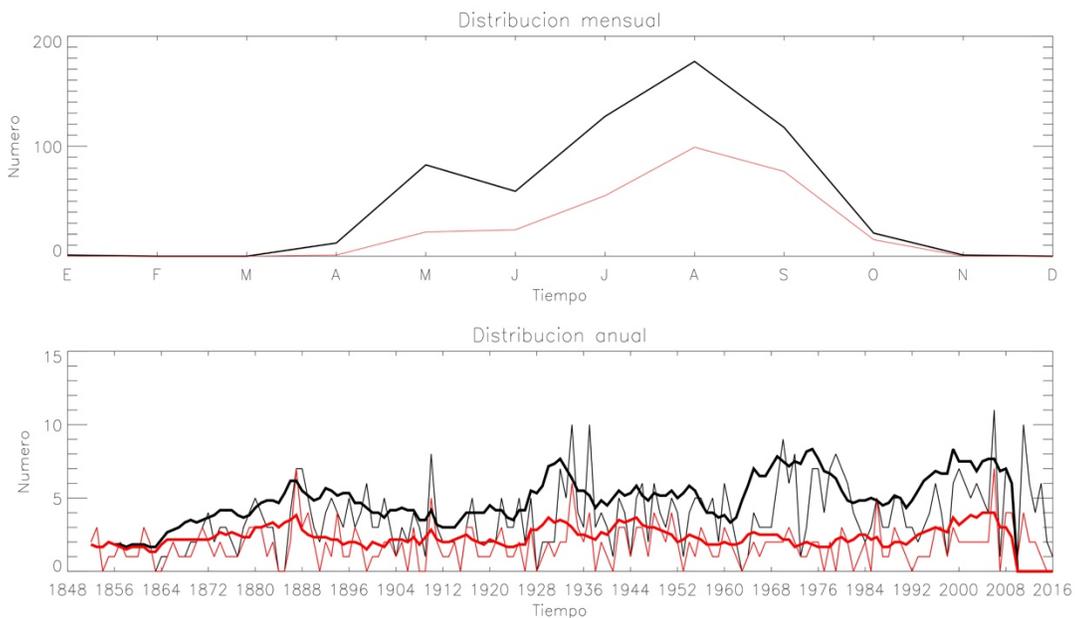


Figura 22. Distribución (a) mensual y (b) anual de la frecuencia de los CT (línea negra) y los huracanes (línea roja) dentro de la cuenca del Atlántico Norte, que afectaron directamente México. Las líneas gruesas representan un suavizado con una ventana 7 años.

Por otra parte, la duración de los sistemas tropicales (figura 23a) muestra mayor variación a lo largo de la serie de tiempo con importantes períodos de escasos días de tormenta. Sin embargo, tenemos tres importantes intervalos en los cuales las tormentas muestran una mayor duración. Estos periodos comprenden los siguientes años: 1920-1935, 1955-1975 y 1995-2005. En este último también se presenta el máximo local de duración de huracanes.

En el caso de los días de tormenta por mes (figura 23b), también podemos notar un pequeño aumento en los meses de mayo, junio y julio, mientras que para la temporada oficial de huracanes de ASO se tiene la mayor duración, sin embargo, no rebasa de los 6 días de tormentas y 3 días de huracanes. Estos cambios en la duración a escala interdecadal tiene que estar ligados con la variabilidad de la temperatura superficial de los océanos, en particular del mar Caribe y del Golfo de México, pues ahí tenemos la principal zona de ciclogénesis para los sistemas que afectan México.

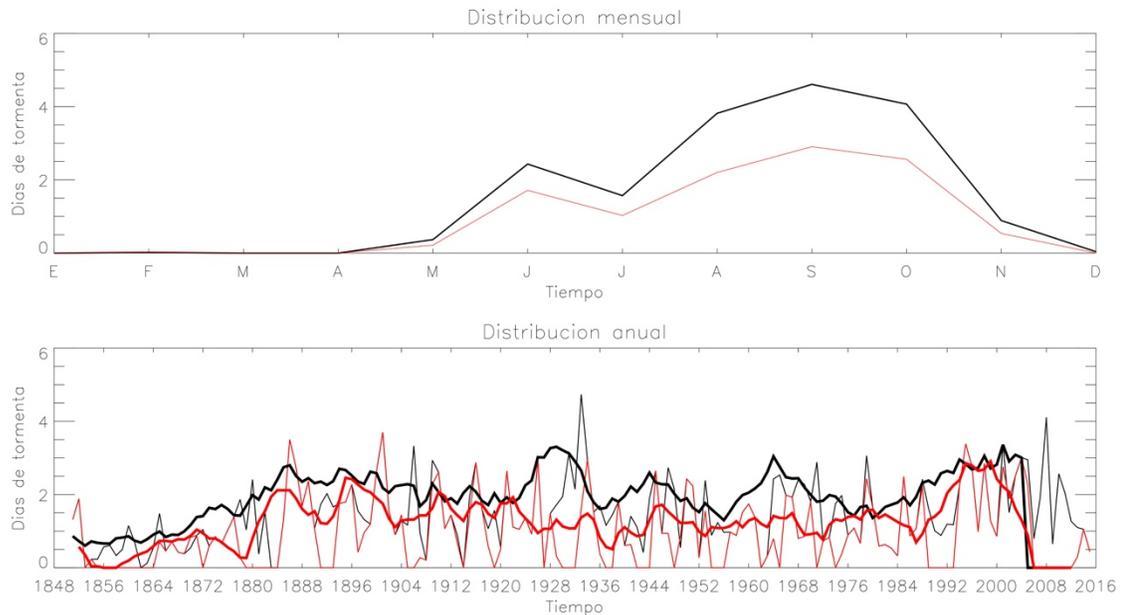


Figura 23. Distribución (a) mensual y (b) anual de la duración de los CT (línea negra) y los huracanes (línea roja) dentro de la cuenca del Atlántico Norte, que afectaron directamente México. Las líneas gruesas representan un suavizado con una ventana 7 años.

4.6 Correlación entre modos y los sistemas que afectan a México

Al igual que en la sección 4.3, se presenta la correlación de Pearson con ventanas móviles entre los diferentes modos climáticos y los sistemas de bajas presiones, pero en este caso solo aquellos que pueden afectar al territorio mexicano para los meses de mayor actividad ciclónica (JAS, julio, agosto y septiembre). Los diagramas muestran en el eje horizontal los años y en el eje vertical el parámetro de ventana móvil, el cual es básicamente el número de datos que se consideraron para hacer las correlaciones.

Dado el recorrido de los sistemas tropicales que se han considerado en estas correlaciones, es factible pensar que los efectos de la AMM se verán reducidos, y podemos ver que es así en la figura 24. Se ve afectado la duración de los CT y la frecuencia de huracanes. Esta misma situación se presenta en el caso de todos los sistemas del Atlántico, pero en este caso las correlaciones son inferiores.

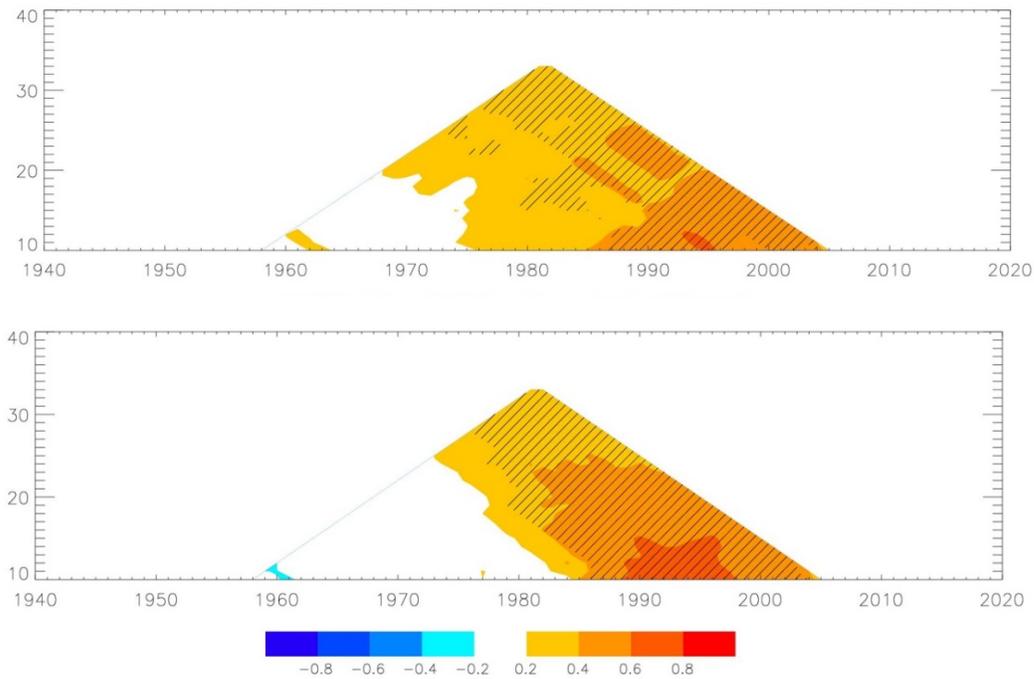


Figura 24. Correlación con ventanas móviles entre el índice AMM, y (a) la duración de los CT y (b) la frecuencia de los huracanes durante los meses de mayor actividad ciclónica de los sistemas tropicales que afectan directamente a México (JAS). Las zonas rayadas indican que la correlación es significativa al nivel del 95%

Dado a la limitación geográfica de los sistemas tropicales que se han considerado en estas correlaciones, es factible pensar que los efectos de la AMM se verán reducidos, y podemos ver que es así en la figura 24, donde solo se ve afectado la duración de los CT y la frecuencia de huracanes. Resulta importante notar que tanto para el AN en general como para aquella región donde los CT afectan directamente a México, la AMM tiene un gran impacto en la frecuencia de los huracanes, sobre todo en las últimas décadas donde la correlación alcanza valores entre 0.8 y 1.

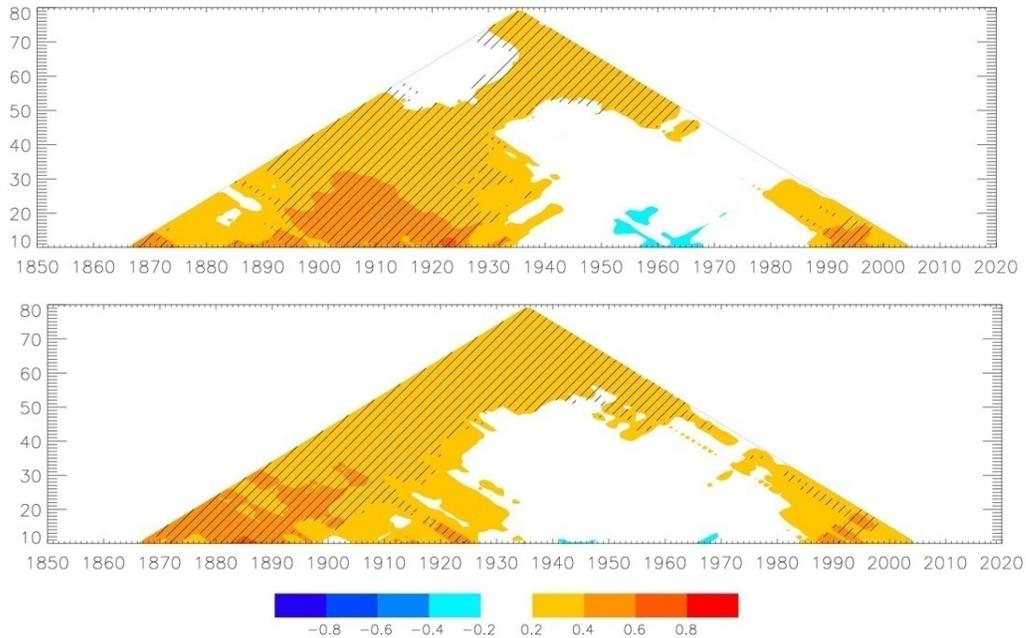


Figura 25. Correlación con ventanas móviles entre el índice AMO, y (a) la duración de los CT y (b) la frecuencia de los huracanes durante los meses de mayor actividad ciclónica de los sistemas tropicales que afectan directamente a México (JAS). Las zonas rayadas indican que la correlación es significativa al nivel del 95%.

El efecto que tiene la AMO en los sistemas que afectan el territorio mexicano, es más ligera en comparación con la AMM, sin embargo es significativa en la escala interdecadal con correlación positivas pequeñas, estos efectos se ven reflejados sobre todo en la duración de los ciclones (figura 25a) y la frecuencia de los huracanes (figura 25b).

Es posible observar también el cambio de fase de la AMO, comprendido de 1930 hasta 1990 aproximadamente, el cual resulta en una anti-correlación cuando estamos tratando con los ciclones de toda la cuenca del AN, mientras que para aquellos que afectan directamente México, no es así. Lo cual es interesante, pues mientras se presente la fase cálida de esta oscilación, la actividad ciclónica que afecta México se verá aumentada en frecuencia y duración, pero si se presenta una fase negativa ésta actividad no se verá disminuida.

Como se explicó con anterioridad, ambas fases de ENSO, El Niño y La Niña, tienen influencia en la frecuencia de tormentas tropicales durante la temporada de huracanes. Para el caso de los sistemas tropicales que directamente afectan la República Mexicana, se ven afectados la frecuencia de CT (figura 26a) y la frecuencia de huracanes (figura 26b), principalmente por la configuración de las temperaturas superficiales del océano, las cuales ocasionan que la cizalladura vertical del viento en la zona de ciclogénesis disminuya durante la fase negativa (La Niña), permitiendo entonces la convección húmeda profunda que

permite la formación de los sistemas tropicales, se puede notar que estas anti-correlaciones son muy fuertes durante fenómenos de La Niña importantes que se han presentado en los últimos 20 años.

Por estos pequeños eventos, durante los cuales se observan aumentos en la actividad ciclónica que tienen una duración entre 5 y 7 años, la influencia que tiene ENSO sobre la actividad ciclónica de aquellos sistemas que afectan el territorio mexicano es de índole interanual. También cabe destacar que los efectos de ENSO sobre la actividad ciclónica en el territorio mexicano son más intensos que aquellos sistemas que se presentan en la cuenca del AN.

Debido a la circulación que se presenta sobre el mar Caribe, durante las fases de La Niña la cizalladura vertical del viento se ve reducida. Además de esto, otros factores como los son las temperaturas superficiales oceánicas cálidas, suficiente fuerza de Coriolis que permita la rotación y organización de la tormenta, etc., son factores clave que actúan al unísono con la cizalladura vertical del viento para dar un ambiente propicio para los ciclones.

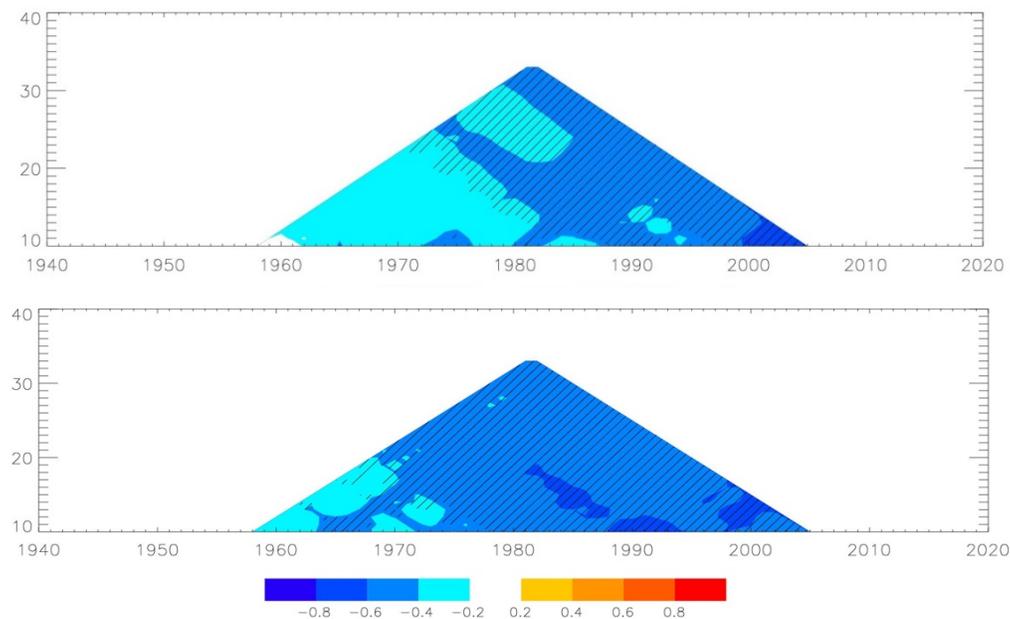


Figura 26. Correlación con ventanas móviles entre ENSO (índice (BEST) contra (a) la frecuencia de CT y (b) frecuencia de huracanes. En ambos casos durante los meses de mayor actividad ciclónica (JAS). Las zonas rayadas indican que la correlación es significativa al nivel del 95%.

Se nota una muy importante influencia de la temperatura superficial del océano descrita por el índice CAR en la actividad ciclónica que afecta el territorio mexicano. Las anomalías cálidas son importantes para el desarrollo e intensificación de los ciclones tropicales, para este caso donde analizamos los sistemas que afectan el territorio mexicano, los cuales vimos previamente tienen su ciclogénesis dentro del Caribe y el Golfo de México, será de vital importancia la estructura de la temperatura superficial de estos océanos.

Es por eso que vemos importantes correlaciones positivas de la duración de CT (figura 27a) y de duración de huracanes (figura 27b) con las anomalías de temperatura superficial del océano de la zona del Caribe, pues como hemos visto previamente, si se tienen anomalías cálidas el ambiente que se genera es propicio para la formación e intensificación de los sistemas tropicales. Se puede apreciar que la correlación actúa a nivel interdecadal.

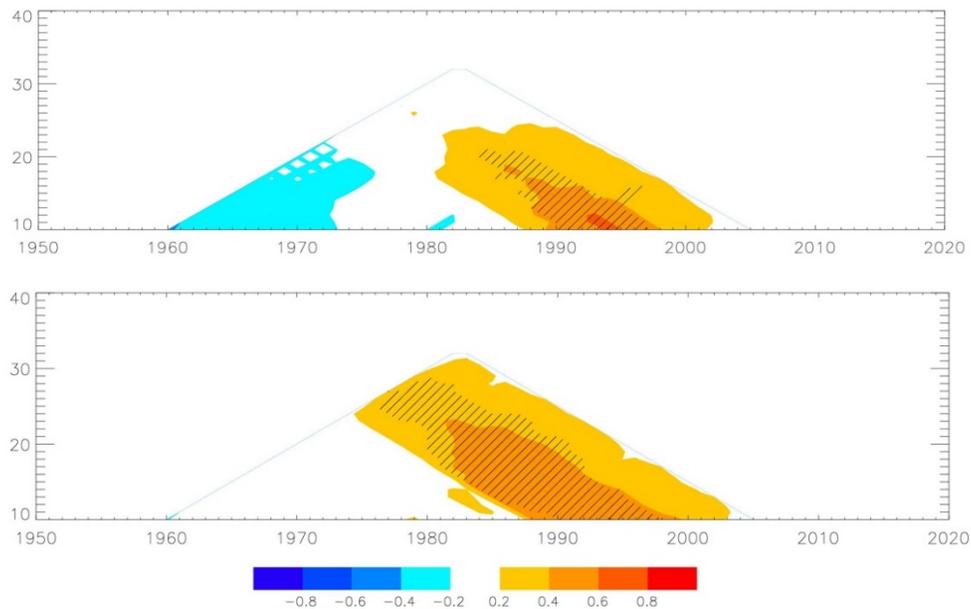


Figura 27. Correlación con ventanas móviles entre el índice CAR y la (a) la duración de los CT y (b) duración de huracanes. En ambos casos durante los meses de mayor actividad ciclónica (JAS). Las zonas rayadas indican que la correlación es significativa al nivel del 95%.

Si bien para los sistemas tropicales en que afectan a México es muy importante la temperatura en el mar Caribe y el golfo de México debido a la importante zona de ciclogénesis, la temperatura en la MDR debería estar menos relacionada con la formación y desarrollo de estos sistemas (figura 28).

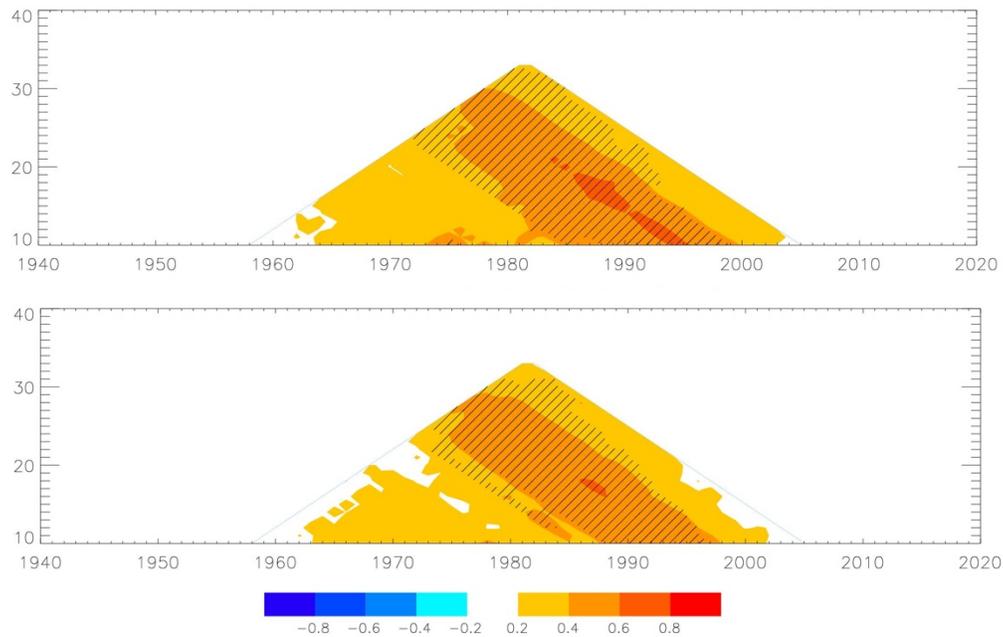


Figura 28. Correlación con ventanas móviles entre el índice NTA, y (a) la duración de los huracanes y (b) la frecuencia de los huracanes durante los meses de mayor actividad ciclónica (JAS). Las zonas rayadas indican que la correlación es significativa al nivel del 95%.

Aunque la temporada de actividad ciclónica importante para estos ciclones difiera a la temporada de actividad de toda la cuenca del Atlántico, la correlación llega a ser importante y significativa, además también resulta ser de carácter interdecadal como hemos visto que actúan todas las oscilaciones climáticas de la temperatura superficial del océano Atlántico: AMM, AMO, CAR y NTA. Se puede pensar que todas ellas pueden tener un mecanismo físico similar; en primera lugar aportando el calor necesario para mantener una circulación e intensidad de los ciclones, seguido por la convección profunda húmeda y bajas presiones sobre el nivel del mar, que requerirían una cizalladura vertical del viento débil para permitir su intensificación.

Es evidente que en el caso de toda la cuenca del AN, las correlaciones con este índice son mayores, pues hay un gran número de sistemas tropicales que tiene su formación en la MDR, pero para el caso de la actividad ciclónica que afecta México, es diferente, pues el punto más importante de ciclogénesis se encuentra dentro del Mar Caribe.

5. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha analizado estadísticamente la base de datos de ciclones tropicales del Atlántico Norte HURDAT2 (1851-2015). De la misma forma, se ha estudiado un subconjunto de esta base de datos que se asocia a los ciclones tropicales que afectan a México.

En primer lugar se han determinado las regiones de ciclogénesis, presión mínima y ciclólisis de la trayectoria de los CT. Se puede afirmar que los CT de toda la cuenca del Atlántico Norte se desarrollan principalmente sobre la MDR, mientras que aquellos que afectan a México se originan preferentemente sobre el golfo de México y el mar Caribe, lo cual representa un gran hallazgo debido a que esto último nos indica que dichos CT no necesariamente provienen de perturbaciones originadas por ondas del Este, sino que también podrían presentar un origen baroclínico. En cuanto a las zonas de presión mínima, para el AN la principal es cercana a las costas este de México y EEUU aunque hay cierta parte que se encuentra dentro de la MDR. En cambio, para la actividad ciclónica que afecta al territorio mexicano, la principal zona de intensificación de CT es sobre las costas mexicanas del golfo de México. Finalmente, para las zonas de ciclólisis la diferencia más importante se encuentra en la cantidad de CT que afectan los estados de Veracruz y Tamaulipas. Dentro de los sistemas del AN en general se nota que en esa región esta afectada ligeramente, pues el mayor número de sistemas se recurvan hacia el norte dentro de la cuenca del AN. Pero para la actividad ciclónica que afecta directamente el territorio mexicano, sus afectaciones se encuentran confinadas a las costas del golfo de México, con especial énfasis en los estados antes mencionados.

De igual modo en este proyecto, se han analizado las distribuciones mensuales y anuales de los CT ocurridos entre 1851-2015 en el AN y de aquellos que afectan directamente a la República Mexicana. Para ambos casos, el de los CT de la cuenca del AN en general y de aquellos que afectan directamente a México, se puede notar un incremento de la frecuencia de CT y huracanes en las últimas décadas, así como mayor número de días de tormenta. La diferencia más importante de dichas distribuciones se encuentra al analizar la distribución mensual. En el caso del AN en general, se muestra que la actividad ciclónica se concentra durante los meses agosto, septiembre y octubre para los CT y los huracanes. Sin embargo, cuando tomamos los sistemas que afectan a México, se tienen dos modos, para el caso de la frecuencia, uno de actividad media durante abril, mayo y junio, y otro de actividad máxima durante julio, agosto y septiembre. En el caso de la duración, el primero es de mayo, junio y julio, y el principal acontece durante agosto, septiembre y octubre. Este

modo de actividad media en la frecuencia, podría explicar las precipitaciones que se tienen en la República durante esos meses de primavera, las cuales no se esperan. Pero para poder ver dicha relación se requiere de más estudios futuros.

En tercer lugar se ha analizado la influencia de diversas oscilaciones climáticas en la actividad ciclónica del Atlántico Norte. Se ha encontrado por medio de correlación de Pearson con ventanas móviles, que las oscilaciones climáticas ligadas directamente a la temperatura superficial del océano, como lo son AMM, AMO, CAR y NTA afectan la formación y desarrollo de de CT para la cuenca entera del AN.

Los resultados obtenidos muestran que la AMM tiene un impacto significativo en el total de sistemas tropicales que se forman en la temporada de huracanes dentro de la cuenca del Atlántico Norte en una escala interdecadal. Esta gran correlación puede estar explicada por el hecho de que se necesitan temperaturas superficiales del océano cálidas, típicamente mayores a 26.4°C, para la formación de CT. Además de esto, el índice de la AMM también considera las anomalías de los vientos en la cuenca del Atlántico, cuando se tienen valores altos son un indicativo de la reducción de la cantidad de cizalladura vertical del viento, asumiendo una flujo en la troposfera alta general constante; permitiendo entonces la formación de sistemas tropicales. Sin embargo, no es el único modo climático que tiene influencia sobre la cizalladura vertical del viento en la cuenca del AN.

Por otra parte, ENSO tiene una importante correlación negativa con la actividad ciclónica principalmente debido a la circulación de los vientos en superficie y en altura que se genera gracias a esta oscilación climática, resultando al final en un aumento de la cizalladura vertical del viento durante períodos de El Niño.

Los resultados obtenidos muestran que para la cuenca del Atlántico, y en especial, para los ciclones que tienen el inicio de su formación en el mar Caribe y golfo de México, durante la fase negativa (positiva) de ENSO tendremos un aumento (decremento) en la actividad ciclónica, en especial son sistemas de intensidad de huracán. Lo cuál corresponde con algunos estudios realizados previamente.

En el caso de la AMO, se aprecia un impacto importante debido a la fuerte modulación de las temperaturas superficiales del océano. Sin embargo, no llega a ser tan intenso como lo es con la AMM y ENSO. No obstante, si esta oscilación actúa al mismo tiempo en la cuenca del AN con alguna otra, las afectaciones en la actividad ciclónica pueden ser de una magnitud importante.

El caso de la modulación de la actividad ciclónica que tienen CAR y TNA son muy similares: mientras se tengan anomalías cálidas se tendrá mayor actividad, con la diferencia de las regiones que afectan. TNA influye mucho en los sistemas que se generan en la MDR, y algunos de ellos logran impactar el territorio mexicano; mientras que CAR es más importante para estudiar la variabilidad de los CT que afectan México, pues en esta zona se generan los principales sistemas que afectaran el territorio mexicano, lo cual no ha sido descrito con anterioridad y requerirá de estudios futuros para entender con más detalle de que manera es que se dan estas relaciones.

Aunque existen otras influencias de ciertas teleconexiones que posiblemente tengan un gran impacto en la actividad ciclónica del Atlántico, los resultados aquí obtenidos pueden ser de gran ayuda para la caracterización de las condiciones climáticas predominantes y en última instancia para la predicción climática en México, Centroamérica y el Caribe. Todo esto es muy útil, pues en base de conocer de mejor manera los fenómenos que nos afectan, se pueden mejorar los programas de prevención de desastres y las políticas públicas que se toman en cada país con respecto al cambio climático que puede estar influenciando a los sistemas tropicales indirectamente.

En futuros trabajos se analizará la diferencia entre las regiones de ciclogénesis, presión mínima y ciclólisis entre los CT y huracanes. Así mismo se profundizará en el estudio de las tendencias anuales y mensuales tanto de los CT como de los huracanes. Además se explorará un mayor abanico de variables y oscilaciones climáticas que podrían afectar al desarrollo y duración de sistemas tropicales, como son la MJO, QBO, las ondas del Este o la precipitación del Sahel. Y se tratará de encontrar un predictor estacional para México usando las múltiples teleconexiones al unísono, pues conocer esto, puede ayudar a anticipar las zonas que serán afectadas en temporada de huracanes para poder prevenir grandes pérdidas de cualquier índole. Para lograr este objetivo será de vital importancia un mejor entendimiento de los mecanismos físicos concretos que influyen en la actividad ciclónica en la cuenca del Atlántico.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, E. J. (2007) Escenarios climáticos para temporadas con alto y bajo número de huracanes en el Atlántico. *Revista de climatología*, 7:1-13, ISSN 1578-8768.
- Amaya, D.J., DeFlorio, M.J., Miller, A.J., Xie, S.P. (2016). WES feedback and the Atlantic Meridional Mode: observations and CMIP5 comparisons. *Clim. Dyn.*, DOI 10.1007/s00382-016-3411-1.
- Bell, G. D., and M. Chelliah, (2006) Leading tropical modes associated with interannual and multi-decadal fluctuations in North Atlantic hurricane activity. *J. Climate*, 19, 590-612.
- Chiang, J. C. H., and D. J. Vimont (2004), Analogous meridional modes of atmosphere-ocean variability in the tropical Pacific and tropical Atlantic. *J. Climate*, 17(21), 4143-4158.
- Choi, K.-S., Moon, J.-Y., Kim, D.-W., and Chu, P.-S. (2009). Seasonal Prediction of Tropical Cyclone Genesis Frequency Over the Western North Pacific Using Teleconnection Patterns. *Theoretical and Applied Climatology*, 100, 191-206. doi: 10.1007/s00704-0009-0182-1.
- Collins, J. M. & Roache, D. R. (2017). The 2016 North Atlantic Hurricane Season: A Season of Extremes. *Geophys. Res. Lett.*, 44, doi: 10.1002/2017GL073390.
- Díaz Castro, S.C. (2010) Variabilidad de los ciclones tropicales que afectan a México. *Interciencia*, 35: 306-310, doi: 0378-1844/10/04/306-05.
- Estrada, F., Botzen, W.J.W., Tol, R.S.J. (2015). Economic losses from US hurricanes consistent with an influence from climate change. *Nature Geoscience*, 8 (11).
- Gallego, D., Ordoñez, P., Ribera, P., Peña-Ortiz, C., García-Herrera, R. (2015). An instrumental index of the West African Monsoon back to the nineteenth century. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 141: 3166–3176.
- Goldenberg, S. B., C. W. Landsea, A. M. Mesta-Nuñez, and W. M. Gray (2001), The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications. *Science*, 293, 474–479.
- Gray, W. M. (1984), Atlantic Seasonal Hurricane Frequency. Part I: El Niño and 30 mb Quasi-Biennial Oscillation Influences. *Amer. Meteor. Soc.*, 112, 1649-1668.
- Gutzler, D.S., Wood, K.M., Ritchie, E.A., Douglas, A.V. and Lewis, M.D. (2013). Interannual variability of tropical cyclone activity along the Pacific coast of North America. *Atmósfera*, 26 (2): 149 - 162.

- Hall, T. & Tippet, M. K. (2017) Pacific Hurricane Landfalls of Mexico and SST. *Amer. Meteor. Soc.* doi: 10.1175/JAMC-D-16-0194.1.
- Holland, G.J., and P.J. Webster (2007), Heightened tropical cyclone activity in the North Atlantic: Natural variability or climate trend? *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, 365, 2695–2716. doi:10.1098/rsta.2007.2083.
- Kaplan SST V2 data provided by the NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, from their Web site at <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>
- Kaplan, A., M. Cane, Y. Kushnir, A. Clement, M. Blumenthal, and B. Rajagopalan. (1998) Analyses of global sea surface temperature 1856-1991, *Journal of Geophysical Research*, 103, 18, 567-589.
- Klotzbach, P. J. and Gray, W. M. (2008), Multidecadal Variability in North Atlantic Tropical Cyclone Activity. *Amer. Meteor. Soc. Notes and correspondence*, 21, 3929-3935, doi:10.1175/2008JCLI2162.1.
- Kossin, J. P. and D. J. Vimont (2007), A more general framework for understanding Atlantic hurricane variability and trends, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 88 (11):1767-1781.
- Kossin, J. P., Camargo, S. J. and Sitkovski M. (2010), Climate Modulation of North Atlantic Hurricane Tracks. *Amer. Meteor. Soc.*, 23, 3057-3076, doi: 10.1175/2010JCLI3497.1.
- Kushnir, Y. (1994) Interdecadal Variations in North Atlantic Sea Surface Temperature and Associated Atmospheric Conditions, *Amer. Meteor. Assoc.*, 7, 141-157.
- Landsea, C., Franklin J. And Beven, J. (2015), The revised Atlantic hurricane database (HURDAT2). NOAA.
- Landsea, C., Pielke Jr., R. A., Mestas-Nuñez, A. M. And Knaff, J. A. (1999), *Weather and Climate Extremes*. Springer Netherlands, 89-129 pp. ISBN: 9780792357117.
- Landsea, C.W. (2007). Counting Atlantic Tropical Cyclones Back to 1900. *Eos*, 88 (18).
- Landsea, Chris (2016). FAQ Hurricanes. [Homepage]. World Wide Web. [Consultado el 6 de febrero de 2017]. <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/tcfaqHED.html>

- Larson, J., Zhou, Y., Higgins, R.W. (2005). Characteristics of Landfalling Tropical Cyclones in the United States and Mexico: Climatology and Interannual Variability. *J.Clim*, 18: 1247 - 1262.
- Mann, M., and K. Emanuel (2006), Atlantic hurricane trends linked to climate change, *Eos Trans. AGU*, 87(24), 233, 238, 241.
- Moshinsky R. M., Espinosa Jiménez M. and Vázquez Conde M.T. (2002), Atlas climatológico de ciclones tropicales en México. CENAPRED. ISBN: 970-628-633-0.
- Nobre, P. and Shukla, J. (1994) Variations of Sea Surface Temperature, Wind Stress, and Rainfall over the Tropical Atlantic and South America. *Journal of Climate*, 9, 2464-2479.
- Pielke, Jr., R.A., J. Gratz, C.W. Landsea, D. Collins, M. Saunders, and R. Musulin. (2008). Normalized Hurricane Damages in the United States: 1900-2005. *Natural Hazards Review*, 29-42.
- Solow, A. R., and L. J. Moore (2002), Testing for trend in North Atlantic hurricane activity, 1900–98, *J. Clim.*, 15(21), 3111–3114.
- Vimont, D. J., and J. P. Kossin (2007), The Atlantic Meridional Mode and hurricane activity. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L07709, doi:10.1029/2007GL029683.
- Webster, P.J., G. J. Holland, G.J. Curry, J.A., Chang, H-R. (2005). Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment. *Science*, 309: 1844- 1846.
- Xie, L., Yan, T. Pietrafesa, L., Morrison, J.M., Karl, T. (2005). Climatology and Interannual Variability of North Atlantic Hurricane Tracks. *J.Clim.*, 18: 5370 - 5381.
- Xu, G., Osborn, T. J. & Matthews, A. J. (2017) Moisture Transport By Atlantic Tropical Cyclones Into The North American Continent. *Clim. Dyn.*, 48, doi: 10.1007/s00382-016-3256-6.
- Zhang, L. And C. Wang (2013), Multidecadal North Atlantic sea Surface temperature and Atlantic meridional overturning circulation variability in CMIP5 historical simulations, *J. Geophys. Res. Oceans*, 118,5772-5791, doi:10.1002/jgrc.20390.

APÉNDICE A

Seguidamente se muestran los valores de los coeficientes de correlación de Pearson obtenidos con las distintas oscilaciones climáticas analizadas en este trabajo y la frecuencia y duración de los CT y huracanes. Los coeficientes de correlación que se encuentran dentro del entramado son válidos en un 95% utilizando la prueba de t de Student.

Los diagramas muestran en el eje horizontal los años y en el eje vertical el parámetro de ventana móvil, el cual es básicamente el número de datos que se consideraron para hacer las correlaciones. Los contornos de colores indican el valor del coeficiente de correlación, los colores cálidos son correlaciones positivas y los colores fríos indican correlaciones negativas, entre más fuertes sean los colores, más intensa es la correlación, los valores van de 0.2 en 0.2, desde el -1 hasta el +1

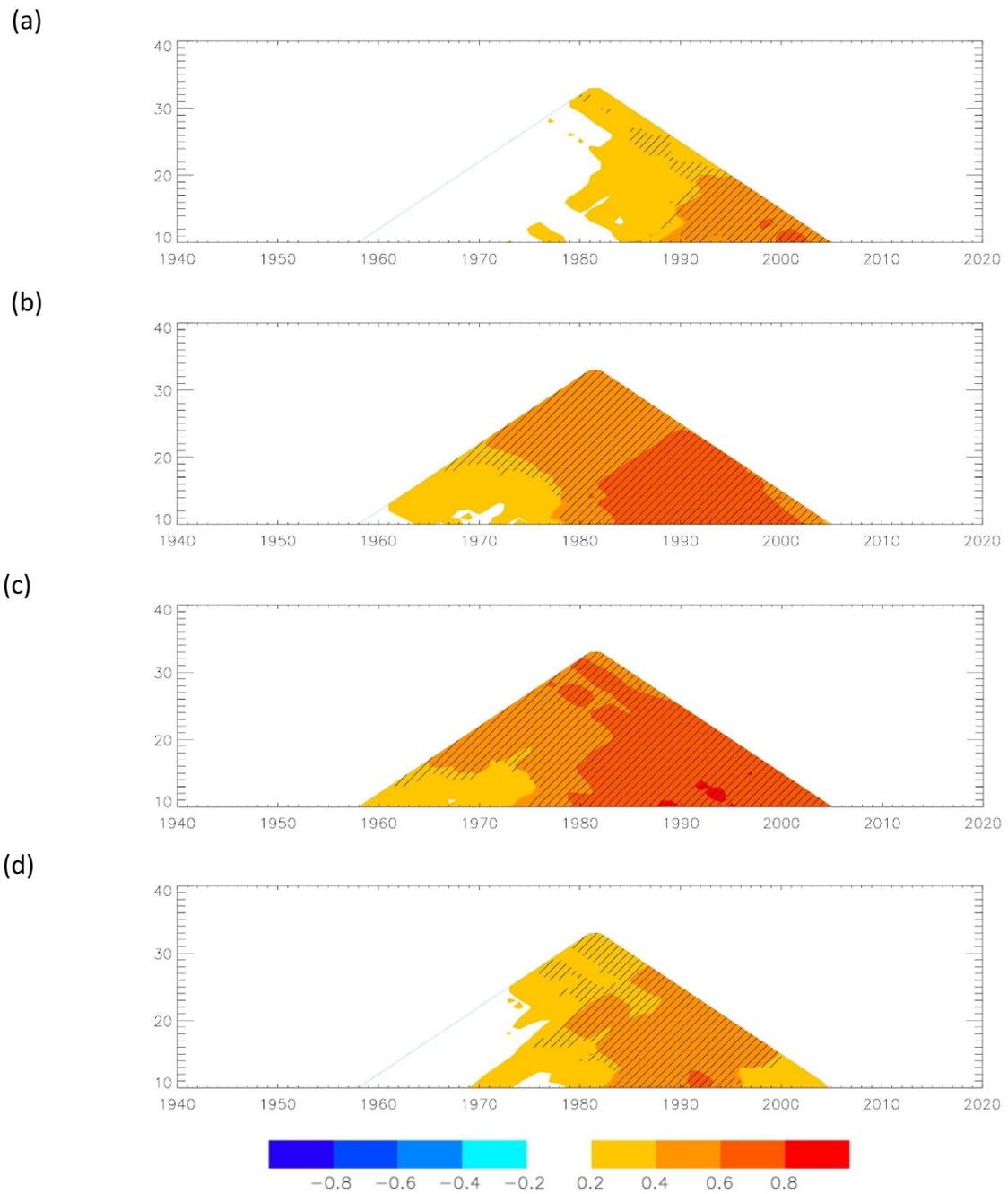


Figura A1. Correlación con ventanas móviles entre el índice AMM, y el índice (a) frecuencia de CT, (b) duración de CT, (c) frecuencia de huracanes y (d) duración de huracanes. En todos los casos durante los meses de mayor actividad ciclónica (agosto-septiembre-octubre).

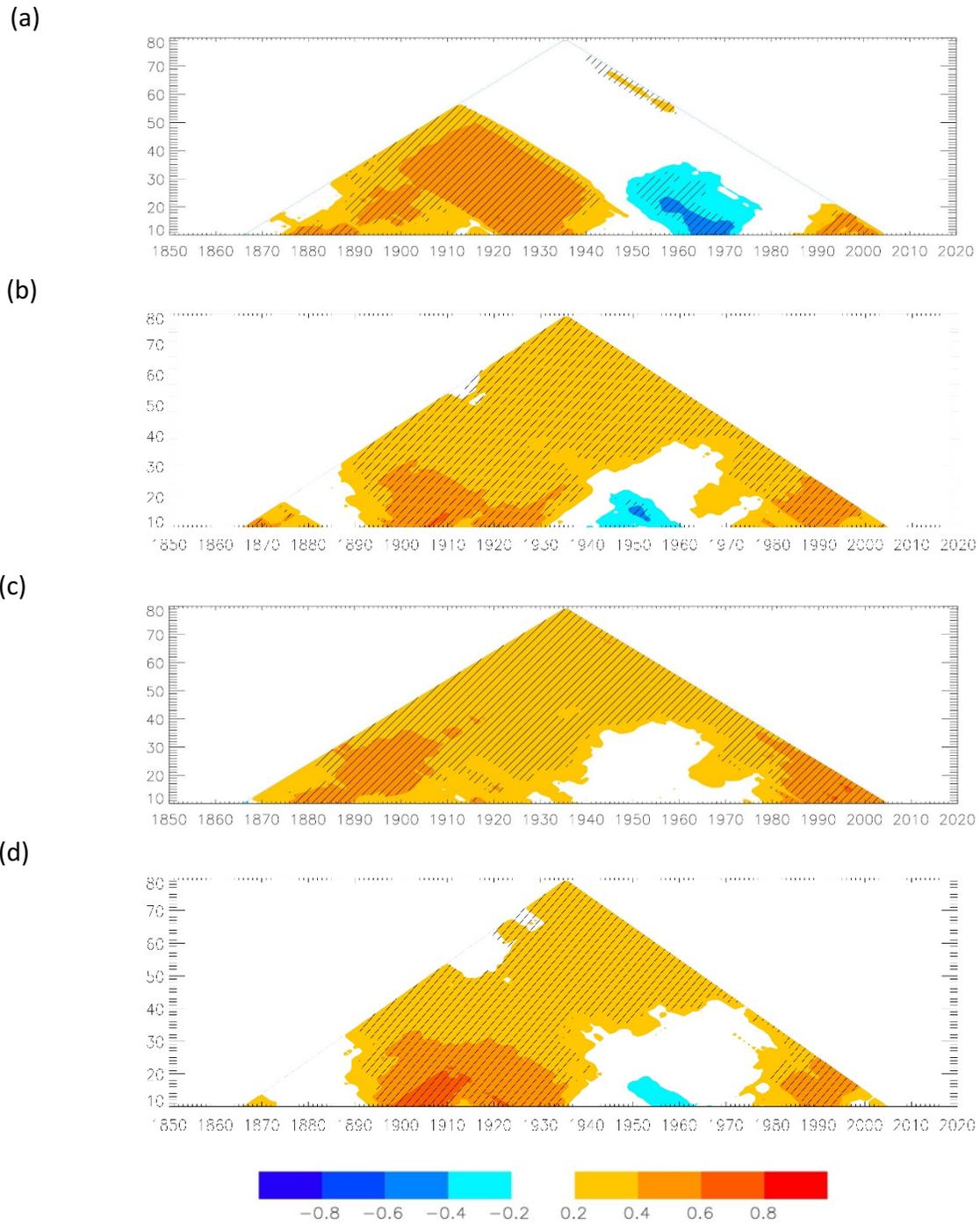


Figura A2. Correlación con ventanas móviles entre el índice AMO, y el índice (a) frecuencia de CT, (b) duración de CT, (c) frecuencia de huracanes y (d) duración de huracanes. En todos los casos durante los meses de mayor actividad ciclónica (agosto-septiembre-octubre).

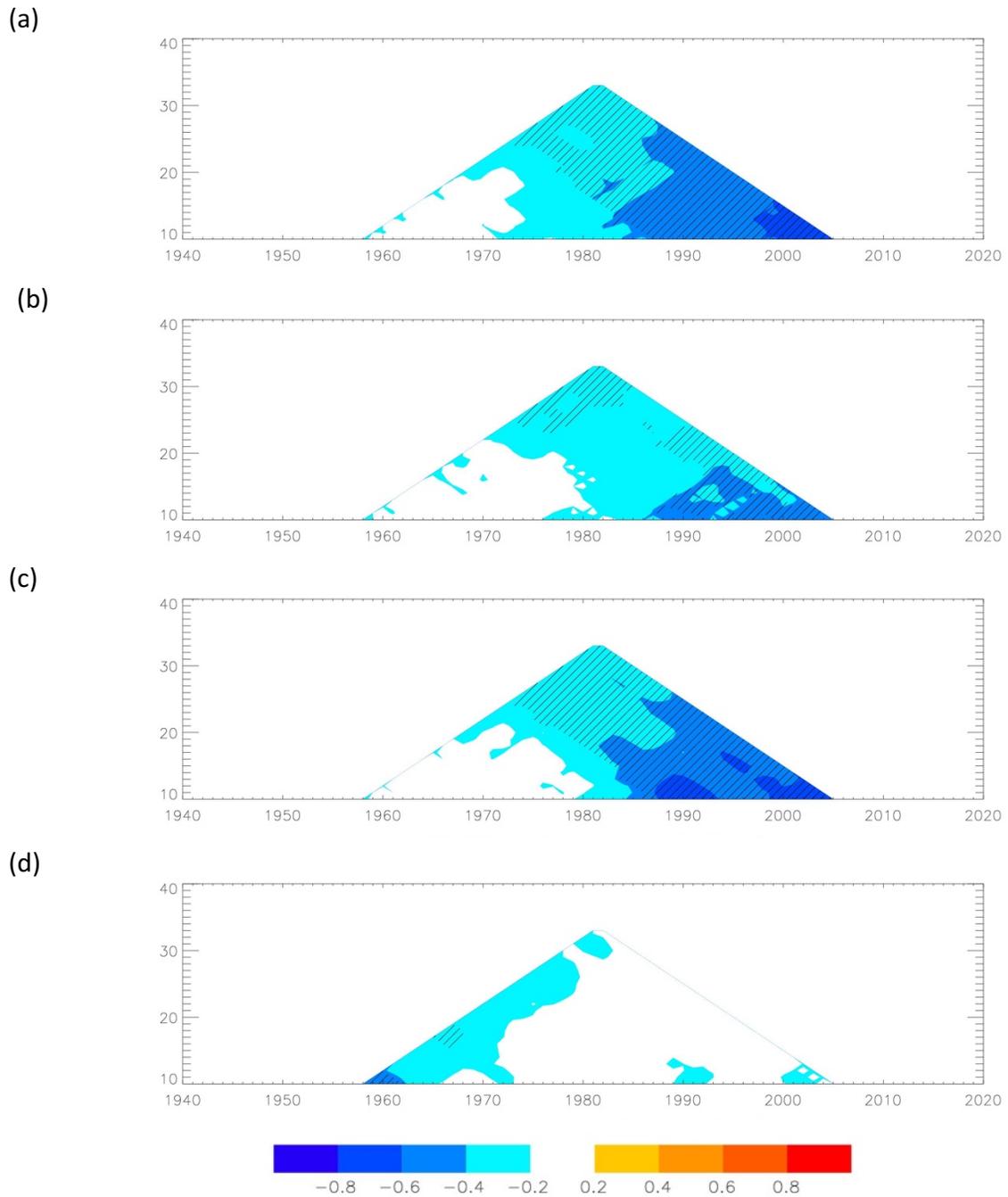


Figura A3. Correlación con ventanas móviles entre el índice BEST, y el índice (a) frecuencia de CT, (b) duración de CT, (c) frecuencia de huracanes y (d) duración de huracanes. En todos los casos durante los meses de mayor actividad ciclónica (agosto-septiembre-octubre).

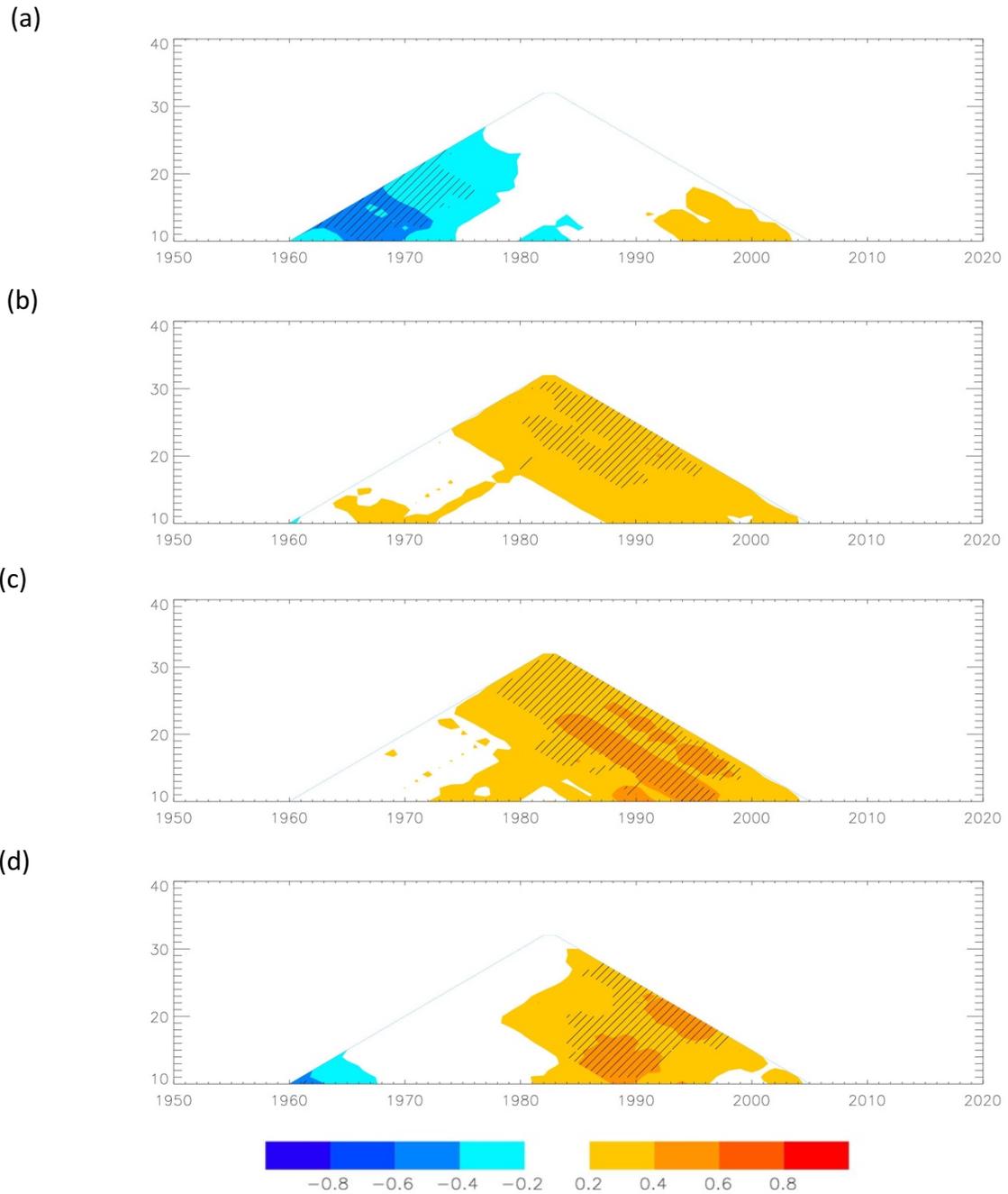


Figura A4. Correlación con ventanas móviles entre el índice CAR, y el índice (a) frecuencia de CT, (b) duración de CT, (c) frecuencia de huracanes y (d) duración de huracanes. En todos los casos durante los meses de mayor actividad ciclónica (agosto-septiembre-octubre).

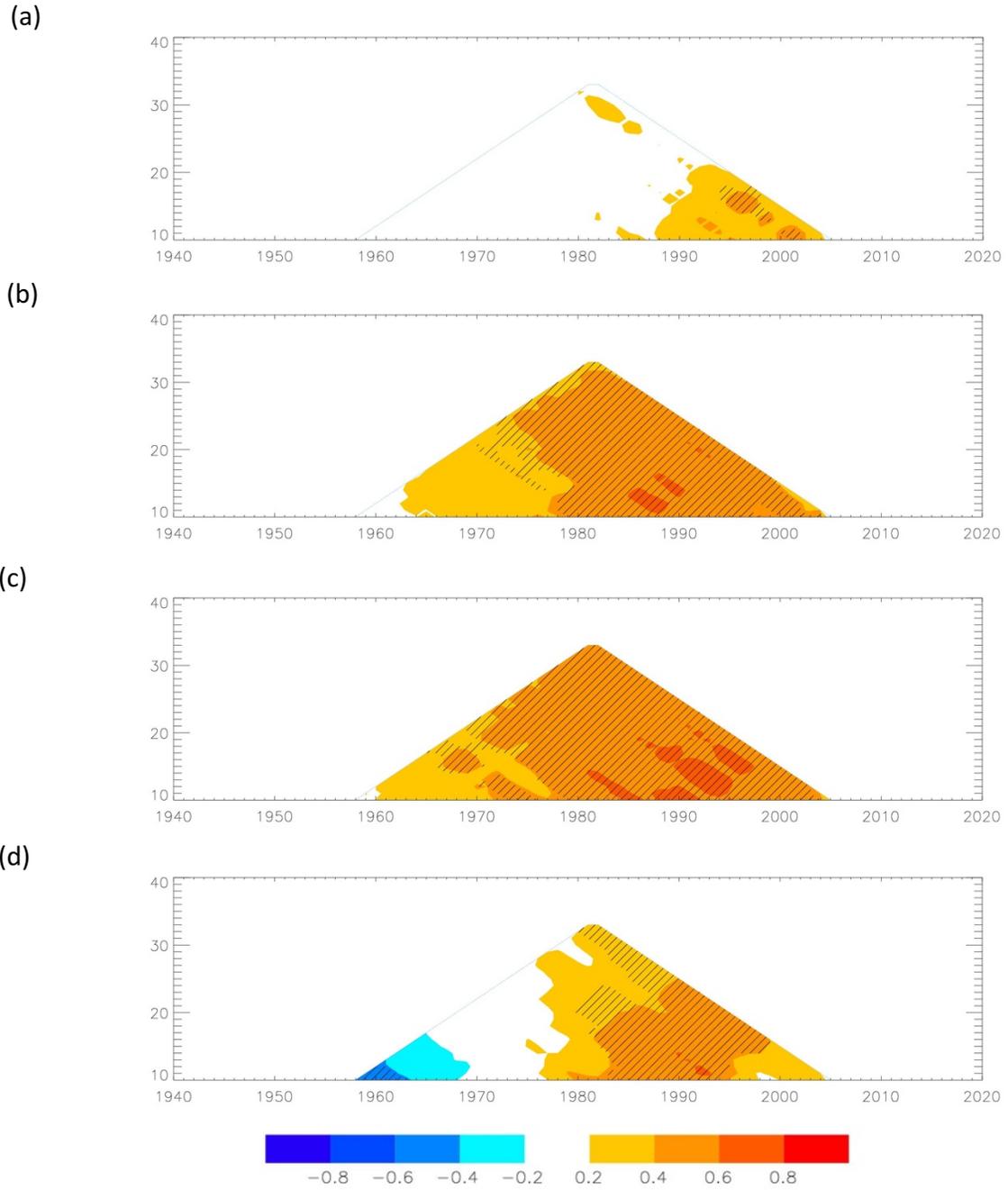


Figura A5. Correlación con ventanas móviles entre el índice TNA, y el índice (a) frecuencia de CT, (b) duración de CT, (c) frecuencia de huracanes y (d) duración de huracanes. En todos los casos durante los meses de mayor actividad ciclónica (agosto-septiembre-octubre).

APÉNDICE B

Seguidamente se muestran los valores de los coeficientes de correlación de Pearson obtenidos con las distintas oscilaciones climáticas analizadas en este trabajo y la frecuencia y duración de los CT y huracanes. Los coeficientes de correlación que se encuentran dentro del entramado son válidos en un 95% utilizando la prueba de t de Student.

Los diagramas muestran en el eje horizontal los años y en el eje vertical el parámetro de ventana móvil, el cual es básicamente el número de datos que se consideraron para hacer las correlaciones. Los contornos de colores indican el valor del coeficiente de correlación, los colores cálidos son correlaciones positivas y los colores fríos indican correlaciones negativas, entre más fuertes sean los colores, más intensa es la correlación, los valores van de 0.2 en 0.2, desde el -1 hasta el +1.

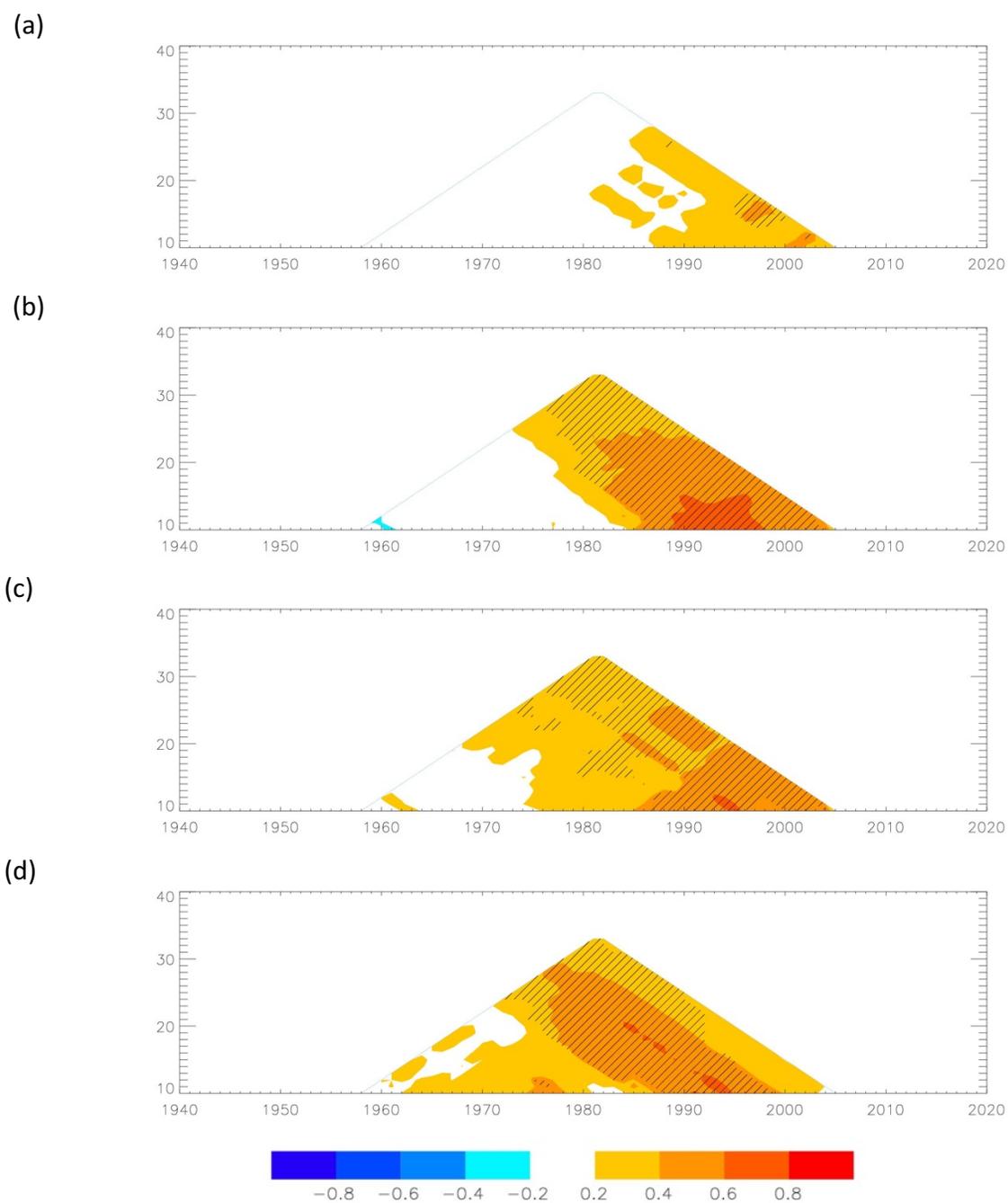


Figura B1. Correlación con ventanas móviles entre el índice AMM, y el índice (a) frecuencia de CT, (b) duración de CT, (c) frecuencia de huracanes y (d) duración de huracanes. En todos los casos durante los meses de mayor actividad ciclónica (julio-agosto-septiembre).

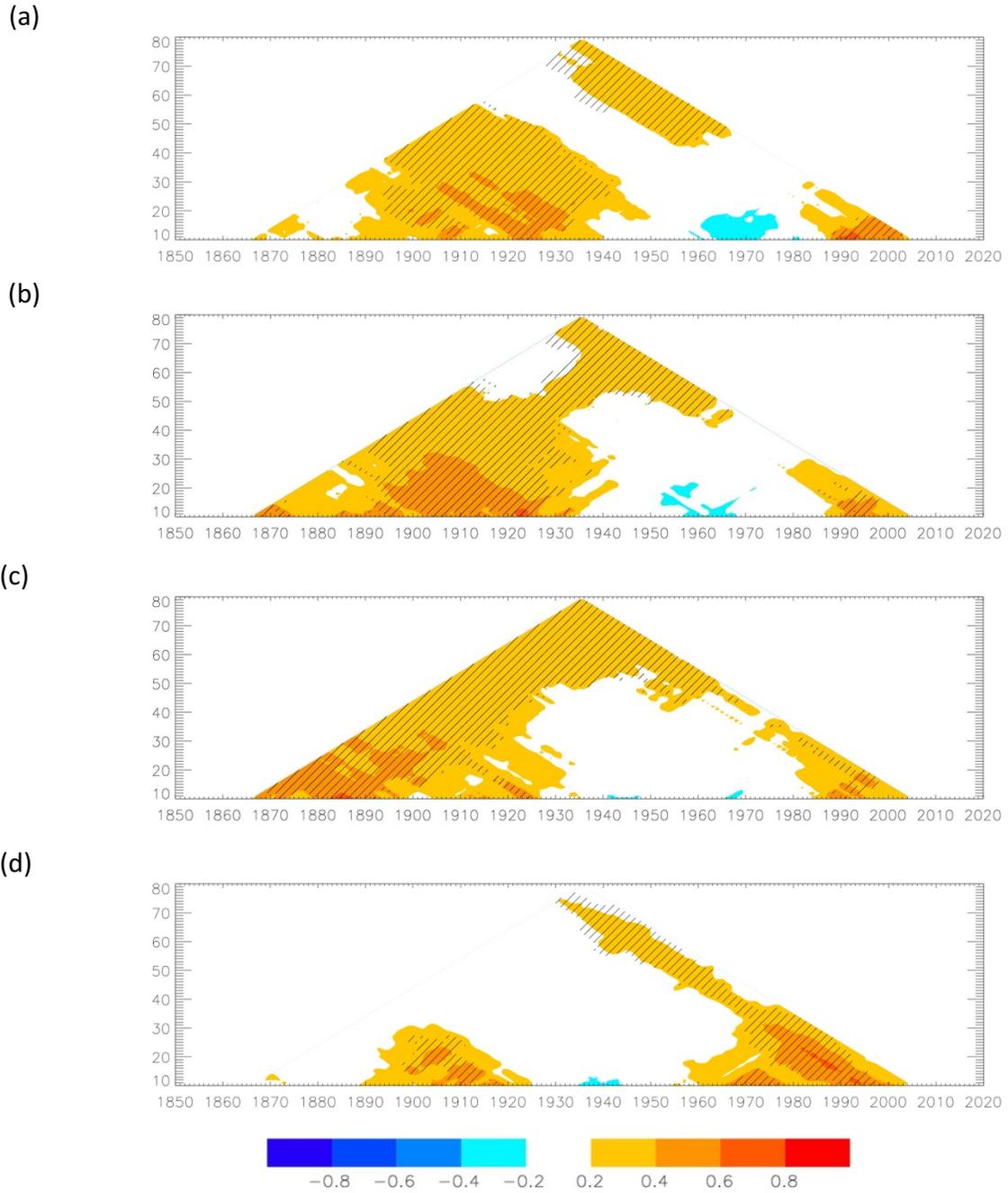


Figura B2. Correlación con ventanas móviles entre el índice AMO, y el índice (a) frecuencia de CT, (b) duración de CT, (c) frecuencia de huracanes y (d) duración de huracanes. En todos los casos durante los meses de mayor actividad ciclónica (julio-agosto-septiembre).

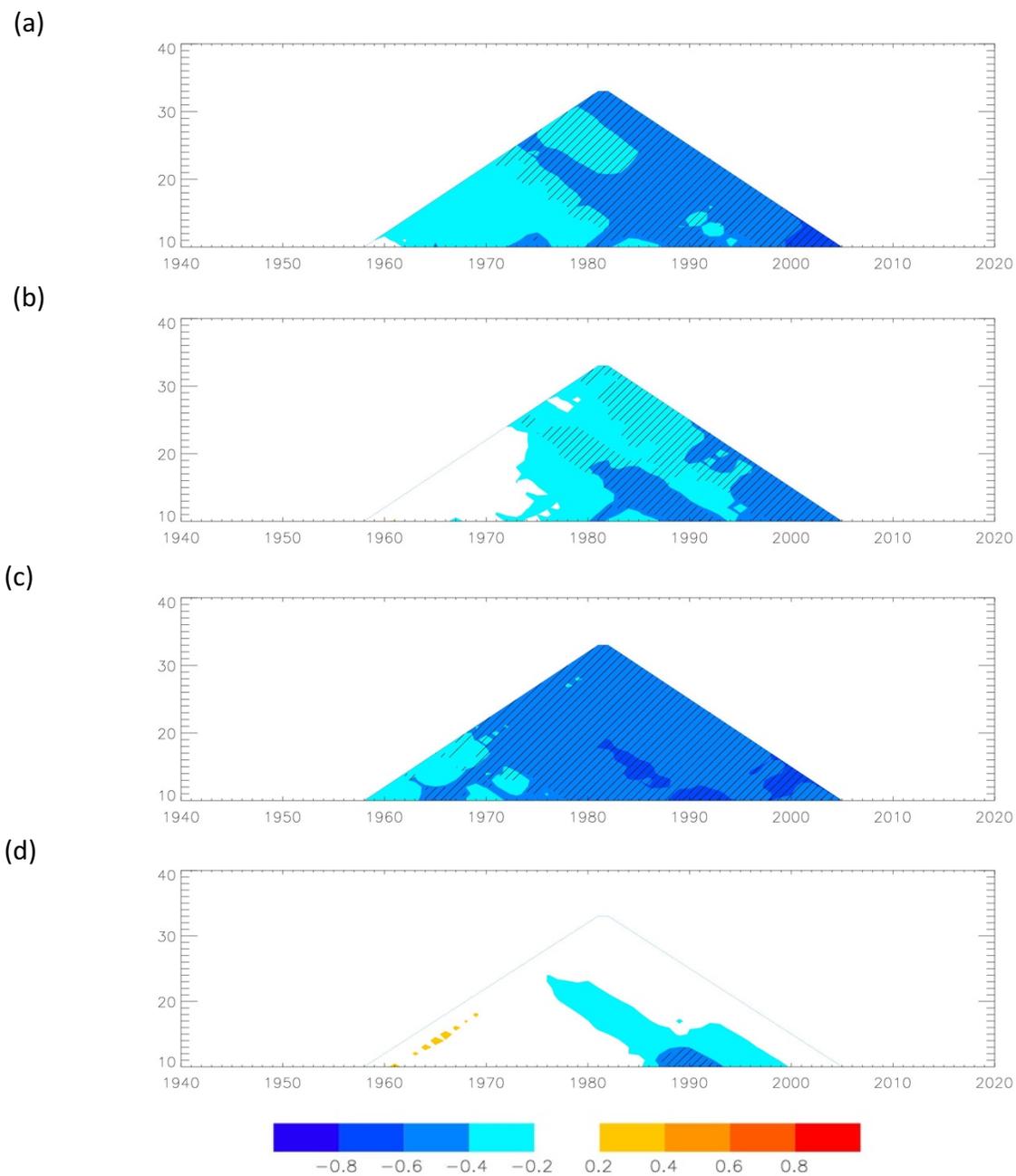


Figura B3. Correlación con ventanas móviles entre el índice BEST, y el índice (a) frecuencia de CT, (b) duración de CT, (c) frecuencia de huracanes y (d) duración de huracanes. En todos los casos durante los meses de mayor actividad ciclónica (julio-agosto-septiembre).

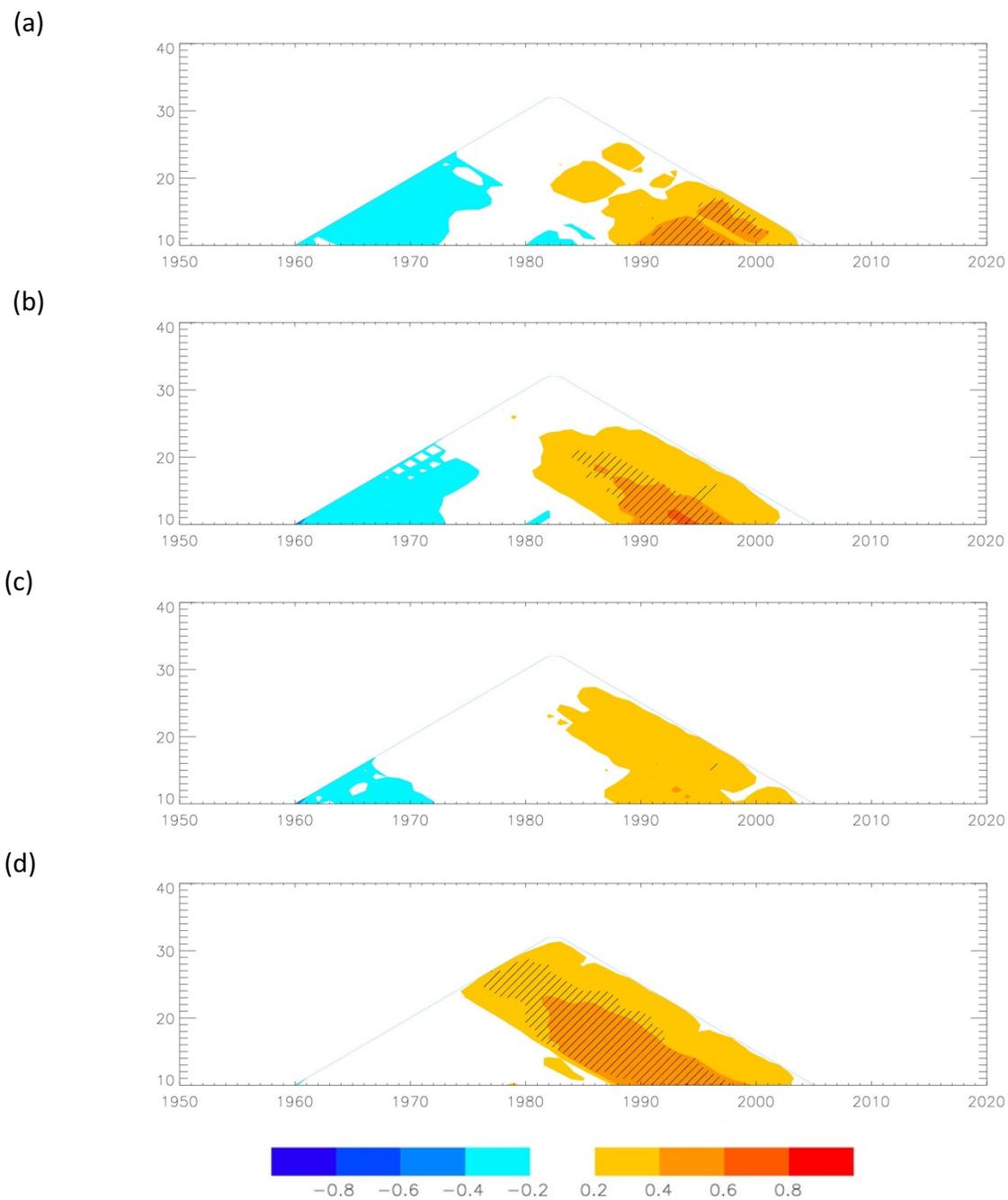


Figura B4. Correlación con ventanas móviles entre el índice CAR, y el índice (a) frecuencia de CT, (b) duración de CT, (c) frecuencia de huracanes y (d) duración de huracanes. En todos los casos durante los meses de mayor actividad ciclónica (julio-agosto-septiembre).

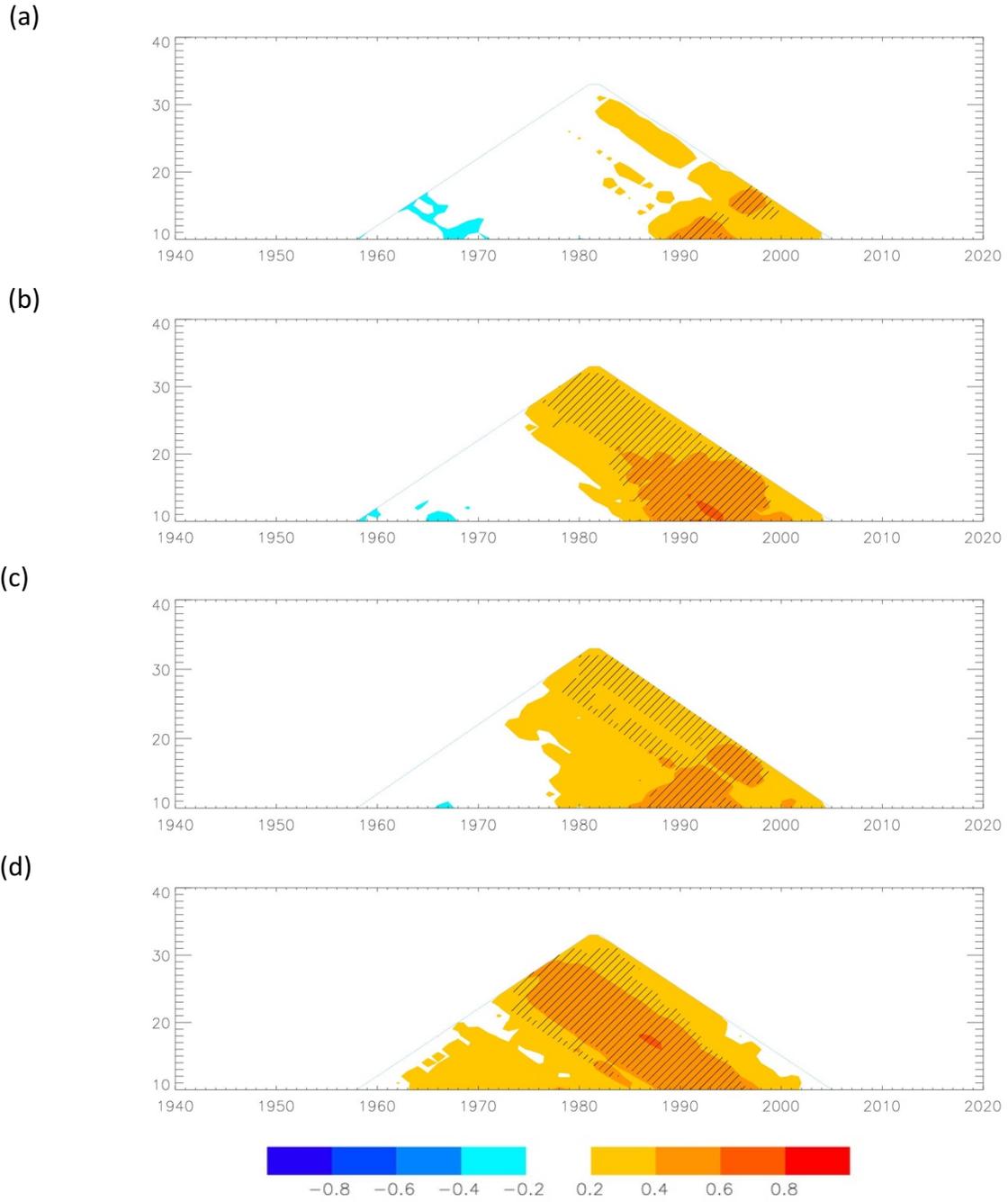


Figura B5. Correlación con ventanas móviles entre el índice TNA, y el índice (a) frecuencia de CT, (b) duración de CT, (c) frecuencia de huracanes y (d) duración de huracanes. En todos los casos durante los meses de mayor actividad ciclónica (julio-agosto-septiembre).