



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO

**El papel del tamaño de los ciclones tropicales en la
precipitación en México**

T E S I S

que para optar por el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

ADOLFO PÉREZ ESTRADA

Directora de Tesis:

DRA. CHRISTIAN DOMÍNGUEZ SARMIENTO
Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático

Ciudad Universitaria, CD. MX. Octubre 2022



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.

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencia a, las obras de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'P' followed by 'Estrada' and a large, stylized 'A'.

Adolfo Pérez Estrada

Para Adolfo y Lourdes

*Ustedes han sido los mejores padres que pude desear.
Todo el apoyo que he recibido de ustedes me ha traído
a cosechar estos logros, nuestros logros.*

Para Larissa y Alberto

*Mi motivación principal siempre será mostrarles
que siempre pueden lograr lo que se proponen.
Este trabajo lleva su nombre en cada página.*

AGRADECIMIENTOS

Vaya camino qué ha sido llegar a terminar este trabajo. Si bien los resultados son muy buenos, el desarrollo para obtenerlos fue una combinación de grandes esfuerzos. Mi tesis es un producto de un posgrado virtual, a pesar de que originalmente debió ser presencial. Por ello, la lista de personas a quién agradezco es corta, pero gracias por haber siempre estado ahí.

Empiezo obviamente con mi tutora, directora, profesora, mentora y amiga, la Dra. Christian Dominguez Sarmiento. Le agradezco muchas cosas. Desde compartir conmigo su amor y pasión por los ciclones tropicales hasta cada palabra de motivación para llegar al producto final. Gracias sobre todo, por mostrarme el verdadero lado de la academia y motivarme a seguir en esta increíble labor.

A mi comité tutor: la Dra. Graciela Raga y el Dr. Luis Farfán, así como a mi comité sinodal, la Dra. Ericka López, Dr. Ernesto Caetano y el Dr. Carlos Ochoa. Agradezco todo su apoyo, correcciones y consejos en esta tesis. Hago un reconocimiento importante al Dr. Alejandro Jaramillo porque me hizo muy fácil poder entender aquellos artículos que eran muy complicados al inicio.

Y si bien durante la maestría gané muchos conocimientos, estoy muy feliz de haber ganado grandes amigos. Principalmente a quien le debo casi toda la existencia de mi tesis, a Félix Alberto. Su amistad, orientación y el tiempo que me dio durante horas de llamadas virtuales han sido de mis momentos favoritos de esta etapa.

Dos años, qué entre momentos iban muy rápidos y luego pasaban lento, mis crisis emocionales y el “home office” no me dejaron más alternativa que acoplarme a un ambiente laboral. Agradezco a quien originalmente son mi familia, pero fungieron como “*co-workers*”: al mejor jefe de oficina (Adolfo Pérez), a la directora de operaciones más capacitada (Lourdes Estrada), a los licenciados de escritorios adjuntos (Larissa y Alberto) y a mi terapeuta personal (Bailey). Además al agregado final de mi familia el pequeño Koda.

No puedo pensar en este trabajo sin obviamente recordar a Seth. Una de mis motivaciones más grandes. Es una persona que cada día se ha convertido en alguien importante para mí. Gracias por tu apoyo, tiempo y cariño. Eres un pilar fundamental en mi vida y trabajo.

A esas personas que nunca se fueron y estuvieron conmigo siempre; mis amigos de toda la vida: Rebeca, Juanito, Fernando, Victor, Lupita, Valeria, Julio, Yoaly, Ricardo, LJ, Cesar y Esteban. Además de la llegada de la única y especial Mariel.

Claramente también agradezco al resto de mi familia y amigos que siguen ahí conmigo, me han echado muchas porras, celebrado mis éxitos y reconfortado cuando aparentemente he fracasado. Gracias por no dejarme solo.

Al ICAYCC, al Posgrado de Ciencias de la Tierra y por supuesto a la UNAM, por permitirme ser un miembro más de su comunidad, darme todas las herramientas para ser un mejor profesionalista y mexicano. Sepan que seguiré trabajando para poner en alto su nombre y muchos más sean motivados a ser parte de ustedes.

Agradezco igualmente todos los apoyos económicos recibidos y mencionados en los créditos tanto por CONACyT como por DGAPA-UNAM. Así como el apoyo técnico de Albenis Pérez y Félix Nieto.

Finalmente cierro los agradecimientos con un mensaje personal, pues hago un reconocimiento a mi mismo, llegamos a pensar que no se podría, pero... ¡Sí se pudo Adolfo!

CRÉDITOS

Este trabajo fue desarrollado gracias al financiamiento, apoyo intelectual e interacción de las siguientes instituciones y/o personas:

- Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico a través de la beca académica para financiar el periodo de estudio y desarrollo de la maestría durante 24 meses (No. de CVU: 1035181)
- Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) “Modulación del ENSO y MJO en la actividad ciclónica tropical en México” con número de expediente IA101222. Agradezco ala DGAPA-UNAM la beca recibida durante dos meses.
- El Instituto de Ciencias de Atmósfera y Cambio Climático por la facilitación del equipo de cómputo y almacenamiento para continuar el desarrollo de este proyecto.
- El Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, por el apoyo y recursos otorgados durante el desarrollo de mis clases de maestría y la finalización de este trabajo.
- Christian Dominguez Sarmiento por sus ideas, participación, orientación y desarrollo del proyecto en su totalidad.
- Felix Alberto Nieto García por su participación en la elaboración del algoritmo “ROCLOUD.py”.
- Albenis Pérez Alarcón y el resto de su equipo de trabajo, por la disponibilidad y proporcionar los datos del tamaño del campo de vientos de los ciclones tropicales.

*“La ciencia no es perfecta, con frecuencia se utiliza mal,
no es más que una herramienta, pero es la mejor herramienta que tenemos,
se corrige a sí misma, está siempre evolucionando y se puede aplicar a todo.
Con esta herramienta conquistamos lo imposible.”*
- Carl Sagan

RESUMEN

EL PAPEL DEL TAMAÑO DE LOS CICLONES TROPICALES EN LA PRECIPITACIÓN EN MÉXICO

Los ciclones tropicales (CT) del Atlántico Norte (NA, por sus siglas en inglés) y del Pacífico Oriental (EP, por sus siglas en inglés) afectan a México y Centroamérica cada año. Su paso por la región produce no sólo el abastecimiento de agua a las regiones semiáridas, sino también impactos socioeconómicos en las regiones vulnerables a los vientos intensos y a las precipitaciones extremas. Los desastres asociados han motivado a las autoridades mexicanas a desarrollar un Sistema de Alerta Temprana para CTs (SIAT-CT). Sin embargo, este SIAT-CT es aún ineficiente debido a la definición del tamaño del CT (definido por la extensión de los vientos a 34 nudos, comúnmente llamado R34) y la desatención de la precipitación del CT en las alertas. Se propone utilizar tamaños de CT que consideren las bandas de lluvia del CT y el campo de vientos. Para calcular el tamaño del CT, se utiliza una nueva parametrización que considera el perfil radial de los vientos, la posición del CT e imágenes de satélite infrarrojas (IR), que nos lleva a calcular los radios del CT por cuadrantes definidos de acuerdo a los puntos cardinales, durante el periodo 2000-2020. Los resultados muestran que los CTs suelen ser más grandes en la cuenca NA que en el EP. Además de que no existe una relación aparente entre el tamaño del CT y la intensidad del CT en ambas cuencas. Los radios calculados describen apropiadamente las áreas de precipitación asociadas al CT al encontrar correlaciones positivas mayores a 0.3 a un nivel de confianza del 99 % con la extensión de las regiones de precipitación. La influencia de la predicción de la precipitación se da a través de parámetros como la humedad específica a niveles medios, la cizalladura vertical del viento y valores de divergencia en la atmósfera superior. Se resalta la importancia de la forma del CT al momento de la descripción del tamaño del CT y la precipitación que produce. Se concluye que la nueva definición del tamaño del CT propuesta conduce a mejores alertas que el uso de R34. También se discuten sugerencias sobre cómo se puede mejorar la capacidad de resistencia para hacer frente a los CT.

Palabras clave: *Ciclones tropicales, Tamaño del ciclón tropical, Precipitación, SIAT-CT.*

Índice general

Índice de figuras	x
Índice de tablas	xvi
1 Introducción	2
1.1 Los ciclones tropicales en México y la escala Saffir-Simpson	3
1.2 Sistema de Alerta Temprana para CTs (SIAT-CT) en México	5
1.3 Definiciones del tamaño de los CTs	9
1.4 Características del tamaño y su relación con la lluvia	11
1.5 Relación del tamaño de los CTs con las variables medioambientales .	12
1.6 Planteamiento del problema	13
1.7 Justificación	14
1.8 Hipótesis	14
1.9 Objetivos	14
1.9.1 Objetivo General	14
1.9.2 Objetivos Específicos	15
1.10 Estructura de la tesis	15
2 Datos y Métodos	16
2.1 Base de datos HURDAT	16
2.2 Base de datos GPM	17
2.2.1 Temperatura de Brillo: NCEP/CPC L3 Half Hourly 4km Glo- bal Merged	17
2.2.2 Precipitación: GPM_IMERG	18
2.3 Base de datos de reanálisis ERA 5	18
2.4 Base de datos CHIRPS	19
2.5 Técnica para definir el tamaño de los CTs	20
2.5.1 Técnica para determinar el tamaño de los CTs usando perfiles radiales de viento	20
2.5.2 Algoritmo ROCCLOUD	21
2.6 Métodos para relacionar la lluvia con el tamaño del ciclón	24
2.6.1 Algoritmo del Radio de las Bandas de Precipitación (RBP) . .	25
2.6.2 Técnica de anillos usando los datos de GPM IMERG	26
2.6.3 Técnica de anillos usando los datos continentales de CHIRPS .	27
2.7 Relaciones estadísticas	28
2.7.1 Correlación de spearman	29

2.7.2	Modelos de Estimación de Ecuaciones Generalizadas	29
2.8	Métricas sobre la forma de los CTs	30
3	Resultados	32
3.1	Climatología de los tamaños de los CTs en los Mares Intramericanos y el Océano Pacífico del este	32
3.1.1	Distribución del tamaño del CT	32
3.1.2	Variación espacial del tamaño de los CTs	37
3.1.3	Variación mensual e interanual del tamaño de los CTs	40
3.2	Precipitación asociada al CTs en función del tamaño	43
3.2.1	Climatología del tamaño de la PCT usando datos IMERG	43
3.2.2	Dependencia de la PCT con el tamaño del CT	46
3.3	Relaciones estadísticas entre la precipitación y las variables medioam- bientales	52
3.4	Métricas de forma de los Ciclones Tropicales	55
3.4.1	Características de la forma y el tamaño del CT	57
3.4.2	Relación de las métricas de forma con la precipitación del CT	62
4	Conclusiones y Trabajo Futuro	64
4.1	Conclusiones	64
4.2	Importancia de la incorporación del tamaño y la lluvia asociada al ciclón tropical en el SIAT-CT	65
4.3	Trabajo futuro	66
	Referencias	68
A	Radios calculados por categoría	76

Índice de figuras

1.1	Porcentaje de los CTs que hicieron <i>landfalling</i> en las costas mexicanas. Los CTs del Atlántico Norte (NA) están en barras rojas y los del Pacífico Noreste (EP) en barras grises. Disturbio está representado por DI (Sistema en degradación), Depresión Tropical por DT, Tormenta Tropical por TT, Huracán de intensidad menor por HUR 1-2 y Huracán de intensidad mayor por HUR 3-5 durante el periodo 2000-2020.	4
1.2	Representación del nivel de alerta del SIAT-CT para la TT Cristóbal el 4 de junio del 2020 en sus posiciones reportadas durante las 00:00 UTC(a), 06:00 UTC(b), 12:00 UTC(c), 18:00 UTC(d) y las 00:00 UTC(e) del 5 de junio. Los colores representan las acciones a realizar por parte de las autoridades y población (Tabla 1.2). Las posiciones están representadas por un icono característico de un CT, mientras que la trayectoria del CT por una línea negra.	7
1.3	Valores de precipitación reportadas por CHIRPS el día 4 de junio del 2020 en el sureste de México. Las posiciones de la TT Cristóbal de las 00:00 UTC del 4 de junio al 00:00 UTC del 5 de junio del 2020 se muestran en verde (Tormenta Tropical) y azul (Depresión Tropical). Las mayores tasas de precipitación acumulada diaria se observaron en el sureste de Chiapas, el centro de la península de Yucatán, oeste de Campeche y norte de Quintana Roo.	8
1.4	Representación de los parámetros de compactación del tamaño de un CT en proceso de evolución a ciclón extratropical (ET) o debilitamiento. Tomado de Zick y Matyas (2016)	12
2.1	La región de estudio se encuentra marcada por un cuadro negro. Las posiciones de cada 6 horas de los CTs en el Océano Atlántico del norte (NA) y en el Océano Pacífico del este (EP) se encuentran en polígonos rojos y grises, respectivamente.	16
2.2	Diagrama esquemático que muestra los procesos realizados por el algoritmo ROCLOUD.	23

2.3 Extensión del campo de nubes a través de contornos generados con imágenes IR (contornos grises) del huracán Alex 2010, cuyas posiciones están representadas por puntos azules. Las líneas rojas representan la división de cuadrantes considerada para la determinación de los radios del CT. El cuadrante noroeste está representado por NO, el cuadrante noreste por NE, el cuadrante suroeste por SO y el cuadrante sureste por SE. 23

2.4 Valores de precipitación del GPM IMERG para la TT Cristóbal en su posición del 4 de junio del 2020 a las 06:00 UTC (en marcador negro). La línea roja es el área creada por los cuatro radios de ROCLLOUD. Los polígonos que interceptan esta área serán tomados en cuenta por el algoritmo RBP. 26

2.5 Similar a la Fig. 2.4, pero mostrando los anillos usados cada 50 km. 27

2.6 Posiciones de los CT que se encuentran sobre territorio mexicano (rojo) y cercanos a la costa (distancia ~ 250 km, en azul). Las posiciones en gris representan las posiciones que no fueron tomadas en cuenta. 28

3.1 Cajas y bigotes de las distribuciones de los radios por cuadrante y el R_p (km) de los radios en la región de estudio de la cuenca NA (rojo) y EP (gris). Los valores promedios se encuentran representados por el punto blanco dentro de la caja durante el periodo 2000-2020. 34

3.2 Distribución del tamaño del radio promedio (km) en la cuenca del NA. La frecuencia relativa se obtiene con respecto a todos los CTs del NA durante el periodo 2000-2020. Las líneas representan las categorías: DT (\circ), TT (\times), HUR 1-2 (\square), HUR 3-5 ($+$) 34

3.3 Histograma de frecuencia relativa (%) por categoría del tamaño (km) de los CTs, con respecto al número de casos de cada categoría, para la cuenca NA durante el periodo 2000-2020. Las barras representan las categorías de los CTs, de colores claros a oscuros: DT, TT, HUR 1-2 y HUR 3-5 35

3.4 Como en la Fig. 3.2, pero para EP. 35

3.5 Como en la Fig. 3.3, pero para EP. 36

3.6 Distribución espacial del tamaño de los CTs por cuadrante (km): (a) RNE , (b) RNO , (c) RSO , (d) RSE y (e) R_p . Los límites en la barra de colores representan los rangos intercuantílicos (p25 y p75) durante el periodo 2000-2020. 38

3.7 Comportamiento promedio del R_p (km) en negro y del radio por cuadrantes (RNE en amarillo, RNO en rojo, RSO en verde y RSE en azul) de los CTs en: a) NA y b) EP, 24h antes (-24h) y 24h después de hacer *landfalling* (24h). Las áreas sombreadas muestran el error estándar asociado al valor promedio de R_p cada 6h. 39

3.8 Compuestos de tamaño de R_p (km) de: (a) los CTs sobre NA (en rojo) y EP (en gris) y las TTs (en amarillo), HUR1-2 (en verde) y HUR3-5 (en azul) sobre (b) NA y (c) EP. El tiempo 0h representa el momento en que alcanzan la máxima intensidad. Las áreas sombreadas proporcionan el error estándar asociado al valor promedio de R_p cada 6 h. 40

3.9 Cajas y bigotes de los valores promedio mensual de R_p (km) sobre el NA (rojo) y el EP (gris) durante el periodo 2000-2020. Los bigotes representan la distribución de los valores por encima (debajo) de los p75 (p25) y los puntos representan los outliers. Los puntos blancos muestran el promedio. Las divisiones dentro de la caja representan el primer y tercer cuartil. 41

3.10 Frecuencia relativa (%) mensual del tamaño de los CTs para (a) NA y (b) EP. Se muestran las frecuencias de CT grandes (p75; en negro) y CT pequeños (p25; en gris). La línea punteada representa el porcentaje de todos los CTs por mes. 41

3.11 Promedios anuales de R_p (km) para los CTs del NA (rojo) y los del EP (negro) durante 2000-2020. Las líneas discontinuas indican la tendencia de los radios en ambas cuencas. 42

3.12 Tendencia anual (km/año) del tamaño del radio promedio (R_p) durante el periodo 2000-2020. Las cruces muestran las regiones estadísticamente significativas usando la prueba U de Mann-Whitney, donde $p < 0.1$ 42

3.13 Cajas y bigotes de los radios por cuadrante y radio promedio (km) definido por el algoritmo RBP de los CTs del NA (en rojo) y EP (en gris). El promedio se encuentra representado por el punto blanco durante el periodo 2000-2020. 44

3.14 Frecuencia relativa (%) del tamaño de los radios de la PCT (km) por categoría del CT sobre: (a) NA y (b) EP durante el periodo 2000-2020. Las líneas representan las categorías: DT (\circ), TT (\times), HUR 1-2 (\square), HUR 3-5 ($+$) 45

3.15 Tasa de precipitación ($\text{mm } h^{-1}$) de IMERG del CT en función del radio (km), medido por la técnica de anillos, para (a) todas las posiciones, (b) posiciones sobre continente y (c) posiciones que se encuentren al menos a 250 km de la costa. La línea roja representa los CTs del NA y la línea negra representa los CTs del EP. 47

3.16 Tasa de precipitación ($\text{mm } h^{-1}$) de IMERG por tamaño del cuadrante del CT (km), definido por ROCCLOUD, sobre: (a)NA y (b) EP. La línea roja representa el cuadrante RNE , la línea verde representa el cuadrante RNO , la línea azul representa el cuadrante RSO y la línea amarilla representa el cuadrante RSE 48

3.17 Correlación de Spearman entre el tamaño del CT (km), definida por la técnica de anillos cada 50 km, y los valores de la PCT de IMERG para la cuenca: (a) NA y (b) EP. La línea negra representa el radio promedio, la línea roja representa el cuadrante *RNE*, la línea verde representa el cuadrante *RNO*, la línea azul representa el cuadrante *RSO* y la línea amarilla representa el cuadrante *RSE*. Los valores son estadísticamente significativos a un nivel del 95 % de confianza, excepto en los radios de 0-100 km y mayores a 1800 km. 49

3.18 Tasa de precipitación (mm h^{-1}) de los CTs dependiendo de su intensidad y tamaño (km), usando perfiles radiales a partir de la técnica de anillos, para las cuencas: (a) NA y (b) EP. La línea roja representa las DTs, la línea verde representa las TTs, la línea azul representa los HUR 1-2 y la línea amarilla los HUR 3-5. 50

3.19 Tasa de precipitación (mm h^{-1}) del CTs en función de su tamaño (km), definido por los rangos intercuartílicos del tamaño definido por ROCLOUD, en las cuencas: (a) NA y (b) EP. La línea roja representa los CTs pequeños, la línea verde representa los CTs promedio y la línea azul representa los CTs grandes. 50

3.20 Tasa de precipitación (mm h^{-1}) del CTs en función de su tamaño (km), definido por los rangos intercuartílicos del tamaño definido por ROCLOUD, en las cuencas: (a) NA y (b) EP. La línea roja representa los CTs pequeños, la línea verde representa los CTs promedio y la línea azul representa los CTs grandes. 51

3.21 Precipitación diaria (mm dia^{-1}) del CT por tamaño de los cuadrantes (km), definido por la técnica de anillos, para la cuenca: (a) NA y (b) EP, usando los datos CHIRPS. La línea roja representa el cuadrante *RNE*, la línea verde representa el cuadrante *RNO*, la línea azul representa el cuadrante *RSO* y la línea amarilla representa el cuadrante *RSE*. 52

3.22 Frecuencia relativa (%) de las métricas de forma de los CTs de la cuenca NA (a,c,e) y EP (b,d,f) durante el periodo de 2000 al 2020. Las barras verdes corresponden a la asimetría (a,b). Las barras rojas (c,d) corresponden a la dispersión y las barras azules corresponden a la solidez (e,f). 56

3.23 Diagrama de dispersión y densidad de probabilidad de las métricas de forma en función del tamaño promedio (km) de los CTs del NA, definidos por el algoritmo ROCLOUD, durante el periodo 2000-2020. La línea punteada negra indica un valor de parámetro de 0.5. Los colores verdes corresponden a la *A*. Los colores rojos corresponden a la *D* y los colores azules corresponden a la *S*. 58

3.24 Como en la Fig. 3.23, pero para los CTs del EP. 58

3.25 Distribución espacial en una malla de $2^\circ \times 2^\circ$ de la métrica de *D* de los CTs analizados. Los rangos de color en la escala fueron determinados por los rangos intercuartílicos. 59

3.26 Como en la Fig. 3.25, pero para *A* 59

3.27	Como en la Fig. 3.25, pero para S	60
3.28	Comportamiento promedio de las métricas de forma de los CTs de la cuenca NA (en rojo) y EP (en negro) 24h antes (-24) y 24h después (24) de hacer <i>landfalling</i> . Las líneas con viñetas cuadradas representan la métrica D . Las líneas con viñetas circulares representan la métrica A . Las líneas con viñetas de cruz representan la métrica S . Las áreas sombreadas proporcionan el error estándar asociado a cada valor medio de las métricas.	61
3.29	Cajas y bigotes de las distribuciones de las métricas de forma (D , A y S) de los CTs de la cuenca: (a) NA y (b) EP en función de la intensidad de los CTs durante el periodo 2000-2020. Los puntos blancos dentro de las cajas representan el promedio. Las cajas verdes representan DTs. Las cajas rojas representan TTs. Las cajas azules representan HUR 1-2 y las cajas amarillas representan HUR 3-5. . . .	61
3.30	Cajas y bigotes de las distribuciones de las métricas de forma (D , A y S) de los CTs de la cuenca: (a) NA y (b) EP, en función de los CTs pequeños(p25) y los CTs grandes(p75), definidos por el algoritmo ROCLOUD, durante el periodo 2000-2020. Los puntos blancos dentro de las cajas representan el promedio. Las cajas verdes representan los CTs pequeños. Las cajas rojas representan los CTs promedio. Las cajas azules representan los CTs grandes.	62
4.1	Alertamientos emitidos por el SIAT-CT usando la definición de tamaño del R34 (a,c,e,g,i) y alertamientos que podrían ser emitidos si se usara la definición del tamaño ROCLOUD (b,d,f,h,j) para el 4 de junio del 2020 en las posiciones de Cristóbal 2020 durante las 00:00 UTC(a; b), 06:00 UTC(c; d), 12:00 UTC(e; f), 18:00 UTC(g; h) y las 00:00 UTC(i; j) del 5 de junio.	67
A.1	Gráfico de violín de densidad por categoría del tamaño ROCL (km) de los CTs, con respecto al percentil 25 (CTs pequeños) y 75 (CTs grandes) por cuenca NA(rojo) y EP (gris). Se presenta el histograma para el radio promedio de acuerdo a la categoría de los CTs en la escala Saffir-Simpson: DT (a), TT(b), HUR 1-2 (c) y HUR 3-5 (d). . .	77
A.2	Histograma de frecuencia relativa por categoría del tamaño ROCL (km) de los CTs, con respecto al número de casos de cada categoría. Se presenta el histograma para el radio promedio (R_p ; a) y por cuadrante: RNE(b), RNO(c), RSO(d) y RSE(c). Información para la cuenca NA durante el periodo 2000-2020.	78
A.3	Histograma de frecuencia relativa por categoría del tamaño ROCL (km) de los CTs, con respecto al número de casos de cada categoría. Se presenta el histograma para el radio promedio (R_p ; a) y por cuadrante: RNE(b), RNO(c), RSO(d) y RSE(c). Información para la cuenca EP durante el periodo 2000-2020.	79

A.4	Gráfico de cajas y bigotes de las distribuciones de los radios por cuadrante y radio promedio de los radios por cuadrante en la región de estudio de la cuenca NA y EP. Las gráficas se presentan de acuerdo a las categorías de los CTs: DT (a), TT(b), HUR 1-2 (c) y HUR 3-5 (d), durante el periodo 2000-2020.	80
A.5	Diagramas de frecuencia mensual del tamaño del CT. Se muestran las frecuencias de TC grandes (25 % más grande) y pequeños (25 % más pequeño) junto con la frecuencia típica de todas las tormentas. Los resultados se basan en los cuartiles inferior (pequeño) y superior (grande) de cada cuenca. Los resultados son de NA (a-d) y EP (e-h), por su categoría DT (a,e), TT(b,f), HU 1-2 (c,g) y HUR 3-5 (d,h). . .	81

Índice de tablas

1.1	Clasificación de los vientos de los CTs de acuerdo a la escala Saffir-Simpson. Se anexan dos categorías adicionales cuando el CT aún no alcanza la categoría de huracán (Kelman, 2013)	4
1.2	Escala de colores de las alertas dependiendo del nivel de peligro estimado para los CTs. El SIAT-CT se compone de dos tablas de alertamiento, dependiendo si el CT se encuentra en fase de acercamiento a un área afectable (parte delantera del ciclón), o si se encuentra alejándose (parte trasera del ciclón).	5
2.1	VARIABLES DEL REANÁLISIS ERA 5 UTILIZADAS EN ESTE ESTUDIO. Se muestran sus abreviaturas y sus unidades.	19
3.1	Estadísticas de la media, mediana, el primer y tercer cuartil (25 % y 75 % respectivamente), la desviación estándar de los radios por cuadrante y del radio promedio (R_p)(km) de los CTs de la cuenca del NA y EP durante el periodo 2000-2020.	33
3.2	Estadísticas (número de posiciones, media y desviación estándar) de los cuartiles superior e inferior del tamaño promedio (km) de los CTs en la cuenca NA durante el periodo 2000-2020.	36
3.3	Estadísticas (número de posiciones, media y desviación estándar) de los cuartiles superior e inferior del tamaño promedio (km) de los CTs en la cuenca EP durante el periodo 2000-2020.	36
3.4	Estadísticas de la media, mediana, el primer y tercer cuartil (25 % y 75 % respectivamente), la desviación estándar de los radios por cuadrante y del radio promedio (R_p), definidos por RBP, (km) para los CTs del NA y EP durante el periodo 2000-2020.	43
3.5	Correlación de rango de Spearman (r) entre los tamaños calculados con las técnicas de ROCCLOUD y RBP para cada cuadrante y promedio; Se determinan para la cuenca NA. Los valores con un asterisco son significativos a un nivel del 95 % de confianza.	45
3.6	Igual a la Tabla 3.5, pero para el EP	46

3.7	Coeficientes de la correlación de Spearman entre las variables medioambientales y las distribuciones de los cúmulos, definidos por el algoritmo RBP, y correlación con la precipitación acumulada diaria considerando el área total del tamaño del CT, definido por RO-CLOUD, para las cuencas NA y EP durante el periodo 2000-2020. El asterisco representa los valores significativos a un nivel de confianza del 99%.	53
3.8	Coeficientes y estimación de modelos de la lluvia acumulada diaria en el área del CT para la cuenca NA y EP. Unidad de PCP: 10^4 mm.	54
3.9	Estadísticas de la media, mediana, el primer y tercer cuartil (25 % y 75 % respectivamente), la desviación estándar de las métricas de forma durante el periodo 2000-2020 para ambas cuencas.	57
3.10	Coeficientes de correlación de Spearman entre las métricas de forma con el tamaño promedio del CT considerando las bandas nubosas, definido por el algoritmo RO-CLOUD y la lluvia acumulada en el área del CT, definida por el algoritmo RBP, para los CTs de NA y EP durante el periodo 2000-2020. El asterisco representa los valores significativos a un nivel de confianza del 99%.	63

*“Solo podemos ver poco del futuro,
pero lo suficiente para darnos cuenta
de que hay mucho que hacer.”*

-Alan Turing

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Dentro de la región conocida como los “trópicos”, se presentan diversos fenómenos meteorológicos, por ejemplo: sistemas frontales, ondas del este y CTs. Los CTs destacan año con año por su recurrencia y magnitud. Además, se caracterizan por tener un centro de baja presión atmosférica con una circulación cerrada, vientos fuertes que giran en contra (a favor) de las manecillas del reloj en el hemisferio norte (sur) y nubes con gran desarrollo vertical.

Los CTs se forman tras encontrar condiciones ideales en los océanos tropicales. A pesar de que los CTs no suelen existir por un periodo largo ($\sim 4 - 7$ días), sus interacciones con otros fenómenos preexistentes, como los anillos calientes oceánicos o con el relieve continental, pueden modificar tanto su tiempo de vida como sus efectos destructivos. Por ello, es importante que exista un adecuado monitoreo y una gestión integral del riesgo que busque reducir el impacto de los CTs.

El uso de las imágenes satelitales para evaluar las condiciones del ambiente externas o internas del CT es esencial para su pronóstico, ya que la mayor parte de las trayectorias de los CTs se ubican mayormente sobre el océano. Dado los principios físicos de la percepción remota, dependiendo del instrumento de medición y el alcance, se pueden obtener diversos tipos de productos satelitales. En el caso del monitoreo de los CTs, las imágenes más utilizadas son del espectro visible, infrarrojo y microondas (Reul y col., 2017). A través de estos recursos es posible ubicar la posición del centro de circulación del CT, estimar la velocidad de los vientos máximos e identificar las bandas nubosas alejadas del centro, que a su vez están relacionadas con la precipitación que causan (Zou, 2020).

Los centros de monitoreo complementan la información satelital cuando se encuentra disponible la información *in situ* obtenida a través de aviones, radiosondeos, barcos, boyas y estaciones meteorológicas para emitir avisos preventivos cuando el CT se aproxima a las costas continentales. Dentro de estos avisos se incluyen la categoría actual y su pronóstico de intensidad; la posible trayectoria; la velocidad de los vientos en nudos ($1 \text{ nudo} = 1.852 \text{ km h}^{-1}$); y en algunos casos, el alcance de los vientos en función de la distancia medida desde el centro, conocido como radio de vientos. Regularmente, se reportan los radios de 34, 50 y 64 nudos (R34, R50 y R64, respectivamente) (Landsea & Franklin, 2013). No obstante, estas velocidades se ubican dentro de la circulación interna del CT, pero no incluyen las bandas de

precipitación que pertenecen aún a la circulación del CT, pero están alejadas del centro.

Al tener una mejor percepción del tamaño, los alertamientos podrían mejorar pues se tendría una mejor idea de las posibles regiones en las que impactarán los vientos y la precipitación asociada a la circulación del CT. Si bien los vientos tienen velocidades suficientes para causar daños graves a estructuras, las grandes acumulaciones de lluvia sobre un sitio causan daños mayores e incluso cobran más vidas humanas. Por ello, comprender la distribución y cantidad de lluvia que puede dejar un CT ha sido objeto de estudio alrededor del mundo.

1.1. Los ciclones tropicales en México y la escala Saffir-Simpson

México se encuentra situado entre dos zonas con alta actividad ciclónica: el Océano Atlántico del Norte, que incluye las costas del Golfo de México y el Mar Caribe; y el Océano Pacífico Noreste Tropical. De acuerdo a Hidalgo y col. (2020), los impactos asociados de los CTs ocurren mediante dos principales mecanismos de acción:

- **de forma directa:** la trayectoria del CT atraviesa una fracción del territorio. Así, las afectaciones a la población son mayores debido a los fuertes vientos y la lluvia extrema producida por la convección profunda en las zonas cercanas al ojo
- **de manera indirecta:** asociado a las bandas de precipitación y a la circulación inducida por los vientos del CT sobre el flujo medio. La trayectoria del CT no está atravesando de forma precisa una región, pero induce un flujo que interactúa con las cadenas montañosas y los relieves propios de las costas mexicanas en ambas cuencas. Estas interacciones no producen lluvias extremas, pero si duran un tiempo prolongado y tienen una mayor dispersión (Zhou y col., 2018), causando inundaciones y deslizamientos que son importantes.

La escala Saffir-Simpson (Tabla 1.1) clasifica a los CTs del NA y EP de acuerdo a su intensidad, que depende de la velocidad de los vientos sostenidos a 10 metros de altura desde la superficie (Simpson, 1974). Esta escala estima los posibles daños materiales que se podrían tener ante la presencia de un CT, pero sólo considera los daños causados por las fuertes ráfagas de viento y no por otros peligros hidrometeorológicos, como la precipitación.

La climatología de los CTs en México indica que la mayoría de los CTs que afectan al país son DT, TT y huracanes menores (Cat. 1-2) (Fig. 1.1). Los huracanes de mayor intensidad tienen un porcentaje menor a 10% en ambas cuencas. Otro aspecto importante es la presencia de un mayor porcentaje total de CTs en el EP (61%) con respecto a los del NA (39%).

TABLA 1.1. Clasificación de los vientos de los CTs de acuerdo a la escala Saffir-Simpson. Se anexan dos categorías adicionales cuando el CT aún no alcanza la categoría de huracán (Kelman, 2013)

Categoría	Vientos Sostenidos (kmh^{-1})	Tipos de daño debido a los vientos del CT	
Depresión Tropical (DT)	<63	Daños menores	
Tormenta Tropical (TT)	64-118	Daños moderados	
1	119-153	Vientos muy peligrosos	
2	154-177	Vientos extremadamente peligrosos	
Huracán	3	178-208	Daños devastadores
4	209-251	Daños catastróficos	
5	>252	Daños extraordinarios	

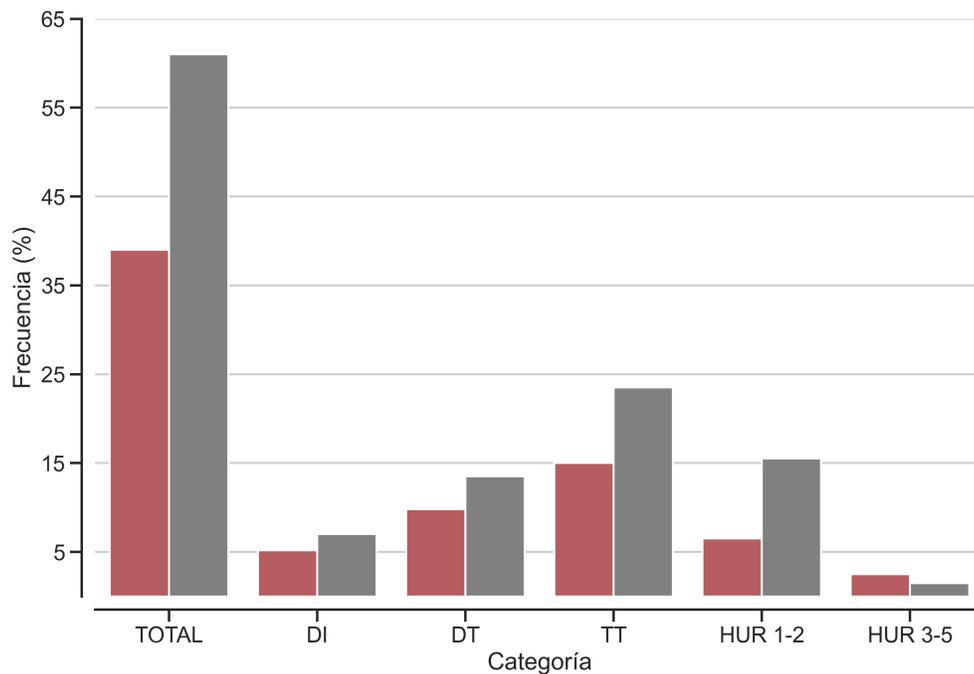


FIGURA 1.1. Porcentaje de los CTs que hicieron landfalling en las costas mexicanas. Los CTs del Atlántico Norte (NA) están en barras rojas y los del Pacífico Noreste (EP) en barras grises. Disturbio está representado por DI (Sistema en degradación), Depresión Tropical por DT, Tormenta Tropical por TT, Huracán de intensidad menor por HUR 1-2 y Huracán de intensidad mayor por HUR 3-5 durante el periodo 2000-2020.

Varios estudios han demostrado que la intensidad y clasificación de los CTs no está directamente relacionada con la cantidad y distribución de la precipitación que pueden producir (Breña-Naranjo y col., 2015; Dominguez & Magaña, 2018). Por ejemplo, la TT Cristóbal, ocurrida del 30 de mayo al 09 de junio del 2020, nunca alcanzó la categoría de huracán y produjo grandes cantidades de precipitación en

diversas regiones del sureste mexicano. Su trayectoria, así como la dispersión de sus bandas nubosas, causaron inundaciones severas en regiones alejadas del centro del CT y tuvo un gran impacto económico sobre las comunidades vulnerables, e incluso se registraron 3 muertos en la región del sureste mexicano (Berg, 2021). Por lo que, la precipitación asociada al CT también es importante. No se debe subestimar a un CT porque sea un DT o una TT.

1.2. Sistema de Alerta Temprana para CTs (SIAT-CT) en México

Los desastres históricos asociados al paso de CTs en México es la principal motivación para elaborar planes de acción y mejorar la gestión integral de riesgos. En el año 2000, se propone la creación de un Sistema de Alerta Temprana de Ciclones Tropicales (SIAT-CT) como una herramienta de coordinación entre la población y Protección Civil.

El SIAT-CT en México diseñado por las autoridades del Sistema Nacional de Protección Civil tiene como principal objetivo reducir los impactos de los CTs en el territorio mexicano, mediante la emisión de alertas (Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana, 2019). Las alertas son clasificadas en colores de acuerdo al nivel de riesgo en la que se encuentre cierto asentamiento, variando desde la alerta azul (menor peligro) hasta la alerta roja (mayor peligro) (Tabla 1.2).

La determinación de estos alertamientos se realiza a través de cuatro parámetros:

1. El tamaño del CT en función del R34 (63 km h^{-1}).
2. Clasificación del CT a través de la escala Saffir-Simpson.
3. Posición del CT (fase de acercamiento/alejamiento a un sitio).
4. Velocidad de traslación (desplazamiento) del CT.

TABLA 1.2. *Escala de colores de las alertas dependiendo del nivel de peligro estimado para los CTs. El SIAT-CT se compone de dos tablas de alertamiento, dependiendo si el CT se encuentra en fase de acercamiento a un área afectable (parte delantera del ciclón), o si se encuentra alejándose (parte trasera del ciclón).*

FASE	NIVEL DE PELIGRO	TIPO DE ALERTA DURANTE EL	
		ACERCAMIENTO	ALEJAMIENTO
Azul	Mínimo	Aviso (c/24 h)	Aviso (c/24 h)
Verde	Bajo	Prevención (c/12 h)	Prevención (c/12 h)
Amarillo	Moderado	Preparación (c/ 6 h)	Preparación (c/ 6 h)
Naranja	Alto	Alarma (c/ 3 h)	Alarma (c/ 3 h)
Rojo	Máximo	Afectación (c/ 3 h)	Afectación (c/ 3 h)

Los parámetros anteriores buscan en conjunto determinar cuantitativamente las alertas con información relativa a la distancia y al tiempo estimado de llegada a las costas o al área de afectación. La medida del R34 de los cuatro cuadrantes (noreste, noroeste, sureste, suroeste), que se utilizan en los alertamientos, son reportados por el NHC (Landsea & Franklin, 2013).

El SIAT-CT considera la extensión del CT en superficie, ya que emplea un promedio de la escala Saffir-Simpson (I) y de la Circulación del campo de vientos (C). La estimación de la peligrosidad (e) se realiza con los cálculos de la expresión (1.1):

$$e = \frac{(I + C)}{2}, \quad (1.1)$$

Sin embargo, esta escala tiene ciertas consideraciones especiales para algunos casos en los que los CTs no tengan intensidad o campo de vientos (Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana, 2019):

1. Para la escala Saffir-Simpson (I), se usa el número de su categoría como huracán. Si el CT no alcanza dicha categoría, el valor de I será igual a cero.
2. El valor de C se obtiene promediando el valor del R34 (expresado en millas náuticas) en los cuadrantes que tengan la información disponible. Este valor se multiplica por 0.0377 y se toma el valor entero de la multiplicación (sin decimales). Cabe resaltar que el valor máximo de C debe ser 5. Aun cuando C pueda rebasar este valor, tomará el valor inmediato anterior si se encuentra en fase de debilitamiento. Será cero cuando se trate de una DT.

El SIAT-CT tiene ciertas limitaciones, por ejemplo: la omisión de las lluvias intensas como parte de la definición de peligrosidad, los CTs que tengan una categoría de DT no presentarán un alertamiento adecuado. Un ejemplo real de esta limitación en el SIAT-CT es la TT Cristóbal (2020). Cuando su posición se encontraba alejada de la región del sureste, se emitió una alerta de peligro bajo durante todo el día (Fig. 1.2), aunque las precipitaciones extremas ya estaban presentes en la zona (1.3).

Las regiones que no se encuentran cercanas al centro de Cristóbal definido por el NHC (e.g. el noroeste de Yucatán y Quintana Roo) reportaron más de 40 mm acumulados durante el día y los alertamientos emitidos en Yucatán y Quintana Roo fueron de color verde (peligro bajo). Esta gran cantidad de precipitaciones recibidas en un día estuvo asociada a grandes desastres en estas regiones.

Dominguez y col. (2019) realizó un análisis de casos de estudio y demostró que no existe una relación entre los parámetros del SIAT-CT y la precipitación producida por los huracanes Ingrid 2013, Manuel 2013, Odile 2014 y Patricia 2015.

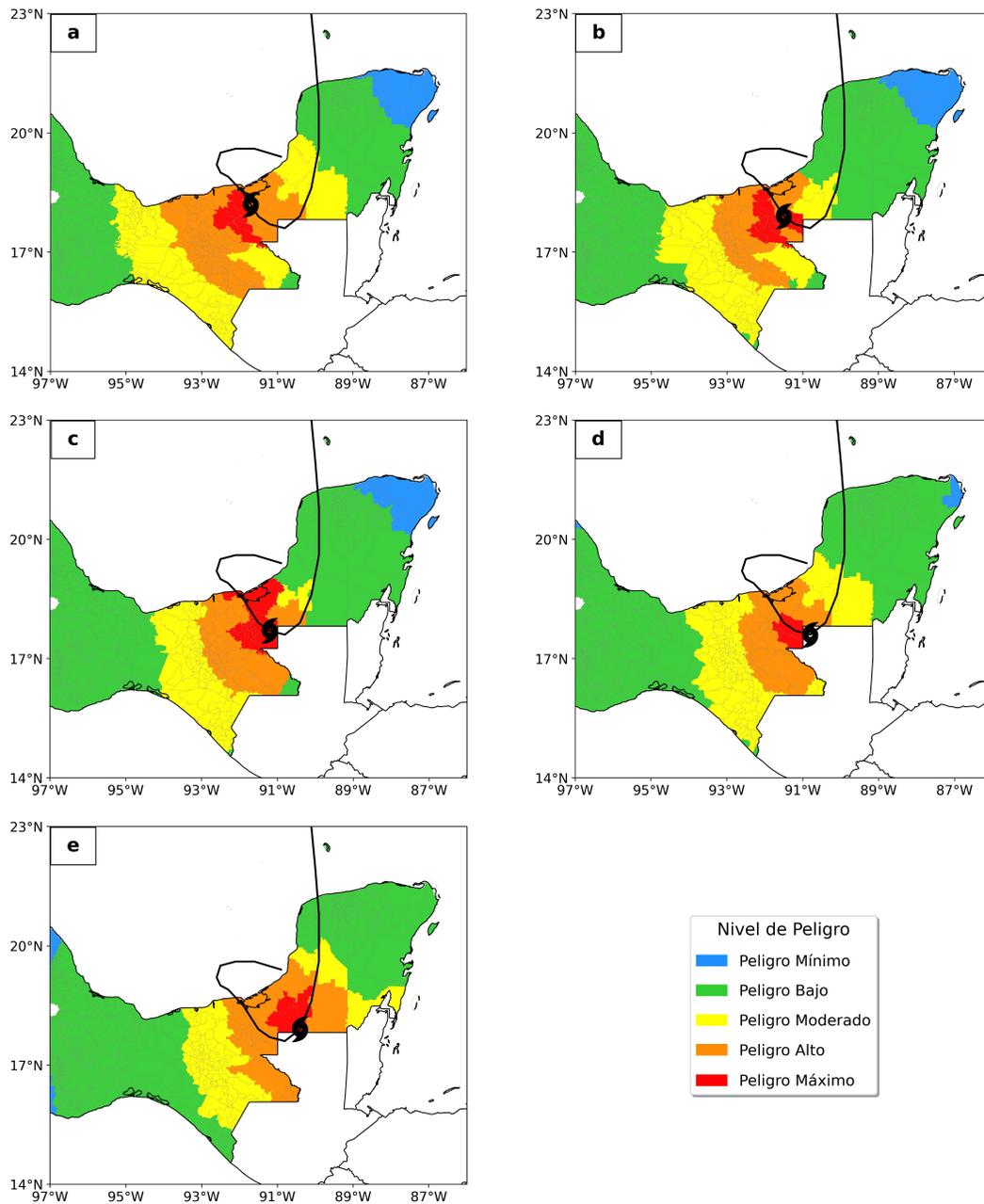


FIGURA 1.2. Representación del nivel de alerta del SIAT-CT para la TT Cristóbal el 4 de junio del 2020 en sus posiciones reportadas durante las 00:00 UTC(a), 06:00 UTC(b), 12:00 UTC(c), 18:00 UTC(d) y las 00:00 UTC(e) del 5 de junio. Los colores representan las acciones a realizar por parte de las autoridades y población (Tabla 1.2). Las posiciones están representadas por un icono característico de un CT, mientras que la trayectoria del CT por una línea negra.

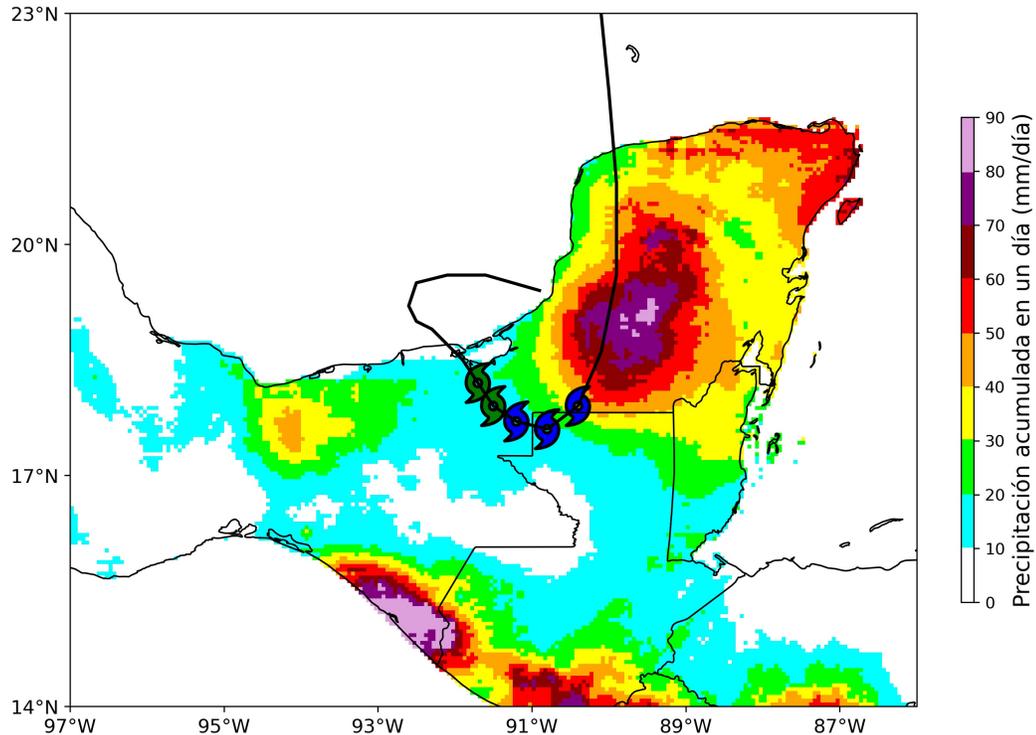


FIGURA 1.3. *Valores de precipitación reportadas por CHIRPS el día 4 de junio del 2020 en el sureste de México. Las posiciones de la TT Cristóbal de las 00:00 UTC del 4 de junio al 00:00 UTC del 5 de junio del 2020 se muestran en verde (Tormenta Tropical) y azul (Depresión Tropical). Las mayores tasas de precipitación acumulada diaria se observaron en el sureste de Chiapas, el centro de la península de Yucatán, oeste de Campeche y norte de Quintana Roo.*

El uso exclusivo del R34 como definición del tamaño del CT y, por lo tanto, de la peligrosidad, limita en gran manera los alertamientos del SIAT-CT (1.2, 1.3). Si bien los vientos de tormenta (Gale force winds) se asocian con daños importantes, estos suelen ubicarse muy cerca de las paredes del ojo del CT. Las dimensiones de este radio para cada cuadrante no consideran de forma adecuada la circulación completa (interna y externa) del CT. Además, la precipitación asociada a las bandas alejadas del ojo no es tomada en cuenta por el R34 (C. J. Matyas, 2010; Perez-Estrada, 2020). Así, la lluvia que está alejada del ojo del CT no forma parte de la peligrosidad definida por el SIAT-CT.

Touma y col. (2019) encuentran que los CTs alcanzan su máxima precipitación después de alcanzar su máxima intensidad y disiparse en una TT. Es importante considerar que los tiempos de respuesta para evitar catástrofes son esenciales. Por ello, los alertamientos tempranos de CTs deben tener una adecuada definición de peligrosidad que combine varias características, entre ellas el tamaño del CT.

El objetivo principal de un SIAT es salvaguardar la vida humana (CENAPRED, 2019), pero con una definición limitada de la peligrosidad de CTs, los alertamien-

tos podrían fallar, ocasionando la existencia de decesos. Por ejemplo, 12 personas fallecieron por el paso del huracán Alex en 2010 en el norte de México (Pasch, 2010).

Cabe mencionar que, los impactos asociados a los CTs también dependen de la exposición y la vulnerabilidad social de la población. En México, las localidades con una densidad de población alta, un alto grado de marginación local y una brecha social considerable suelen tener índices de vulnerabilidad social altos y afectaciones importantes ante la presencia de riesgos hidrometeorológicos (Dominguez y col., 2021). Por ello, el SIAT-CT debe tener una adecuada definición de la peligrosidad de un CT. Debe incorporarse la precipitación extrema en su ecuación y mejorar la definición del tamaño del CT, que considere la extensión de sus bandas nubosas.

1.3. Definiciones del tamaño de los CTs

Los CTs tienen una variabilidad en su tamaño con respecto a su intensidad; es decir, pueden mostrar una intensidad similar en sus vientos máximos en superficie, pero la extensión máxima de su campo de vientos puede variar (Carrasco y col., 2014). El tamaño del CT es una de las características más complicadas de definir. Desde hace muchos años, el tamaño del CT se define como la extensión de la circulación del CT a través de la velocidad de sus vientos o de la distancia a la isobara cerrada más alejada del centro (ROCI, por sus siglas en inglés) (Merrill, 1984). El empleo de ambas medidas suele ser subjetiva porque es dependiente de la información disponible que ha variado a lo largo de los años (Knaff y col., 2014).

A pesar de ello, diversos estudios se centran en la primera técnica para definir el tamaño del CT. Las diferentes técnicas se clasifican en dos grupos: 1) el tamaño de la circulación interna, que incluye la velocidad de los vientos de magnitudes mayores y estructuras importantes, como el ojo; 2) el tamaño de la circulación externa, que incluye una región interna convectiva pequeña, que depende de su intensidad, y una región externa mayor no convectiva, que no depende de la intensidad (Chavas y col., 2016; Schenkel y col., 2018).

Diversos trabajos implementan el R34 como el tamaño del CT. Esta determinación del tamaño del CT, usando el R34, ha mejorado gracias a la implementación del uso de imágenes satelitales de dispersión e infrarrojas, que hacen esta definición más objetiva (Chan & Chan, 2015; Lu y col., 2017; Mok y col., 2018).

Chan y Chan (2015) redefinieron el tamaño del CT como el radio promedio azimutal de 17 ms^{-1} (conocido como R_{17}) de los vientos en la superficie del océano, usando información a partir de los datos del dispersómetro rápido QuikSCAT. Mok y col. (2018) extendieron el período de estudio a 31 años de información, usando el reanálisis del Sistema de Previsión Climática del NCEP, para poder estudiar la relación del tamaño con el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés).

Por otro lado, Lu y col. (2017) desarrollaron una metodología con imágenes del HURSAT-B1 (Hurricane Satellite Data, NOAA) y compararon sus resultados con el

valor del R_{17} para los CTs de la cuenca del Océano Pacífico del Noroeste. A partir de este estudio, se resalta la importancia de determinar un modelo de regresión múltiple para la definición del tamaño del CT, que use la temperatura de brillo del tope de nube de los CTs como una variable principal. Otra técnica para definir el tamaño de la circulación interna del CT es usar la base de datos QuikSCAT para determinar el radio de los vientos a 15 m s⁻¹ (conocido como R_{15}) (Lee y col., 2010) o de 12 ms⁻¹ (conocido como R_{12}) (Chavas & Emanuel, 2010).

Knaff y col. (2014) utilizaron una definición del tamaño de la circulación externa y desarrollaron una metodología que define el tamaño del radio como el viento tangencial medio al nivel de 850 hPa y cuyo valor es de 5 nudos (conocido como R5). En este estudio, se usaron las imágenes satelitales de temperatura de brillo de tope de nube de los CTs. Los resultados se presentan como una climatología para diversas cuencas ciclogénicas durante un periodo de 30 años. El valor de 5 nudos es usado como un umbral en el que la velocidad de los vientos del CT ya no se distingue de los vientos del ambiente.

Por otra parte, Chavas y col. (2016), a través de la estimación del radio de 12 ms⁻¹, calculan un modelo de estructura del viento exterior, incorporando estimaciones de sus parámetros de entrada (*i.e.* el modelo de estructura del viento exterior y el radio medio azimutal definido la velocidad del viento QuikSCAT) para calcular r_0 . Este radio estimado propone una estructura radial del campo del viento exterior en la naturaleza, diferenciando la circulación del CT del ambiente. Interesantemente, Schenkel y col. (2018) define el radio usando 8 ms⁻¹ (R_8) empleando los datos del Reanálisis del Sistema de Previsión Climática (CFSR, por sus siglas en inglés) del NCEP.

En general, estas técnicas comparten la velocidad del viento como parámetro esencial en la determinación del radio. A pesar de que los estudios anteriormente mencionados difieren en la metodología y las magnitudes de los vientos, los resultados son similares por cuenca: los CTs del Pacífico Occidental son los más grandes en comparación, existen transiciones abruptas de tamaño en la cuenca del NA y los CTs del EP y el Océano Índico son más pequeños que los observados en otras cuencas.

Otras definiciones del tamaño incluyen a la precipitación como parámetro (Lin y col., 2015; Touma y col., 2019; Zhou & Matyas, 2021), pero su único objetivo es determinar las condiciones ambientales que ayudan (inhiben) la cantidad y distribución de la precipitación de un CT; es decir, su definición está más centrada en el tamaño del área de precipitación y no en la circulación del CT.

Por ejemplo, Lin y col. (2015) utilizaron información de la precipitación de la Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM, por sus siglas en inglés) y definen el tamaño de la tormenta con un margen de 0.5 mm. Lo anterior señala que existe una necesidad de definir mejor el tamaño del CT (incluyendo tanto el viento, como la precipitación) e incorporar la interacción de su circulación con las condiciones ambientales. Con la finalidad de incorporar esta técnica en las métricas de peligrosidad para México.

1.4. Características del tamaño y su relación con la lluvia

La precipitación producida por CTs se ha estudiado por los impactos que tiene en la población, tanto en su distribución como en su pronóstico (Brackins & Kalyanapu, 2020; Dominguez & Magaña, 2018; Feldmann y col., 2019).

La climatología de la precipitación producida por CTs en todas las cuencas ciclónicas demuestra que existe cierta variabilidad tanto en la cantidad como en la intensidad de la precipitación. Los CTs del NA y del Pacífico Occidental se caracterizan por producir una mayor cantidad de precipitación; mientras que los CTs del EP producen tasas menores de precipitación (Lavender & McBride, 2021). Este comportamiento se compara con los resultados obtenidos por la climatología de tamaños de los CTs, denotando una relación importante entre el tamaño del CT y la precipitación.

La distribución de la precipitación dentro de un CT se simplifica en función de dos regiones principales (Lin y col., 2015): la precipitación producida por la región convectiva profunda del centro y la precipitación producida por las bandas nubosas, que están alejadas del centro y están fortalecidas por un mecanismo de retroalimentación de la interacción de la humedad con las corrientes de aire (Y. Sun y col., 2017). Las bandas nubosas producen precipitaciones con intensidades diferentes a las ubicadas en el centro. Sin embargo, tienen efectos destructivos, que pueden variar regionalmente.

La región central del CT tiende a ser simétrica y circular. Sin embargo, las interacciones con el ambiente hacen que las bandas nubosas, ubicadas en las regiones externas al centro del CT, modifiquen su simetría y su cantidad de precipitación. Por ello, las definiciones de tamaños del CT que sólo consideran la circulación interna del CT subestiman su tamaño real y su precipitación total (C. J. Matyas, 2010).

Zick y Matyas (2016) presentan una metodología para medir conjuntamente la forma del tamaño, la circulación del CT y su convección asociada. A pesar de estar centrada en la transición de CTs a ciclones extratropicales, esta metodología se puede aplicar al momento de disipación o en CTs de menor intensidad. En CTs intensos, la precipitación del CT es muy simétrica y está organizada centralmente. Cuando se disipa, sus cualidades centrales y simétricas se pierden: asimetría, fragmentación y dispersión (Fig. 1.4).

Estos factores son importantes para comprender cómo se distribuyen las áreas de precipitación dentro del tamaño del CT. Las áreas de precipitación dentro del CT pueden variar según las condiciones ambientales y los atributos de la tormenta. Por ejemplo, la presencia de una cizalladura alta, humedad en el ambiente y una gran vorticidad potencial en el sistema pueden alterar la compactación de las bandas nubosas y por ende, las áreas de precipitación (Hill & Lackmann, 2009; C. Matyas & Tang, 2019).

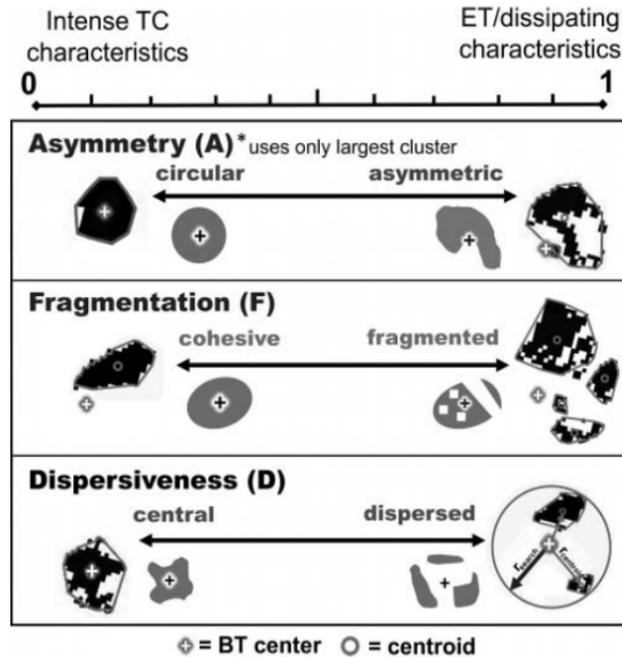


FIGURA 1.4. Representación de los parámetros de compactación del tamaño de un CT en proceso de evolución a ciclón extratropical (ET) o debilitamiento. Tomado de Zick y Matyas (2016)

1.5. Relación del tamaño de los CTs con las variables medioambientales

La formación, desarrollo y disipación de un CT se encuentra fuertemente relacionado con las condiciones ambientales existentes. Estas condiciones se consideran favorables cuando la temperatura superficial del océano es cálida (27°C), existe humedad en la atmósfera, una baja cizalladura e inestabilidad atmosférica (Perez-Estrada, 2020).

La modificación de estas condiciones y sus interacciones con otras variables han sido estudiadas por diversos trabajos con la finalidad de entender su papel tanto en la precipitación, como en el tamaño de los CTs. Hill y Lackmann (2009) describen que los CTs tienden a ser más grandes cuando interactúan con entornos que son húmedos en la tropósfera media, debido a un aumento en la actividad de las bandas espirales y la generación de la vorticidad potencial adiabática, la cual actúa lateralmente expandiendo el campo de los vientos.

Por otro lado, la importancia del océano cálido es esencial no sólo para el tiempo de vida, sino también para la expansión del CT. El aumento del tamaño del CT en respuesta al calentamiento oceánico se atribuye posiblemente al aumento de la inestabilidad atmosférica en la región exterior del CT, que está a un nivel por debajo de la tropósfera media. Lo anterior facilita el desarrollo local del movimiento ascendente, la convergencia a bajo nivel y la aceleración de los vientos tangenciales (Y. Sun

y col., 2017). El incremento de la temperatura de la superficie del mar (SSTs, por sus siglas en inglés) también está ligado al crecimiento de las áreas de precipitación, debido al aumento de la evaporación del agua proveniente del océano (Lin y col., 2015).

La cizalladura juega un doble papel en la vida del CT. Por un lado, es importante para la intensificación del CT, porque al intensificar los vientos del CT aumenta el tamaño interno del CT y por lo tanto, la convección cercana al centro del CT (Na y col., 2018). Sin embargo, una cizalladura muy alta impedirá que el CT se intensifique y que sus bandas nubosas se organicen.

Estudios previos muestran que existe una relación entre las variables ambientales (*e.g.* viento máximo en superficie, la velocidad de traslación del CT y la velocidad vertical del viento) y la distribución de tamaño del CT (Perez-Estrada, 2020; Quiring y col., 2011).

1.6. Planteamiento del problema

El SIAT-CT fue diseñado para gestionar los riesgos asociados al impacto de los ciclones tropicales en México. Sin embargo, este sistema ignora la precipitación asociada al CT como parte de la peligrosidad (Dominguez y col., 2019). Diferentes ejemplos de CTs que hicieron *landfalling* en el país han demostrado que su mayor impacto es debido a la precipitación que dejaron sobre el territorio (Zhou & Matyas, 2018).

Por ejemplo, los huracanes Alex (2010), Patricia (2015), y la tormenta tropical Cristóbal (2020) muestran la importancia de considerar su precipitación en el SIAT-CT. Los daños directos reportados por estos fenómenos están asociados, en su mayoría, a las grandes acumulaciones de precipitación que produjeron inundaciones catastróficas. Sin embargo, no ha sido explorado si existe una relación del tamaño del CT con la precipitación extrema que producen en México y si una nueva definición del tamaño podría mejorar el alertamiento de los ciclones tropicales.

Por lo tanto, surge la pregunta de si el tamaño de los CTs será determinante en la precipitación extrema que producen. El tamaño debe definirse como aquel que comprenda las áreas de lluvia y no sólo los campos de vientos reportados por el NHC. La precipitación debe considerarse tanto en las regiones continentales, como en las oceánicas, con la finalidad de tener un mejor entendimiento del comportamiento de las bandas nubosas del CT.

México necesita cambiar la escala de peligrosidad que usa el SIAT-CT por una que incluya el tamaño del ciclón tropical y su lluvia asociada, como parámetros determinantes del peligro. Para ello, se requiere construir una nueva metodología que logre determinar el tamaño del CT en función de las bandas nubosas y los vientos máximos sostenidos. Esto con la finalidad de incluir ambos parámetros en la definición de peligrosidad (ec. 1.1) del SIAT-CT.

1.7. Justificación

Los estudios de CTs en México son limitados, aunque el país es impactado por la actividad ciclónica tropical cada año. Por ello, es necesario mejorar su definición de peligrosidad en el SIAT, con la finalidad de mejorar la gestión integral de riesgo. La definición del tamaño de los ciclones tropicales que ha usado el SIAT-CT es el promedio del R34 reportado por el NHC. No obstante, se ha probado que el SIAT-CT no ha funcionado adecuadamente, ya que muestra deficiencias en cuanto a la definición de la peligrosidad (Dominguez y col., 2019; Perez-Estrada, 2020). Por ello, es necesario contar con una metodología diseñada para México que defina el tamaño de los ciclones tropicales tanto en los Mares Intramericanos, como en el EP. La implementación de imágenes satelitales que puedan describir la extensión de las bandas nubosas y su precipitación asociada ayudará a mejorar el SIAT-CT y consecuentemente, los alertamientos que se emitan para las poblaciones en riesgo serán mejores.

Además, una de las metas de la actual administración gubernamental es transitar de las políticas reactivas (acciones que se ejecutan una vez que el fenómeno hidrometeorológico afectó al país), a las de prevención (acciones que se ejecutan con un tiempo de anticipación al impacto del fenómeno hidrometeorológico). Por lo que, se necesita una mejora en el SIAT-CT para innovar en la prevención del desastre.

Este trabajo tiene un impacto social, ya que el conocimiento generado podría favorecer a crear una práctica adecuada de la gestión integral de riesgos ante desastres por parte de las entidades gubernamentales. Por ejemplo, los resultados podrían ser de gran interés para los organismos gubernamentales, como CONAGUA, CENAPRED, PC (Protección Civil), y el sector privado. PC podría incorporar el conocimiento científico generado en sus mecanismos de la gestión integral de riesgos.

1.8. Hipótesis

1. El tamaño de los CTs está relacionado con la precipitación que producen. Este tamaño dependerá de la extensión de las bandas nubosas y consecuentemente, estas bandas definirán la cantidad de lluvia que produce un CT.
2. Esta nueva definición del tamaño del CT mejorará la definición de peligrosidad usada en el SIAT-CT.

1.9. Objetivos

1.9.1. Objetivo General

Definir el tamaño de los ciclones tropicales que afectaron a México usando imágenes satelitales infrarrojas, así como analizar las relaciones estadísticas del tamaño con las variables medioambientales durante el periodo 2000-2020.

1.9.2. Objetivos Específicos

Lo anterior llevó a:

1. Analizar las imágenes satelitales infrarrojas durante el periodo 2000-2020.
2. Encontrar una relación del tamaño calculado de los CTs con su precipitación producida.
3. Calcular relaciones estadísticas entre el tamaño, la precipitación y las variables medioambientales (humedad específica y humedad relativa a 600 hPa, vorticalidad y divergencia a 200 hPa, velocidad vertical a 500 hPa, cizalladura del viento y el contenido total de agua precipitable).
4. Analizar la forma de los CTs a través de los parámetros de tamaño (asimetría, dispersión y fragmentación).

1.10. Estructura de la tesis

La presente tesis se compone de cuatro capítulos:

En el primer capítulo, se presenta una introducción sobre el tamaño de los CTs, el SIAT-CT de México y la motivación para mejorar los alertamientos tempranos en el país. Se menciona la importancia de la precipitación producida por los CTs y sus impactos, así como las diferentes definiciones del tamaño del CT que existen. Además, se propone el uso de las imágenes satelitales como una herramienta para definir las bandas nubosas de los CTs.

En el segundo capítulo, se describen las bases de datos de imágenes satelitales, los CTs analizados en este estudio y su precipitación asociada. Se muestra la metodología creada para procesar las imágenes satelitales y determinar el tamaño del CT, así como las herramientas estadísticas que se usaron para relacionar el tamaño del CT con la precipitación.

En el tercer capítulo, se muestra una climatología de los tamaños de los CTs durante el periodo de 2000-2020 en la región de estudio. Los resultados también muestran la distribución de los tamaños y su relación con la precipitación a través de tres métricas. Se muestran relaciones estadísticas de los factores medioambientales con la precipitación del CT que se encuentra dentro del tamaño calculado. Por último, se incluye el análisis de la forma del CT usando tres métricas (asimetría, dispersión y fragmentación).

Por último, en el cuarto capítulo se presentan las conclusiones de los resultados obtenidos. Se discute el uso potencial de la nueva definición del tamaño del CT en el SIAT-CT y sus beneficios. El trabajo a futuro abre la discusión para que las siguientes investigaciones consideren esta nueva definición en la gestión integral del riesgo del país e incluso en otras regiones.

CAPÍTULO 2

DATOS Y MÉTODOS

2.1. Base de datos HURDAT

La región de estudio considera a México y las regiones de Centroamérica con sus archipiélagos del Caribe. Las coordenadas de esta región son 60°O - 130°O y 5°N - 35°N (Fig. 2.1). Esta región abarca la cuenca ciclogénica del EP y NA. Los datos de los CTs formados en esta región provienen de la base de datos HURDAT2 del NHC de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés). HURDAT2 se encuentra disponible en <https://www.nhc.noaa.gov/data/#hurdat>.

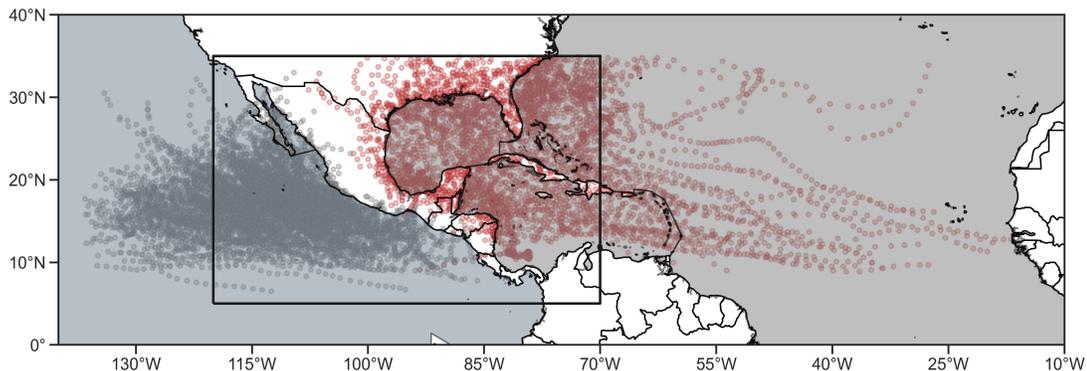


FIGURA 2.1. *La región de estudio se encuentra marcada por un cuadro negro. Las posiciones de cada 6 horas de los CTs en el Océano Atlántico del norte (NA) y en el Océano Pacífico del este (EP) se encuentran en polígonos rojos y grises, respectivamente.*

Los CTs que se forman sobre NA y EP son monitoreados con ayuda de observaciones terrestres, reconocimientos aéreos, registros de barcos, radiosondas, observaciones por satélite y aviones cazahuracanes. Por lo que, existe información cada 6 horas de su posición, velocidad de sus vientos, intensidad de los vientos máximos sostenidos a 10 m (*i.e.* Categoría de escala Saffir-Simpson) y condiciones ambientales, como la presión mínima en su centro (Landsea & Franklin, 2013). El HURDAT 2 cuenta con registros de los CTs en la cuenca NA desde 1851, y en la cuenca EP

desde 1949 hasta la actualidad. También, esta base de datos tiene registros post-tormenta que incluye los radios de alcance de vientos (e.g. R34, R50, R64) y el radio de la isobara cerrada más lejana del centro (ROCI). Además, es posible encontrar reportes de depresiones tropicales que no hayan evolucionado a una categoría mayor a partir de 1967 (Landsea & Franklin, 2013).

Los CTs que fueron analizados en este estudio deben haber ocurrido desde el 2000 hasta el 2020 en ambas cuencas y sus trayectorias deben reportar por lo menos dos puntos dentro del área de estudio (Fig. 2.1). Se analizaron un total de 191 CTs dentro de la cuenca NA, principalmente los CTs que se ubicaron en las subcuencas del Golfo de México y el Mar Caribe. En el EP, se analizaron un total de 336 CTs.

2.2. Base de datos GPM

La Misión Global de Medición de Precipitación (GPM, por sus siglas en inglés) es sucesora de la base de datos TRMM. La GPM es una red internacional de satélites, cuyo objetivo es proporcionar la próxima generación de observaciones globales de lluvia y nieve (Skofronick-Jackson, 2020). Sus productos operativos de precipitación por satélite son cuasi-globales (60°N - 60°S) y están basados en estimaciones combinadas de microondas pasivas (PMW), infrarrojas (IR) calibradas por PMW y fusionadas (PMW con IR) a diferentes resoluciones espaciales y temporales (Funk y col., 2015). Los productos utilizados en este trabajo se describen a continuación.

2.2.1. Temperatura de Brillo: NCEP/CPC L3 Half Hourly 4km Global Merged

Las imágenes de satélite analizadas se encuentran en el canal infrarrojo (IR), representando la temperatura de brillo de tope de nube (T_b). Se utilizaron los datos cuya resolución espacial es 4 km y que están combinados con los datos del Centro de Predicción del Clima (CPC) de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP, por sus siglas en inglés) de la NOAA. Por ello, su nombre corto es GPM_MERGIR (J. Janowiak y col., 2017). Se emplearon imágenes fusionadas de los satélites geoestacionarios como el Geosynchronous Operational Environmental Satellites (GOES); el Geosynchronous Meteorological Satellite (GMS), el Multifunctional Transport Satellite (MTSat) y Himawari, Japón; y el Meteorological Satellite (Meteosat), Comunidad Europea (Corcos y col., 2021; J. E. Janowiak y col., 2001).

Las imágenes IR son procesadas en el CPC. Tienen una corrección del ángulo cenital de las geo-IR globales, se reajusta la paralaje y se fusionan en una malla global. En el caso de que haya datos duplicados en un punto de malla, se toma el valor con el ángulo cenital más pequeño. La disponibilidad de los datos es desde finales de 1999 hasta la actualidad a una resolución temporal de 30 min (J. Janowiak y col., 2017). Estos datos satelitales han sido empleados para el estudio de diversos sistemas atmosféricos como: cúmulos de convección profunda, sistemas convectivos

de mesoescala (Corcos y col., 2021; Feng y col., 2021; Li y col., 2021) y CTs (McNeely y col., 2021; Nguyen y col., 2019). Así, se procesaron los datos de GPM_MERGIR disponibles cada hora en https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM_MERGIR_1/summary

2.2.2. Precipitación: GPM_IMERG

El GPM desarrolló el algoritmo IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals) para calibrar e incorporar los datos del TRMM a su base de datos (Cassidy, 2020). El IMERG utiliza los sensores del Observatorio Central GPM como estándar de referencia para calibrar los sensores de los satélites asociados en la constelación GPM, con un único marco de recuperación para estimar la precipitación observada. Luego los fusiona en una malla, mediante técnicas avanzadas de interpolación para proporcionar una cobertura global (Tan y col., 2019). Las estimaciones de precipitación en IMERG provienen de sensores PMW que utilizan el algoritmo Goddard Profiling (Tan y col., 2019). Se aplica un esquema de interpolación cuasi-lagrangiano a las estimaciones de precipitación de PMW puestas en una malla para rellenar los huecos entre los barridos del PMW (Feng y col., 2021; Tan y col., 2019).

El producto implementado es el Final Precipitation L3 Half Hourly $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ V06B obtenido a través del GES DISC (Huffman y col., 2019). Este producto se usará con la finalidad de complementar la cobertura sobre el océano que el producto de CHIRPS no reporta.

2.3. Base de datos de reanálisis ERA 5

Los reanálisis son el resultado de combinar modelos numéricos de última generación con datos registrados en el pasado, con la finalidad de producir una base de datos que esté puesta en malla y que sea consistente durante largos periodos de tiempo (Ramon y col., 2019). El Centro Europeo para Pronósticos Meteorológicos de Mediano plazo (ECMWF, por sus siglas en inglés) desarrolló el producto ERA-5; que es la quinta generación de reanálisis atmosférico global.

La asimilación de datos del ERA5 usa la última versión del Sistema Integrado de Pronóstico (IFS, por sus siglas en inglés) y una moderna técnica de parametrización que permite considerar imágenes satelitales, mediciones de aeronaves, datos de ozono y presión superficial (Hoffmann y col., 2019).

Actualmente, el ERA5 se encuentra disponible desde 1950 hasta la actualidad. Este reanálisis presenta una resolución espacial de 31 km globalmente (0.25°) y una resolución temporal de 1 hora en 137 niveles de altura (Hersbach y col., 2020). Además, presenta mejoras en la representación de los fenómenos troposféricos, en la representación de CTs y un mejor equilibrio global de precipitación sobre los trópicos que se encuentran tanto en el océano, como en continente (Hoffmann y col., 2019).

Un amplio número de variables son almacenadas en niveles de presión (*i.e.* campos de viento a 1000 hPa, 850 hPa, 700 hPa, etc.), como en niveles individuales (*i.e.*

TABLA 2.1. *Variables del reanálisis ERA 5 utilizadas en este estudio. Se muestran sus abreviaturas y sus unidades.*

Variable	Abreviatura	Unidades
Velocidad vertical del viento a 500 hPa	<i>VV</i>	$Pa\ s^{-1}$
Humedad específica a 600 hPa	<i>HE</i>	$kg\ kg^{-1}$
Humedad relativa a 600 hPa	<i>HR</i>	%
Vorticidad a 200 hPa	<i>VOR</i>	s^{-1}
Divergencia a 200 hPa	<i>DIV</i>	s^{-1}
Cizalladura del viento (diferencia de la velocidad del viento a 850 - 200 hPa)	<i>CIZ</i>	$m\ s^{-1}$
Contenido total de agua precipitable	<i>AP</i>	$kg\ m^{-2}$

precipitación). Las mejoras en la posición, la intensidad y el tamaño exterior del CT en los reanálisis se deben al aumento de la resolución horizontal de los modelos numéricos y a la aplicación de sistemas optimizados de asimilación (Bian y col., 2021), ya que a una mayor resolución horizontal, el reanálisis ERA5 puede resolver gradientes de presión radial a mayor altura y, por lo tanto, vientos más fuertes del CT. De la misma forma, las variables atmosféricas que interactúan con la circulación del CT están representadas adecuadamente.

Este estudio usó el viento a 10m de la superficie, la presión promedio a nivel del mar, contenido de agua precipitable, divergencia a 200 hPa, la vorticidad a 200 hPa, la humedad específica y relativa a 600 hPa del ERA5 en el algoritmo creado para calcular el tamaño y en el análisis estadístico que determina la influencia de las variables medioambientales en el tamaño del CT (Tabla 2.1).

2.4. Base de datos CHIRPS

Las mediciones *in situ* de la precipitación reportadas por las estaciones meteorológicas son la herramienta más importante para estudiar la relación del tamaño del CT con la cantidad de precipitación sobre la parte continental. Sin embargo, los datos de las estaciones meteorológicas en México son escasos y tienen problemas de funcionamiento (Perez-Estrada, 2020). Por ello, se utilizó el conjunto de datos del grupo de Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS).

CHIRPS se basa en técnicas de interpolación y en estimaciones de precipitación de alta resolución durante un largo período de tiempo. Estas observaciones usan imágenes infrarrojas que registran la duración de las nubes frías e incorpora estimaciones de precipitación diarias, pentadales y mensuales desde 1981 hasta la actualidad (Funk y col., 2015). Su resolución espacial es de $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ y su resolución temporal es diaria. CHIRPS ha probado ser eficiente en las estimaciones de la precipitación, tanto en escala global (Shen y col., 2020), como en regiones pertenecientes a Latinoamérica (Baez-Villanueva y col., 2018). Por lo que, se analizará la precipitación producida por los CTs usando CHIRPS.

2.5. Técnica para definir el tamaño de los CTs

Existen varios métodos para determinar el tamaño de los CTs. El potencial destructivo de un CT no sólo está relacionado con la velocidad máxima de su viento sostenido, sino también con la extensión radial del viento cercano a la superficie, que suele medirse por el tamaño exterior del CT (Dominguez y col., 2019). El tamaño exterior de los CTs no se ha estudiado tan extensamente como la trayectoria y la intensidad, debido a la falta de información y a la dificultad de definir el tamaño (Bian y col., 2021). Diversos autores han definido el tamaño exterior de los CTs basándose en diferentes umbrales de la velocidad de los vientos (*e.g.* R34, R17, R12, R5, RO-CI). Los datos satelitales de viento y TB han permitido mejoras en las definiciones del tamaño. Sin embargo, una limitante importante de estas definiciones es que son calculadas después de la ocurrencia del CT, lo que imposibilita su implementación en los SIATs que necesitan del pronóstico del tamaño del CT.

2.5.1. Técnica para determinar el tamaño de los CTs usando perfiles radiales de viento

Pérez-Alarcón y col. (2021) desarrollaron una base de datos sobre el tamaño de los CTs para cada cuenca ciclogénica del planeta, utilizando los perfiles uniformes del viento descritos por Willoughby y col. (2006). Los resultados de este estudio muestran que, en promedio, los CTs tienen un tamaño de 804.3 km y 726.93 km para la cuenca del NA y EP, respectivamente. Estos datos se encuentran disponibles de forma libre en Mendeley data (Pérez-Alarcón y col., 2022) (<https://doi.org/10.17632/8997R89FBB.1>).

Estos cálculos utilizan la posición del CT obtenida del HURDAT2, la intensidad máxima de los vientos y el radio de los vientos máximos, calculado a través de modelos específicos para cada cuenca o en función de la posición latitudinal del CT (Pérez-Alarcón y col., 2022). Para las cuencas NA y EP, el radio de vientos máximos (r_m) es obtenido con la ecuación (2.1), descrita por Willoughby y col. (2006), donde es la latitud de la posición del CT.

$$r_m = 46.6 \exp(-0.015 V_{max} + 0.0169\phi) \quad (2.1)$$

El perfil de vientos de Willoughby y col. (2006) considera que los CTs son vórtices casi circulares con vientos dañinos concentrados en la pared ocular y alrededor de ella. La posición del centro del CT y su intensidad en términos de viento máximo o presión mínima a nivel del mar proporcionan una caracterización de los CTs. Por lo que, el perfil de vientos propuesto es proporcional a una potencia del radio dentro del ojo y decae exponencialmente afuera del ojo, con una transición suave a través de la pared del ojo. La transición del radio de viento máximo que ocurre desde los perfiles interiores hasta los exteriores es una función de rampa polinómica suave que varía radialmente:

$$V(r) = V_i = V_{max} \left(\frac{r}{R_{max}} \right)^n, \quad (0 \leq r \leq R_1) \quad (2.2)$$

$$V(r) = V_i (1 - \omega) + V_{max} \omega, \quad (R_1 \leq r \leq R_2) \quad (2.3)$$

$$V(r) = V_0 = V_{max} \exp \left(\frac{r - R_{max}}{X_1} \right), \quad (r \geq R_2) \quad (2.4)$$

En este perfil de viento, se tiene que V_i y V_0 son las componentes tangenciales del viento en el ojo y más allá de la zona de transición, que se encuentra entre $r = R_1$ y $r = R_2$; V_{max} y R_{max} son el viento máximo y el radio en el que se produce el viento máximo, respectivamente. X_1 es la longitud de decaimiento exponencial en el vórtice exterior; y n es el exponente de la potencia en el interior del ojo. Tanto V_i como V_0 se definen en la zona de transición y ambos son iguales a V_{max} en $r = R_{max}$.

La función de ponderación ω se expresa en términos de una relación adimensional (ec. 2.5) y finalmente, se expresa en términos de una función polinomial (ec. 2.6).

$$\xi = \frac{r - R_1}{R_2 - R_1} \quad (2.5)$$

$$\omega(\xi) = 12\xi^5 - 420\xi^6 + 540\xi^7 - 315\xi^8 + 70\xi^9 \quad (2.6)$$

Sin embargo, es importante mencionar que los radios de los CTs no tienen una forma simétrica circular en las observaciones satelitales. Por lo que, se realizó una corrección de su extensión para cada cuadrante, considerando las bandas nubosas mediante imágenes IR.

2.5.2. Algoritmo ROCLOUD

El uso de imágenes IR puede ser una buena aproximación para identificar regiones de precipitación asociada al CT (Lin y col., 2015; Lu y col., 2017; Wimmers & Velden, 2007). Las regiones convectivas son regiones que tienen una temperatura más fría que el resto de las regiones en las imágenes IR. No obstante, su detección puede verse afectada por regiones de nubes altas (nubes cirrus).

Lin y col. (2015) desarrollaron un método que tiene en cuenta la persistencia y las asimetrías de la distribución de la precipitación del CT, mediante el procesamiento de imágenes IR que determinan automáticamente los polinomios de precipitación asociada a un CT (regiones convectivas; ROI, por sus siglas en inglés). Se usa un umbral de TB de 219 K (-43°C, que representa las nubes convectivas profundas que producen lluvia intensa). Esta técnica de segmentación se usa con el fin de explorar la precisión en la detección de ROIs asociados a la precipitación de CT. En este trabajo, se usa un umbral de 233 K (-40°C) para explorar el comportamiento de la precipitación $>5 \text{ mm } h^{-1}$ asociada a la circulación del CT.

Aunado al uso de imágenes satelitales, se usó el radio del tamaño exterior del CT calculado por el perfil radial de vientos de Willoughby y col. (2006) (ROUT, por sus siglas en inglés). El algoritmo creado en este estudio, nombrado ROCLOUD, se encuentra en el lenguaje de programación Python y realiza el cálculo del tamaño del CT utilizando los ROIs (definidos por el umbral de -40°C), el tamaño de la circulación del CT definido por el ROUT y la posición del centro del CT definido por HURDAT2. El algoritmo ROCLOUD obtiene 4 radios calculados para cada uno de los cuadrantes del CT (*i.e.* noreste, noroeste, suroeste y sureste). Se descarta el cálculo del tamaño de los CTs cuyas latitudes excedan valores de 35°N , con la finalidad de descartar transiciones a ciclones extratropicales.

Los pasos del algoritmo (Fig. 2.2) son:

1. Se segmentan las imágenes IR en función de la TB (umbral de temperatura $\leq 233.1499\text{ K}$; -40°C). El objetivo de esta técnica es resaltar las regiones que tienen características similares. Esta técnica enfoca la segmentación como un problema de clasificación de píxeles o grupos de píxeles.
 2. Se calculan contornos en la imagen IR para determinar los polígonos ROIs de los cúmulos que representan las áreas con potenciales de precipitación, las cuales deben ser mayor a 800 km^2 .
 3. Se seleccionan aquellos polígonos de cúmulos que se interceptan con el área determinada por ROUT.
 4. Se considera la interacción del CT con la zona de convergencia intertropical (ITCZ, por sus siglas en inglés), mediante los siguientes pasos:
 - a) Si la posición del CT se encuentra dentro de la franja de 0°N - 10°N , los cúmulos que sobrepasen los límites del ROUT no se tomarán en cuenta, ya que se asume que pertenecen a la ITCZ.
 - b) Si la posición del CT se encuentra por encima de los 12°N y su circulación toca la franja (0°N - 10°N , característica de la ITCZ), los cúmulos que se encuentren en dicha franja y que excedan el límite de ROUT no se tomarán en cuenta.
 5. Se calcula la distancia desde el centro hasta el punto más lejano perteneciente a los bordes de los cumulos, que están en los bordes definidos por ROUT, para cada cuadrante (*i.e.* noreste, noroeste, suroeste, sureste) (Fig. 2.3). Por lo que, se obtienen cuatro radios. Las medidas se presentan en kilómetros (km).
 6. Se determina el radio promedio de los 4 radios, con la consideración de que si el radio tiene un valor de 0 no se considera dentro del cálculo del promedio.
 7. Adicionalmente con la información de los cuatro radios, los polígonos obtenidos en el paso 4 y sus centroides, se calcula la Dispersión (D), Asimetría (A) y Solidez (S) usando las fórmulas propuestas por Zhou y Matyas (2018) y Zick y Matyas (2016) (ver sección 2.8).
-

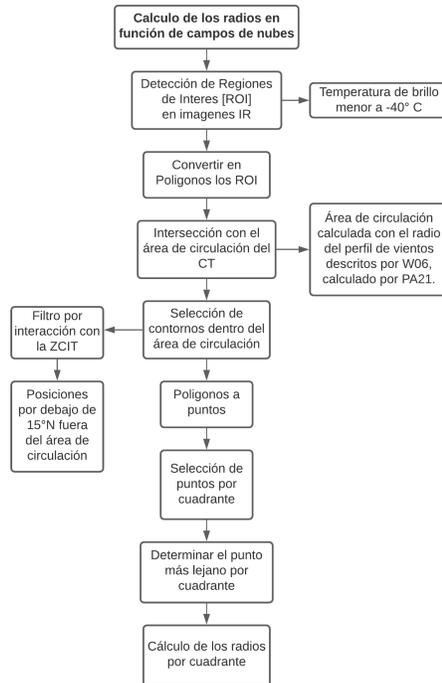


FIGURA 2.2. Diagrama esquemático que muestra los procesos realizados por el algoritmo ROCLLOUD.

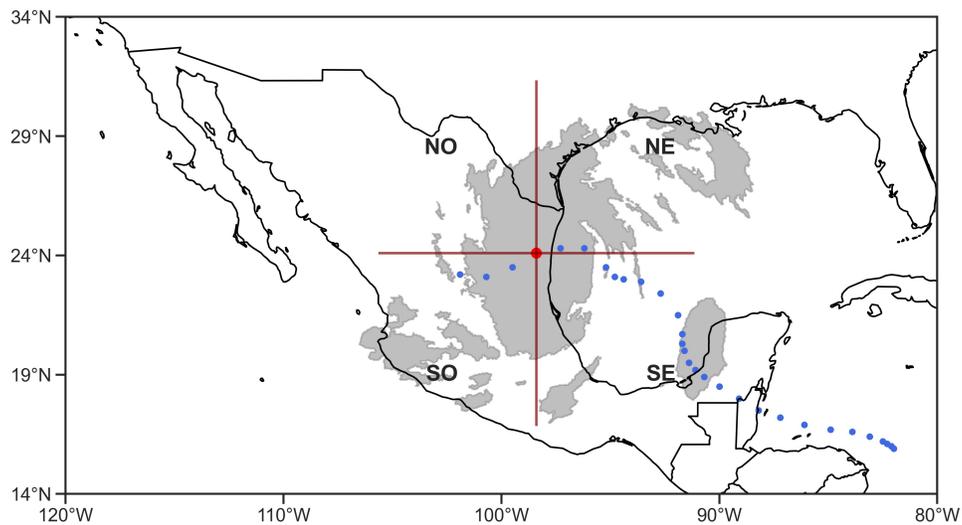


FIGURA 2.3. Extensión del campo de nubes a través de contornos generados con imágenes IR (contornos grises) del huracán Alex 2010, cuyas posiciones están representadas por puntos azules. Las líneas rojas representan la división de cuadrantes considerada para la determinación de los radios del CT. El cuadrante noroeste está representado por NO, el cuadrante noreste por NE, el cuadrante suroeste por SO y el cuadrante sureste por SE.

Los archivos de salida del algoritmo son archivos de texto (*.dat) que corresponden a cada CT de la región de estudio. Estos archivos están nombrados de acuerdo con la clave otorgada por el NHC e incluyen los siguientes datos:

- Fecha (aaaammdd).
- Tiempo (hhmm).
- Longitud (W).
- Latitud (N).
- Velocidad del viento sostenido máxima (V_{max}).
- Radio externo del cuadrante noreste (RNE, en km).
- Radio externo del cuadrante noroeste (RNO, en km).
- Radio externo del cuadrante suroeste (RSO, en km).
- Radio externo del cuadrante sureste (RSE, en km).
- Radio promedio de los cuatro radios anteriormente calculados (R_p , en km).
- Radio externo del cuadrante noreste (RNE, en grados).
- Radio externo del cuadrante noroeste (RNO, en grados).
- Radio externo del cuadrante suroeste (RSO, en grados).
- Radio externo del cuadrante sureste (RSE, en grados).
- Radio promedio de los cuatro radios anteriormente calculados (R_p , en km).
- Valor de asimetría que varía de 0 a 1.
- Valor de dispersión que varía de 0 a 1.
- Valor de solidez que varía de 0 a 1.

Pueden existir datos faltantes debido a fallas en los parámetros de entrada, o debido a que los CTs se encuentran fuera del dominio. Los valores faltantes están representados por el valor indefinido de -9999.00.

2.6. Métodos para relacionar la lluvia con el tamaño del ciclón

Diversos estudios para determinar la precipitación asociada al CT (PCT) utilizan varias técnicas, como: uso de anillos, patrones de PCT y el uso de estaciones meteorológicas. Por ejemplo, Tsuji y Nakajima (2019) relacionan el cambio de los patrones en la PCT con el cambio del tamaño del CT, a través de su campo de vientos en el Océano Pacífico del Noroeste. La técnica utiliza un análisis estadístico de la posición de los patrones de PCT y después, compara las cantidades de precipitación dentro y fuera del radio R15.

Lavender y McBride (2021) exploran el concepto de precipitación acumulada a lo largo de su tiempo de vida, midiendo la PCT total dentro de un círculo definido como el tamaño del CT durante su tiempo de vida. Además, este estudio define el radio de influencia de la PCT usando anillos concéntricos cada 30 km en radios de 100, 200, 350 y 500 km para estudiar los índices de PCT. Como resultado, definen una climatología global de la extensión de la PCT utilizando información del TRMM.

Por su parte, C. J. Matyas (2010) examina las relaciones entre la extensión de los campos de PCT y su tamaño. Este estudio usa correlaciones para medir la variación de la extensión de los patrones de PCT por cuadrantes con diferentes parametrizaciones de los tamaños. De manera similar, Zhou y col. (2018) usaron modelos de ecuaciones de estimación generalizada (GEE) para determinar las relaciones entre el tamaño del PCT y las condiciones ambientales, dependiendo de si su ubicación es sobre tierra u océano. Zhou y Matyas (2021) calculan el área, la dispersión y el desplazamiento del CT para describir los patrones espaciales de PCT, usando un umbral de 2.5 a 5.0 mm h^{-1} .

En este trabajo, se utilizan aproximaciones usadas en los trabajos anteriores para poder definir la PCT. Tres diferentes métodos fueron diseñados para poder aplicar y calcular: tamaños del área de PCT, perfiles radiales de PCT y PCT acumulada. Estos métodos se describen a continuación.

2.6.1. Algoritmo del Radio de las Bandas de Precipitación (RBP)

El primer método consiste en una modificación al algoritmo ROCLOUD, nombrada RBP (Radio de las Bandas de Precipitación). Este método servirá para entender el tamaño del campo de PCT en comparación con el tamaño definido por ROCLOUD (que usa las imágenes IR para determinar la extensión de las bandas nubosas).

Este método fue usado de manera similar por Zhou y Matyas (2021) y C. J. Matyas y VanSchoick (2021), quienes utilizaron imágenes de TRMM, segmentando las imágenes y creando contornos de PCT, usando los siguientes umbrales: 2.5 - 5mm, 3mm y 2mm, por hora, respectivamente. Estos estudios determinan que los umbrales anteriores describen de forma objetiva la PCT en diferentes regiones ciclogénéticas, considerando posiciones sobre océano y sobre regiones continentales, y su interacción con otros fenómenos (Jiang y col., 2008; Zhou & Matyas, 2021).

Hou y col. (2014) demostró que GPM IMERG tiene la mejor detección de precipitaciones ligeras y sólidas en comparación con otros productos satelitales, aunque presenta ciertos errores, como la subestimación de precipitaciones extremas (Da Silva y col., 2021). A pesar de ello, se seleccionó un umbral de 2.5 mm h^{-1} para determinar la PCT, siguiendo el estudio de Zhou y Matyas (2021). El algoritmo RBP usa el área de intersección para los polígonos de PCT determinada en el algoritmo ROCLOUD (Fig. 2.4) y ejecuta la información por cuenca.

El algoritmo RBP también define el valor de los 4 radios por cuadrante, midiendo el punto más alejado del centro del CT. Además, el valor del radio promedio R_p es una media de estos 4 radios medidos en km. Estos resultados del RBP son comparados con los tamaños proporcionados por ROCLOUD, por medio de correlaciones a las que se les aplica la prueba U de Mann-Whitney y la prueba de Kolmogorov-Smirnov con una corrección de Lilliefors. La hipótesis nula es que no hay diferencias entre las extensiones de los tamaños y la hipótesis se rechaza si el valor p de la

prueba de Mann-Whitney es <0.05 . La prueba de Lilliefors se aplica para explorar la normalidad de los tamaños de los CTs por cuenca.

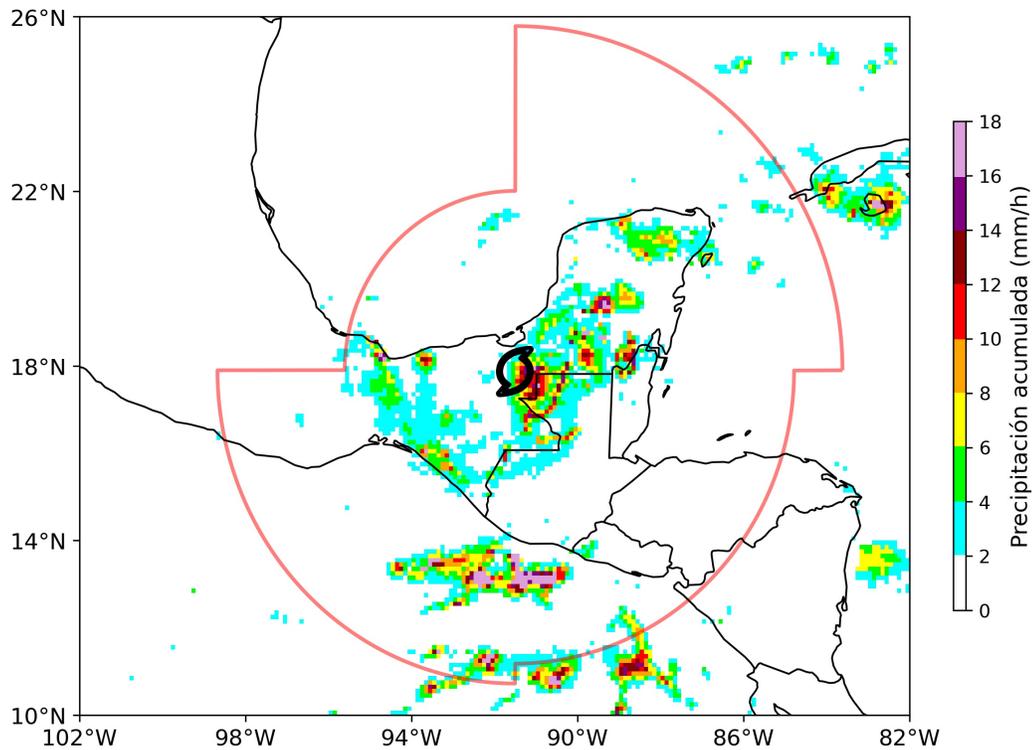


FIGURA 2.4. Valores de precipitación del GPM IMERG para la TT Cristóbal en su posición del 4 de junio del 2020 a las 06:00 UTC (en marcador negro). La línea roja es el área creada por los cuatro radios de ROCCLOUD. Los polígonos que interceptan esta área serán tomados en cuenta por el algoritmo RBP.

2.6.2. Técnica de anillos usando los datos de GPM IMERG

Se usan anillos cada 50 km desde el centro del CT en las imágenes GPM IMERG (Fig. 2.5). Este grosor de los anillos es debido a la resolución de las imágenes. La máxima distancia de los anillos desde el centro es de 2000 km, debido a que el 99% de los valores de los radios definidos por ROCCLOUD se encuentran a esta distancia.

Los anillos consideran un promedio uniforme en un área circular y por ello, se calculan perfiles de precipitación para cada cuadrante. Se seleccionan los píxeles que tengan valores para cada cuadrante determinado por ROCCLOUD. Además de que se utiliza el tamaño previamente calculado (ROCCLOUD) para corroborar que la precipitación corresponde al CT.

Se explora la información promedio por tamaño de la PCT (*i.e.* pequeños, promedio y grandes) y por intensidad (*i.e.* DT, TT, HUR 1-2, HUR 3-5). Esta metodología se ejecuta por cuenca. Además, se calcula el acumulado de la PCT por área, usando

la información de IMERG. Estos procedimientos tienen su fundamento en el método LAR (precipitación acumulada durante toda la vida, por sus siglas en inglés) descrito por Lavender y McBride (2021).

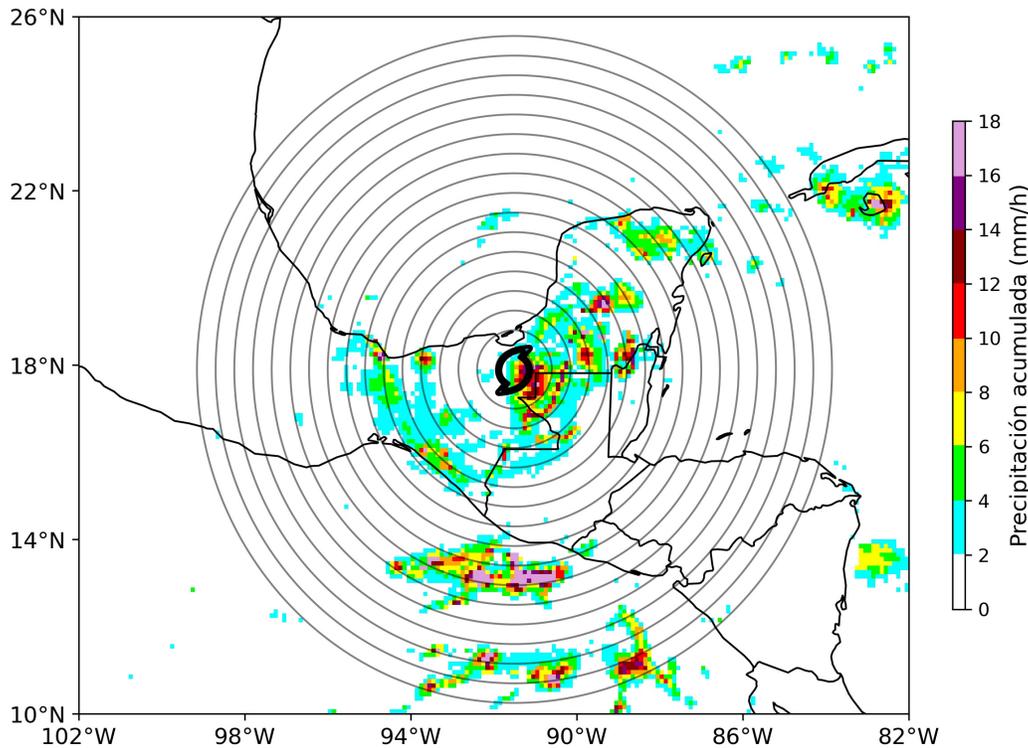


FIGURA 2.5. Similar a la Fig. 2.4, pero mostrando los anillos usados cada 50 km.

Se determinan áreas de PCT para cada cuadrante determinado por el algoritmo RBP. Con ayuda de las herramientas de SIG en Python, se hace una conversión de la imagen IMERG a puntos ubicados en una malla. El proceso continúa con una intersección de estas áreas con el polígono del tamaño del CT definido por RBP (Fig. 2.5). Los puntos de precipitación dentro del área se suman para obtener el valor de PCT acumulada por anillo.

2.6.3. Técnica de anillos usando los datos continentales de CHIRPS

La técnica de anillos usada con los datos de CHIRPS se desarrolla de manera diferente a la usada en la sección 2.6.2, porque IMERG tiene valores sobre continente y océano. La temporalidad de la base de datos CHIRPS es diaria y su distribución espacial es solamente sobre el continente. Los criterios usados son los siguientes:

1. se consideran aquellas posiciones que estén sobre territorio mexicano o que se encuentren al menos a 250 km de distancia de las costas mexicanas (Fig. 2.7).

- para obtener valores diarios, se calcula un promedio de los valores de latitud, longitud y tamaño de los cuatro radios, que se encuentran definidos cada 6 horas.

Los perfiles de precipitación se reportan por cuenca, tamaño, intensidad y por posición (*i.e.* sobre territorio o cercana a la costa). Con la finalidad de hacer una comparación, se harán estos mismos cálculos utilizando la base de datos GPM IMERG.

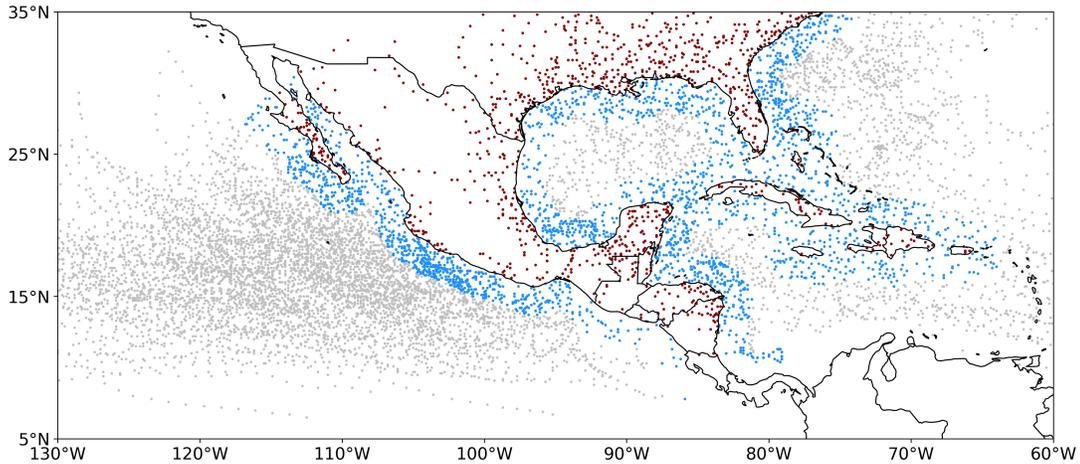


FIGURA 2.6. Posiciones de los CT que se encuentran sobre territorio mexicano (rojo) y cercanos a la costa (distancia ~ 250 km, en azul). Las posiciones en gris representan las posiciones que no fueron tomadas en cuenta.

2.7. Relaciones estadísticas

Existe una gran variabilidad en la cantidad de la PCT. Diferentes estudios han relacionado la PCT con las condiciones medioambientales en las que el CT se desarrolla (Konrad & Perry, 2010; C. J. Matyas, 2010; Perez-Estrada, 2020; Quiring y col., 2011; Y. Wu y col., 2020). Por ejemplo, la divergencia en niveles altos (Zhou & Matyas, 2021), la humedad en niveles medios (Hill & Lackmann, 2009; Konrad & Perry, 2010), la vorticidad en niveles altos (Hill & Lackmann, 2009) y la cizalladura (Kim y col., 2020; Na y col., 2018) se han considerado para describir la cantidad, distribución y extensión de la PCT.

Este trabajo, utiliza relaciones estadísticas, como la correlación de Spearman y los modelos estimados de ecuaciones generalizadas para determinar el impacto de las condiciones ambientales en el tamaño de los CTs y su precipitación. Estas relaciones permiten evaluar las contribuciones relativas de cada predictor a los modelos estadísticos, mediante el cálculo de sus correlaciones parciales con las variables dependientes, que en este caso son la PCT y el tamaño del CT.

2.7.1. Correlación de spearman

Un coeficiente de correlación mide la medida en que dos variables tienden a cambiar juntas y describe la fuerza y la dirección de esta relación. Sin embargo, la correlación no implica causalidad (Ramzai, 2021). Las variables ambientales analizadas en este trabajo no tienen una distribución normal. Por ello, se usó la correlación de Spearman, ya que es una medida no paramétrica de la correlación por rangos (Wilks, 2019). Esta correlación evalúa la relación entre dos variables mediante una función monótona; es decir, no existe una dependencia que esté a un ritmo constante (Ramzai, 2021). La correlación de Spearman se calcula a través de la ecuación 2.7. D_i es la diferencia en los rangos entre el i -ésimo par de valores de datos. En casos de empate, donde un valor de datos en particular aparece más de una vez, se les asigna su rango promedio antes de calcular el D_i 's (Wilks, 2019).

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n D_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (2.7)$$

Un valor cercano -1 indica una relación inversamente lineal entre las variables. Por el contrario, si el valor es cercano a 1, entonces las variables tendrán una relación directamente positiva. Si el valor es cercano a 0, se considera que la correlación es débil o inexistente. Se seleccionaron las variables medioambientales que tuvieran las correlaciones más altas con la PCT (i.e. $\rho = |0.3|$, $\alpha = 0.01$) para crear los modelos de regresión.

2.7.2. Modelos de Estimación de Ecuaciones Generalizadas

Los modelos estadísticos se han utilizado en diversos estudios de CTs. Se han usado para predecir la extensión de los campos de viento del CT (Demuth y col., 2004), para predecir la intensidad del CT (DeMaria y col., 2005), tamaño del CT (Quiring y col., 2011), cantidad de PCT (Perez-Estrada, 2020) y la distribución de la PCT (C. J. Matyas, 2010). Sin embargo, estos estudios suponen que las variables dependientes tienen una distribución normal, criterio que la mayoría de las variables medioambientales no cumplen. Por ello, han surgido nuevas estrategias que no suponen que las variables tienen distribuciones normales, como los modelos lineales generalizados (Zhou & Matyas, 2021) y las ecuaciones de estimación generalizadas (GEE, por sus siglas en inglés) (Zhou y col., 2018).

El uso de los modelos GEE implica determinar la estructura de la covarianza dentro de un conjunto de variables y elige iterativamente el mejor vector de coeficiente para describir la relación entre las covariables y la respuesta (Lüdecke, 2018). Este trabajo usa la librería statsmodels 0.14.0 del lenguaje de programación Python y se calcula el modelo de regresión marginal GEE. También, se estima el error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) y el criterio de cuasilibertad bajo del modelo de independencia (QIC) con ayuda de la misma librería.

2.8. Métricas sobre la forma de los CTs

Los patrones de la PCT se pueden analizar usando descripciones matemáticas. Zhou y Matyas (2021) usaron diferentes métricas de forma en los CTs del NA. Sus resultados indican que los patrones de PCT presentan variaciones regionales significativas cuando los CTs están sobre la tierra, así como entre las subcuencas.

Este trabajo supone que las imágenes IR podrían ayudar a definir la distribución de la PCT definida por IMERG (*i.e.* forma). Por ello, se seleccionaron tres métricas: dispersión, asimetría y solidez. La selección de métricas se fundamenta en el cambio rápido de la forma del CT cuando tiende a acercarse a las costas (Zick & Matyas, 2016) y por lo tanto, podría cambiar su peligro asociado.

La dispersión (D) mide la dispersión de los polígonos de precipitación del centro de la circulación del CT. Esta métrica (ec. 2.8) calcula la relación entre el radio del centroide ($r_{centroide}$) y el radio de búsqueda de los polígonos de precipitación ($r_{busqueda}$). El cálculo de esta métrica es descrito por Zick y Matyas (2016).

$$D = \sum_{i=1}^N \left(\frac{Area_i}{Area_{total}} \right) \left(\frac{r_{centroide,i}}{r_{busqueda}} \right) \quad (2.8)$$

El valor de D es la multiplicación de dos divisiones: la del área de cada polígono entre el área total de los polígonos y la de la distancia del centroide de cada polígono entre el radio de búsqueda. El radio de búsqueda depende del valor del radio por cuadrante definido por ROCCLOUD. Sólo se incluyeron CTs que tengan áreas de T_b en sus cuatro radios. Los valores de D varían de 0 a 1. Cuando D se aproxima a 0, las ROIs más grandes están situadas cerca del centro del CT. Los valores de D cercanos a 1 indican que los ROIs se desplazan hacia el exterior y las precipitaciones cerca del centro se disipan o que el CT tiene varias bandas de lluvia exteriores.

La asimetría (A) (ec. 2.9) describe la desorganización de toda el área de PCT a lo largo de su trayectoria. Se definen secciones a la izquierda y a la derecha de la trayectoria del CT según la dirección de su movimiento. La extensión se mide desde el centro del CT hasta el borde más alejado de los polígonos de lluvia, en cada ángulo de 5° , tomando en cuenta sólo el valor máximo y mínimo (Zick & Matyas, 2016).

$$D = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{max}} \quad (2.9)$$

Para este trabajo, se usaron los cuatro radios calculados por ROCCLOUD en la ec. (2.9). Los valores de asimetría varían de 0 a 1. Si A es cercana a 0, el CT es simétrico y si A es cercana a 1, tendrá una forma asimétrica. Por ejemplo, si un cuadrante mide 0 km, A tendrá un valor de 1 y corresponde a un CT asimétrico.

Finalmente, la solidez (S) (ec. 2.10) mide la densidad de un objeto y se obtiene calculando la relación entre el área de todos los polígonos de PCT y el área del casco convexo de todo el campo de lluvia (AghaKouchak y col., 2011). La ecuación

2.10 relaciona el área de los polígonos obtenidos de las ROIs y el área convexa que encierra todos los polígonos.

$$S = \frac{Area_{total}}{Area_{convexa}} \quad (2.10)$$

Un valor de S cercano a 1 indica que el CT es sólido con bordes suaves, mientras que un valor cercano a 0 indica que el CT es un polígono cóncavo, que existe la presencia de zonas del CT sin bandas lluviosas o que el campo de lluvia es menos estructurado y consistente (Zhou & Matyas, 2021). Este estudio utiliza el área del polígono definido por el algoritmo RBP, en lugar del área convexa. De acuerdo a Zhou y col. (2018), esta métrica es una característica equivalente a la fragmentación definida por Zick y Matyas (2016). Sin embargo, los valores de esta métrica no oscilan de 0 a 1, debido a que la resolución de las imágenes IR utilizadas en este trabajo es mayor que la del trabajo anteriormente mencionado.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

3.1. Climatología de los tamaños de los CTs en los Mares Intramericanos y el Océano Pacífico del este

Un total de 191 y 336 CTs de las cuencas NA y EP, respectivamente, fueron analizados durante el periodo 2000-2020. Después de restringir las posiciones de los CTs que están confinados en la región de estudio (Landsea & Franklin, 2013), se obtuvieron 4526 y 6923 posiciones para la cuenca del NA y EP, respectivamente. Así, el tamaño del CT se definió en las posiciones reportadas por el NHC en tiempo sinóptico.

3.1.1. Distribución del tamaño del CT

La Tabla 3.1 muestra las estadísticas generales de todos los CTs del NA y los del EP de la región de estudio durante el periodo 2000-2020. El número de posiciones de los CTs del EP es mayor que el número que las posiciones del NA, lo que indica una mayor incidencia de los CTs en la costa oeste del país (Dominguez, 2018). En promedio, el tamaño de los CTs, determinado por ROCLLOUD, es de 615.9 km. Los CTs del NA miden 653.3 km y los CTs del EP miden 591.4 km, en promedio. Así que, el tamaño de los CTs del NA es más grande que el de los CTs del EP. Estos resultados son similares a los encontrados por otros trabajos (Knaff y col., 2014; Mok y col., 2018).

Estos resultados son similares a los encontrados por Pérez-Alarcón y col. (2021), debido al uso de los radios de perfil de vientos definidos por Willoughby y col. (2006). El análisis por cuadrante muestra que el tamaño más grande se encuentra en el cuadrante noreste (*RNE*), en comparación con los demás radios. El menor tamaño se encuentra en el cuadrante noroeste (*RNO*) (Fig. 3.1). A pesar de la diferencia entre los tamaños por cuadrantes, las medianas (percentil 50; p50) son similares entre los cuadrantes del CT, teniendo una menor variación entre ellos los CTs del NA.

TABLA 3.1. Estadísticas de la media, mediana, el primer y tercer cuartil (25 % y 75 % respectivamente), la desviación estándar de los radios por cuadrante y del radio promedio (R_p)(km) de los CTs de la cuenca del NA y EP durante el periodo 2000-2020.

	N	Prom	Desv. Estand.	Mediana	Percentiles		Min	Max
					25 %	75 %		
Todas las posiciones								
<i>RNE</i>	11449	637.9	351.4	666.9	395.1	845.3	0	2816.3
<i>RNO</i>	11449	420.8	286.8	394.4	204.4	627.3	0	2258.7
<i>RSO</i>	11449	564.6	316.4	654.8	310.6	802.7	0	2372.7
<i>RSE</i>	11449	642.6	296.1	699.9	479.8	827.5	0	2176.0
R_p	11449	615.8	200.2	625.9	491.0	743.9	28.7	1761.6
Atlántico Norte								
<i>RNE</i>	4526	726.3	349.5	731.3	497.7	912.0	0	2816.3
<i>RNO</i>	4526	450.2	298.9	431.7	231.1	672.8	0	2258.7
<i>RSO</i>	4526	567.7	325.8	646.2	315.5	814.8	0	2372.7
<i>RSE</i>	4526	690.3	278.7	726.8	531.3	855.7	0	2176.0
R_p	4526	653.3	199.9	659.1	521.9	784.0	83.8	1761.6
Pacífico Noreste Tropical								
<i>RNE</i>	6923	580.1	340.5	617.2	326.4	806.1	0	2549.2
<i>RNO</i>	6923	401.6	276.9	372.5	193.3	600.1	0	1871.3
<i>RSO</i>	6923	562.5	310.0	660.0	308.0	794.7	0	1692.0
<i>RSE</i>	6923	611.4	302.7	683.4	435.5	808.8	0	2094.8
R_p	6923	591.4	196.6	608.1	471.2	720.0	28.7	1488.0

La Tabla 3.1 muestra que existen valores mínimos de 0 km, debido a que en algunas posiciones no estaban presentes los cúmulos sobre un cuadrante determinado. Sin embargo, la Figura 3.1 muestra que el cuadrante sureste (*RSE*) suele tener radios mayores a 0, en comparación de los demás cuadrantes, lo que podría indicar que en la mayoría de los casos existen cúmulos convectivos sobre ese cuadrante. Cabe mencionar que, los rangos intercuartílicos (p25, p75) sirven para clasificar a los tamaños de los CTs en pequeños y grandes, respectivamente (Knaff y col., 2014; C. J. Matyas, 2010).

Para la cuenca del NA, se consideran pequeños si miden menos de 522 km y grandes si miden más de 784 km. Por la cuenca del EP, los CTs pequeños miden menos de 471 km y los grandes miden más de 720 km. Los CTs grandes ($\gg 720$ km) no suelen ser frecuentes en el EP en comparación con los pequeños, mientras que en el NA la señal no es clara, existe una distribución más sesgada a tamaños promedio (Fig. A.1).

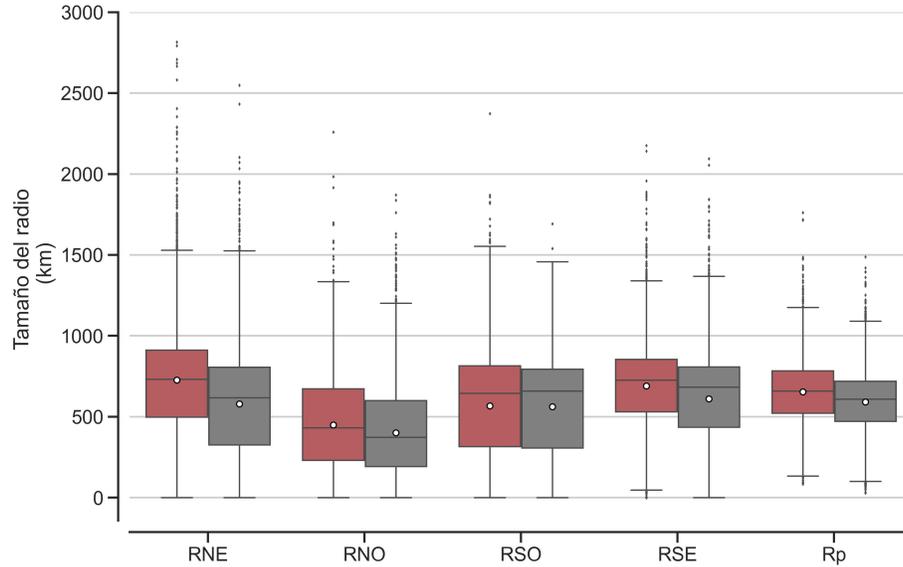


FIGURA 3.1. Cajas y bigotes de las distribuciones de los radios por cuadrante y el R_p (km) de los radios en la región de estudio de la cuenca NA (rojo) y EP (gris). Los valores promedio se encuentran representados por el punto blanco dentro de la caja durante el periodo 2000-2020.

Por otra parte, se analizó el tamaño del CT dependiendo de su categoría de acuerdo a la escala Saffir-Simpson (Tabla 1.1). En el NA (Fig. 3.2), las DTs y las TTs tienen una mayor frecuencia. El porcentaje de huracanes que superan los 1200 km de radio promedio es menor al 1%. Por lo que, los CTs de menor intensidad suelen ser más grandes y son más frecuentes (Fig 3.2). En el caso de las DTs, su frecuencia se reduce con el tamaño, mostrando que existe una reducción en el tamaño con respecto a la intensidad (Chavas & Emanuel, 2010; Touma y col., 2019).

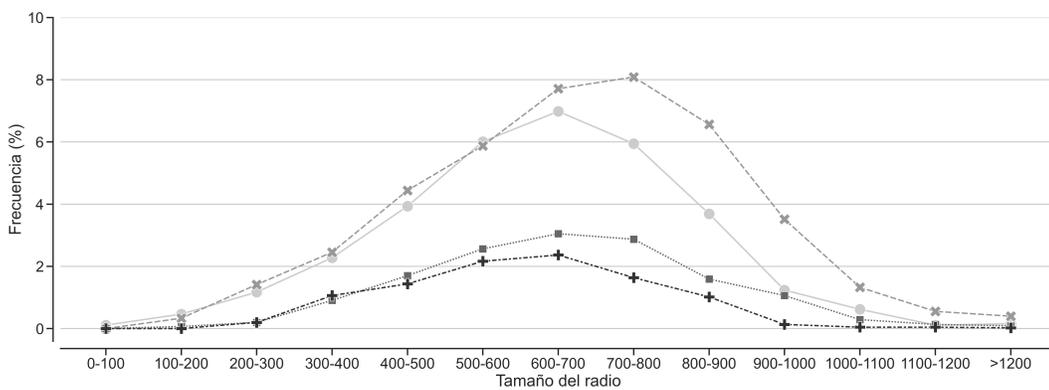


FIGURA 3.2. Distribución del tamaño del radio promedio (km) en la cuenca del NA. La frecuencia relativa se obtiene con respecto a todos los CTs del NA durante el periodo 2000-2020. Las líneas representan las categorías: DT (\circ), TT (\times), HUR 1-2 (\square), HUR 3-5 ($+$)

La figura 3.3 muestra la frecuencia relativa de los tamaños de los CTs con respecto

al número de casos por categoría. El pico de la frecuencia de cada categoría ronda los 600 - 800 km. Las TTs y los huracanes de intensidad menor (categoría 1 y 2) se presentan con mayor frecuencia en tamaños mayores a 1000 km de radio.

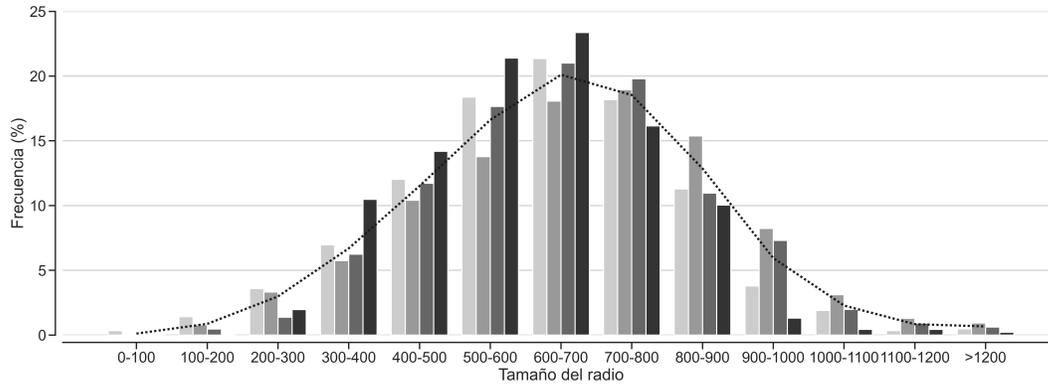


FIGURA 3.3. *Histograma de frecuencia relativa (%) por categoría del tamaño (km) de los CTs, con respecto al número de casos de cada categoría, para la cuenca NA durante el periodo 2000-2020. Las barras representan las categorías de los CTs, de colores claros a oscuros: DT, TT, HUR 1-2 y HUR 3-5*

En el EP (Fig. 3.4), los CTs tienen tamaños más pequeños en comparación con los CTs del NA. Los picos de la frecuencia por categoría rondan los 600 - 700 km. Existe una tendencia a que la menor frecuencia de CTs corresponda a CTs de categorías mayores (HUR 3-5).

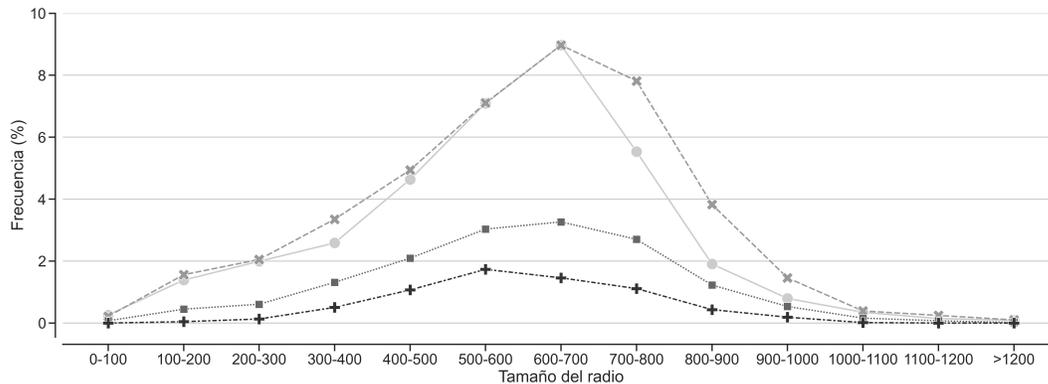


FIGURA 3.4. *Como en la Fig. 3.2, pero para EP.*

La Figura 3.5 muestra que, sin importar la categoría, más del 20% de los CTs tienen un tamaño de 600-700 km. Las DTs y TTs son los CTs que tienen un mayor tamaño (> 1200 km), lo cual podría deberse a que cuando los CTs pierden intensidad, después de alcanzar su máximo en vientos superficiales, tienden a desorganizarse y a producir precipitaciones más alejadas del centro (Touma y col., 2019). Las distribuciones de los radios por cuadrante muestran que los valores máximos de tamaño oscilan entre los 300 - 900 km (Fig. A.2-A.3).

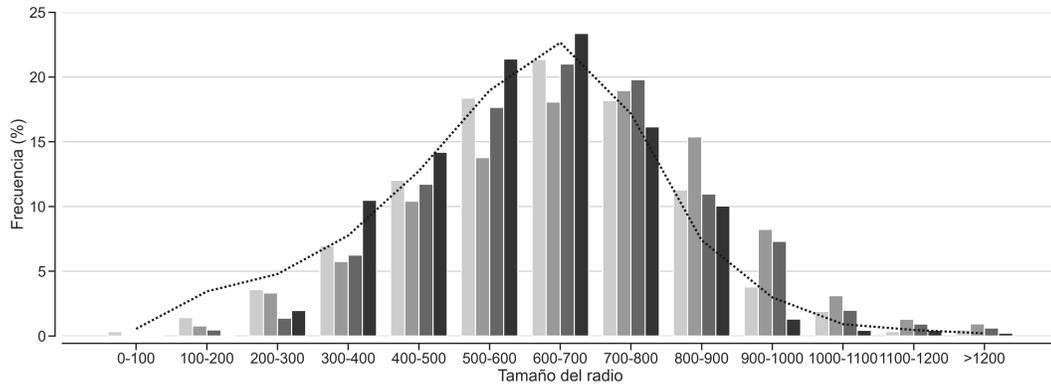


FIGURA 3.5. Como en la Fig. 3.3, pero para EP.

La Tabla 3.2 muestra los tamaños de los CTs más pequeños (definidos por el percentil 25) y de los CTs más grandes (definidos por el percentil 75) en la cuenca NA, definidos por ROCLLOUD. Los huracanes de intensidad menor (categorías 1 y 2) tienen la menor frecuencia, mientras las TTs y las DTs tienen la mayor frecuencia. Sin embargo, los huracanes de intensidad menor tienen una mayor frecuencia en tamaños más grandes, en comparación con los huracanes más destructivos (categorías 3, 4 y 5).

TABLA 3.2. Estadísticas (número de posiciones, media y desviación estándar) de los cuartiles superior e inferior del tamaño promedio (km) de los CTs en la cuenca NA durante el periodo 2000-2020.

Categoría	CTs pequeños			CTs intermedios			CTs grandes		
	N	prom	d. est.	N	prom	d. est.	N	prom	d. est.
Depresión Tropical	412	393.1	104.7	775	652.9	72.3	293	893.7	118.8
Tormenta Tropical	436	397.6	92.9	882	660.7	73.5	613	911.1	114.7
Huracán 1-2	149	414.5	81.3	347	655.1	71.9	161	905.9	119.3
Huracán 3-5	135	410.4	72.7	258	642.7	72.7	65	863.0	103.1

En el EP (Tabla 3.3), las DTs y TTs tienen tamaños pequeños y presentan el menor tamaño promedio. Sin embargo, estas mismas intensidades pueden tener los tamaños más grandes. Se observa que, en promedio, las DTs del Atlántico son mucho más grandes que un huracán de intensidad mayor (cat. 3, 4 y 5) en el EP (Fig. A.4). Es importante que el tamaño del CT fue determinado por ROCLLOUD.

TABLA 3.3. Estadísticas (número de posiciones, media y desviación estándar) de los cuartiles superior e inferior del tamaño promedio (km) de los CTs en la cuenca EP durante el periodo 2000-2020.

Categoría	CTs pequeños			CTs intermedios			CTs grandes		
	N	prom	d. est.	N	prom	d. est.	N	prom	d. est.
Depresión Tropical	645	323.7	111.0	1325	606.4	76.1	504	825.1	107.8
Tormenta Tropical	720	323.8	107.0	1345	606.7	70.1	845	827.2	100.8
Huracán 1-2	264	341.9	103.1	528	599.3	68.5	284	827.9	97.3
Huracán 3-5	100	383.7	71.0	264	596.6	67.4	99	809.1	74.7

3.1.2. Variación espacial del tamaño de los CTs

Con la finalidad de poder estudiar la variación espacial del tamaño de los CTs, se calculan promedios dentro de una malla de $2^\circ \times 2^\circ$. Los valores del tamaño, dependiendo de sus posiciones, se promedian para determinar los valores de una celda determinada.

La Figura 3.6 muestra la distribución geográfica de los radios calculados por cuadrantes y el radio promedio en km. La distribución varía con respecto a la cuenca y al cuadrante analizado. En el cuadrante *RNE* (Fig. 3.6a), cuadrante que usualmente tiene el mayor tamaño, tiene valores más grandes conforme se acerca a la parte continental. Esto podría ser debido a que la interacción de la fricción de los vientos del CT con el territorio continental genera asimetrías sobre este radio, ocasionando una mayor dispersión de los cúmulos (Emanuel, 2005; C. J. Matyas, 2010). En el EP, los radios más grandes se localizan en las posiciones cercanas a la parte continental. Por lo que, en ambas cuencas, los CTs de menor tamaño (color azul) se localizan sobre océano abierto y en regiones alejadas del continente, donde podría haber aguas frías con temperaturas menores a 26°C (Dominguez, 2012).

Los tamaños de radios más pequeños están en el cuadrante correspondiente al *RNO* (Fig. 3.6b). Los CTs de mayor tamaño en este cuadrante (en color rojo) del NA no tienen una clara relación entre su posición y su tamaño. En el EP, los mayores tamaños del *RNO* se encuentran en latitudes menores, lo cual podría estar relacionado con la alberca de agua caliente (Dominguez, 2018), a las interacciones con las ondas del este (Dominguez y col., 2021), o a la presencia de la ITCZ (Dominguez y col., 2020).

Sobre el NA, el cuadrante de *RSO* (Fig. 3.6c) suele tener mayores tamaños conforme aumenta la latitud. Sin embargo, si la posición se encuentra sobre el continente, el tamaño se reduce. Sobre el EP, la distribución de los radios de *RSO* muestra una reducción del tamaño con respecto a la latitud. Las distribuciones espaciales del cuadrante *RSE* (Fig. 3.6d) tiene una señal muy similar al *RNE* (Fig. 3.6c), que podría estar relacionado con el movimiento antihorario del CT en el hemisferio norte.

Finalmente, el radio promedio muestra una clara variación espacial (Fig. 3.6e). Los CTs del NA que se forman cerca a las costas de África presentan un menor tamaño, y conforme cambian su posición más hacia el norte, incrementan su tamaño. Los CTs del EP experimentan una reducción en su tamaño, conforme se adentran al océano. Sin embargo, también existe un ligero incremento en el radio promedio conforme se acercan a la costa oeste de USA y México, aunque no es tan claro comparado con los tamaños del NA.

Chavas y col. (2016), Knaff y col. (2014) y Pérez-Alarcón y col. (2021) encontraron un incremento del tamaño con respecto a la latitud en ambas cuencas. Sin embargo, estos estudios sólo consideran el campo de vientos del CT. La dispersión de cúmulos puede responder a factores medioambientales, en lugar de la latitud. Los resultados muestran dos posibles razones: 1) cuando el CT se acerca a regiones continentales (Larson y col., 2005; Zhou y col., 2018) y, 2) dentro del océano donde los

CTs tienden a incrementar su intensidad, debido a que las condiciones atmosféricas son favorables (McNeely y col., 2021; Yang y col., 2022). La compleja topografía cercana a las costas mexicanas (Sierra Madre Oriental, Occidental y Sur) y de Centroamérica (Zhu & Aguilera, 2021) puede favorecer que el tamaño promedio de los CTs incremente conforme se acerca a las costas, teniendo incluso tamaños mayores cuando atraviesa las Sierras Madres y las regiones montañosas de Centroamérica (Fig. 3.6e).

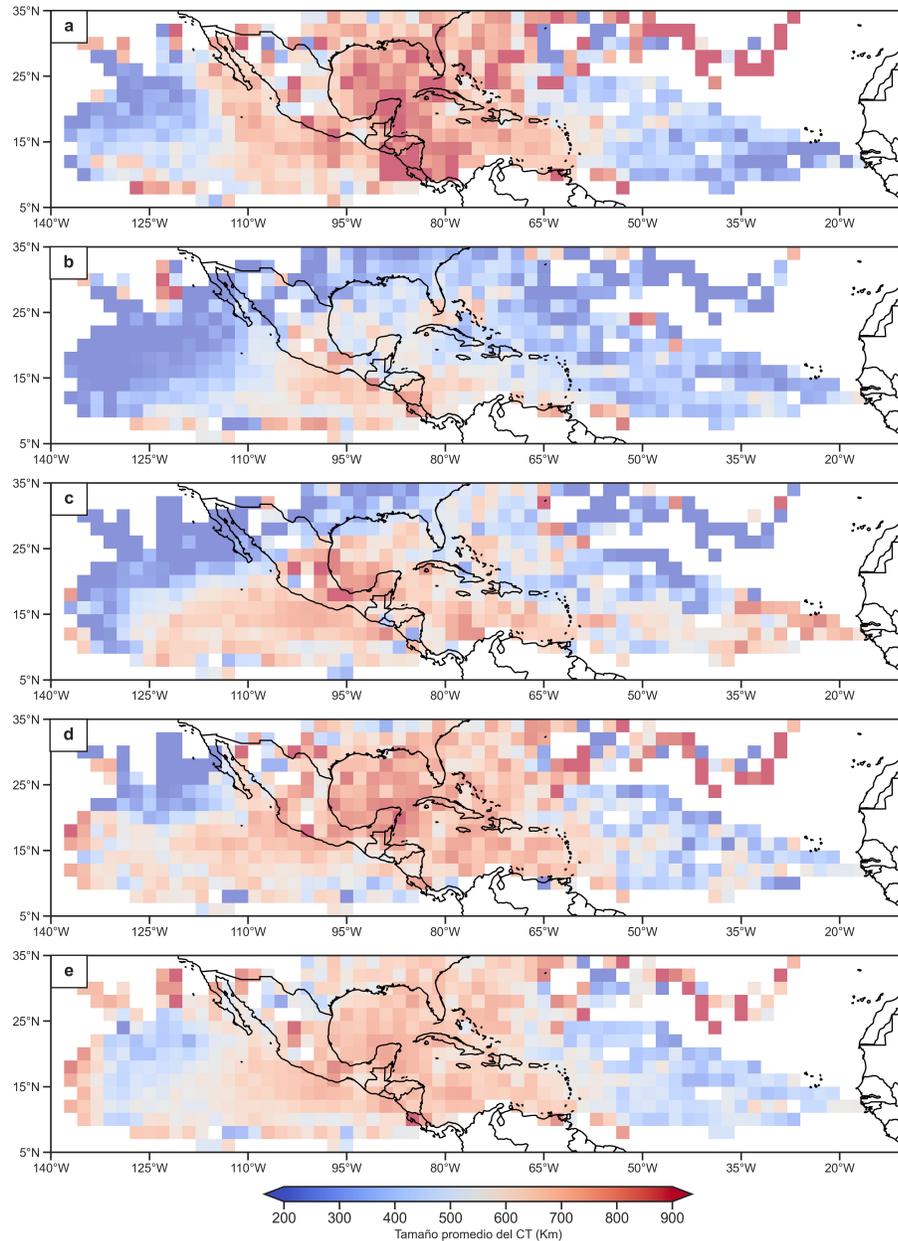


FIGURA 3.6. Distribución espacial del tamaño de los CTs por cuadrante (km): (a) RNE, (b) RNO, (c) RSO, (d) RSE y (e) R_p . Los límites en la barra de colores representan los rangos intercuantílicos (p25 y p75) durante el periodo 2000-2020.

La Figura 3.7 muestra el comportamiento del tamaño de los radios por cuadrante y el radio promedio de los CTs en ambas cuencas, 24h antes y 24h después de hacer *landfalling*. De lado de NA, el comportamiento de R_p no muestra un incremento cuando hace *landfalling* (0h), pero si hay un ligero incremento, en promedio, entre las 6h y 12h después de hacer *landfalling* en el país. En ambas cuencas, los radios por cuadrante tienden a disminuir después de hacer *landfalling*.

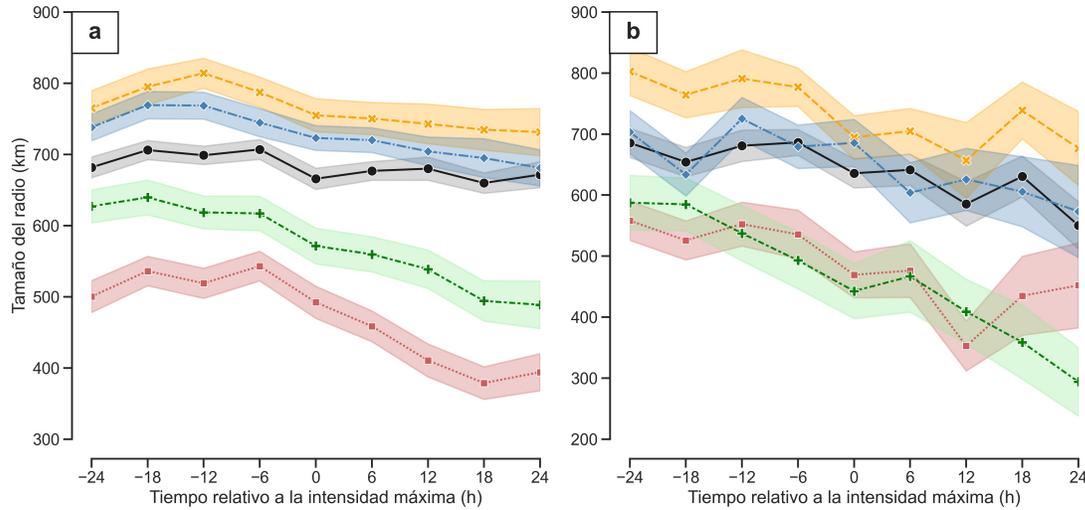


FIGURA 3.7. Comportamiento promedio del R_p (km) en negro y del radio por cuadrantes (R_{NE} en amarillo, R_{NO} en rojo, R_{SO} en verde y R_{SE} en azul) de los CTs en: a) NA y b) EP, 24h antes (-24h) y 24h después de hacer *landfalling* (24h). Las áreas sombreadas muestran el error estándar asociado al valor promedio de R_p cada 6h.

Un análisis del promedio de R_p , determinado por ROCCLOUD, por cuenca y por categoría dependiendo del momento en que alcanza su máxima intensidad (0 h) revela que sólo en los CTs del NA agrandan su tamaño en las primeras 6 h después de alcanzar su máximo. Sin embargo, pasado este tiempo, el tamaño de R_p tiende a decrecer (Fig. 3.8a). Los CTs del EP tienen este mismo comportamiento de decrecimiento, pero con una pendiente más pronunciada (Fig. 3.8a). Los CTs de ambas cuencas que duran más de 72h después de alcanzar su máximo en intensidad, suelen agrandar su tamaño. Esto podría estar relacionado con la interacción de la parte continental y a que pudieron ser huracanes intensos (cat. 3,4, y 5), por lo que tardan más tiempo en degradarse.

La Figura 3.8b muestra que una TT del NA puede ser tan grande como un HUR 1-2, y su vez, puede ser más grande que un HUR 3-5. Estos huracanes intensos y las TTs pueden incrementar su tamaño 6 h después de alcanzar su pico máximo de intensidad. Por su parte, este comportamiento en los HUR 3-5 sólo es perceptible 36h después de alcanzar su máximo de intensidad en el EP (Fig. 3.8c). Lo anterior podría estar vinculado a que los CTs son tan intensos que tardan tiempo en degradarse y la mayor parte de su tiempo de vida, se encuentran sobre el océano (Dominguez &

Magaña, 2018). Es interesante mencionar que los HUR1-2 del EP pueden agrandar su tamaño 72 h después de alcanzar su pico de intensidad.

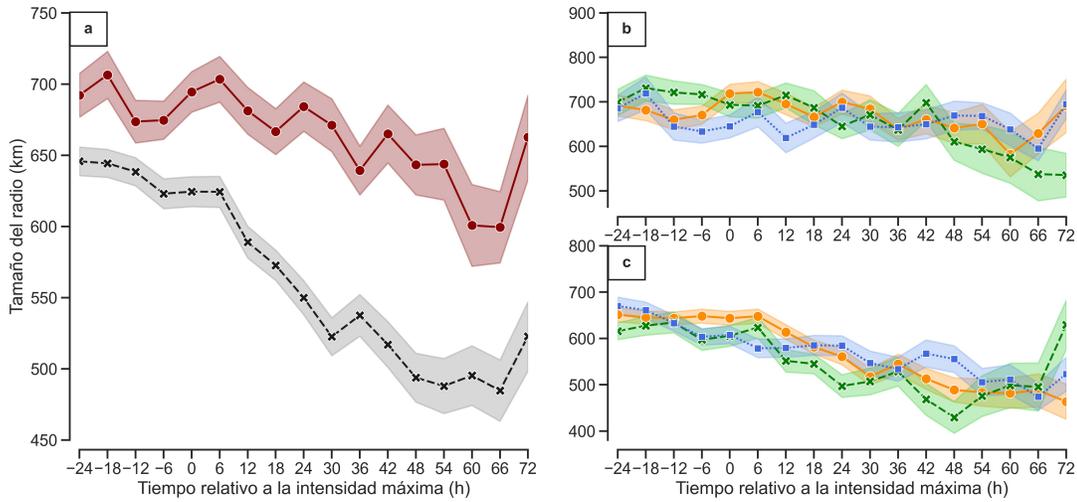


FIGURA 3.8. *Compuestos de tamaño de R_p (km) de: (a) los CTs sobre NA (en rojo) y EP (en gris) y las TTs (en amarillo), HUR1-2 (en verde) y HUR3-5 (en azul) sobre (b) NA y (c) EP. El tiempo 0h representa el momento en que alcanzan la máxima intensidad. Las áreas sombreadas proporcionan el error estándar asociado al valor promedio de R_p cada 6 h.*

3.1.3. Variación mensual e interanual del tamaño de los CTs

El tamaño medio mensual de los CTs en el NA es más grande durante junio, octubre y noviembre. En promedio, durante estos meses, el tamaño es de 750 km. Durante los demás meses, el tamaño promedio oscila entre los 600 y 650 km (Fig. 3.9). Knaff y col. (2014) y Mok y col. (2018) encuentra resultados similares tanto en la cuenca de NA, como en la EP, aunque se usan diferentes definiciones de tamaño. El tamaño de los CTs durante los meses de septiembre-noviembre es, en promedio, más grande que en los demás meses sobre NA y en agosto-septiembre sobre EP (Fig. 3.9).

El porcentaje mensual de CTs grandes y pequeños, definidos por el p75 y p25 respectivamente, se muestra en la Figura 3.10). En ambas cuencas, se observa que los CT grandes ocurren en un mayor porcentaje ($\sim 25\%$) durante septiembre, en comparación con los demás meses. Sin embargo, los CTs pequeños son más predominantes durante septiembre en NA, mes en el que tienen su mayor porcentaje ($\sim 35\%$). Los CTs pequeños del EP tienen el mismo porcentaje que los CTs grandes durante septiembre. En esta cuenca, los CTs pequeños ocurren en un mayor porcentaje ($\sim 23\%$) durante julio y septiembre. Es interesante comentar que durante los meses de agosto y septiembre también existen porcentajes similares en los CTs intensos y los CTs de menor categoría (Fig. A.5)

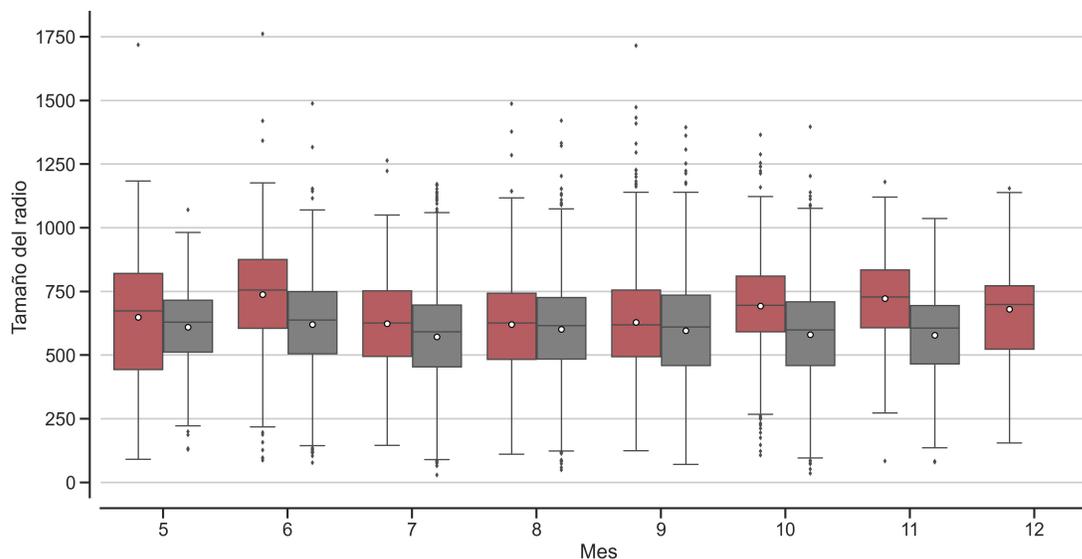


FIGURA 3.9. Cajas y bigotes de los valores promedio mensual de R_p (km) sobre la NA (rojo) y el EP (gris) durante el periodo 2000-2020. Los bigotes representan la distribución de los valores por encima (debajo) de los p_{75} (p_{25}) y los puntos representan los outliers. Los puntos blancos muestran el promedio. Las divisiones dentro de la caja representan el primer y tercer cuartil.

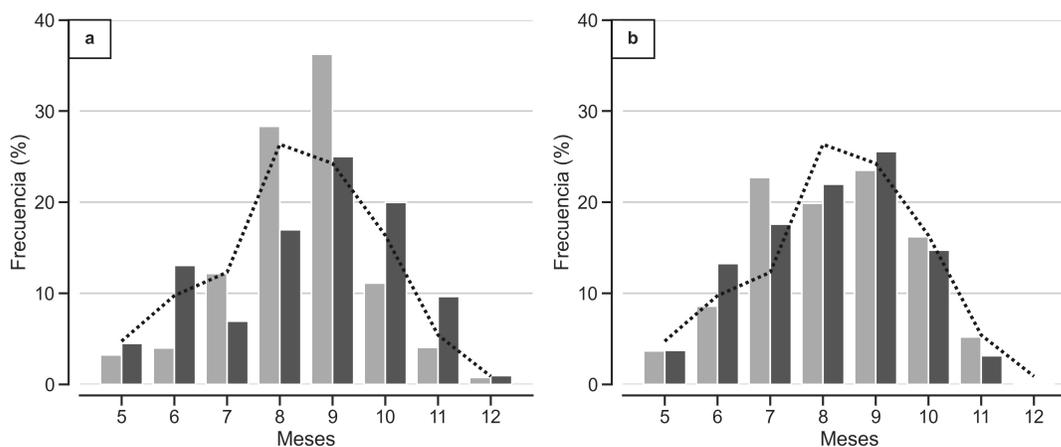


FIGURA 3.10. Frecuencia relativa (%) mensual del tamaño de los CTs para (a) NA y (b) EP. Se muestran las frecuencias de CT grandes (p_{75} ; en negro) y CT pequeños (p_{25} ; en gris). La línea punteada representa el porcentaje de todos los CTs por mes.

Las series anuales del tamaño promedio de los CTs sobre ambas cuencas (Fig. 3.11) muestran una variabilidad interanual que tiene una tendencia ligeramente creciente y es estadísticamente significativa a un nivel del 95%, utilizando la prueba t de student. Sin embargo, no tienen significancia usando el test de Mann-Kendall ($\alpha = 0.5$). El tamaño medio anual de los CTs sobre NA y EP es 716 km y 625 km,

respectivamente. La variabilidad anual puede deberse a la presencia de oscilaciones interanuales, como el ENSO (Dominguez & Magaña, 2018) o multi decadales, como la AMO (C. Sun y col., 2020).

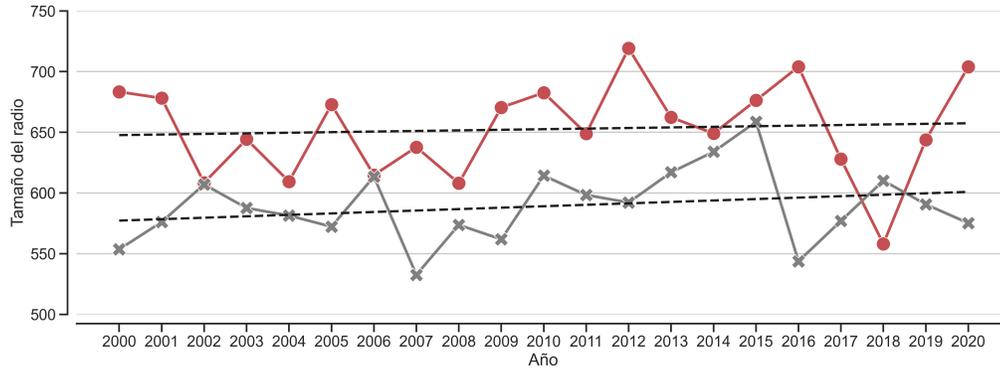


FIGURA 3.11. Promedios anuales de R_p (km) para los CTs del NA (rojo) y los del EP (negro) durante 2000-2020. Las líneas discontinuas indican la tendencia de los radios en ambas cuencas.

También, se realizó un análisis espacial de las tendencias del tamaño promedio de los CTs, definido por ROCCLOUD, usando una malla de $2^\circ \times 2^\circ$ (Fig. 3.12). Las costas occidentales de la península de Baja California, las costas de Veracruz, el Golfo de Tehuantepec y sur de Florida tienen una tendencia positiva y son estadísticamente significativas a un nivel del 90 %, usando el test de Mann-Kendall. Por su parte, las tendencias negativas significativas se encuentran principalmente sobre la región del Caribe, parte de la costa de la isla española y en el este del NA. Sería interesante contar con más años de registros para determinar la influencia del cambio climático en el tamaño de los CTs, especialmente en las regiones costeras.

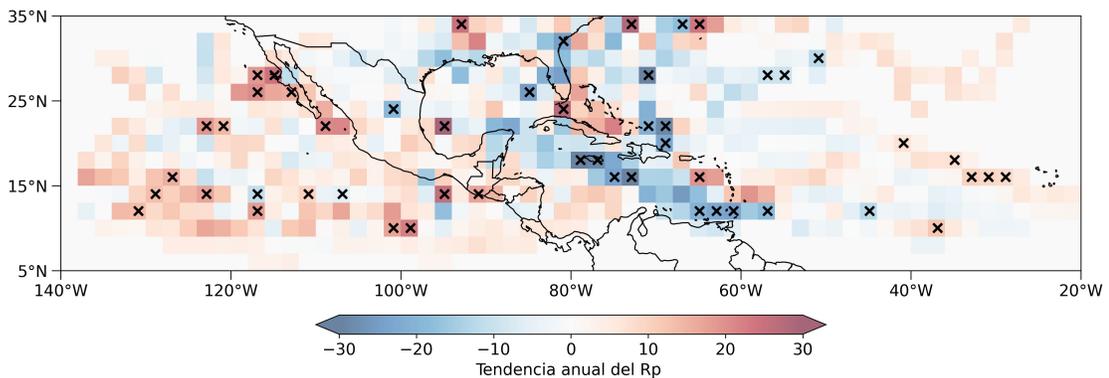


FIGURA 3.12. Tendencia anual (km/año) del tamaño del radio promedio (R_p) durante el periodo 2000-2020. Las cruces muestran las regiones estadísticamente significativas usando la prueba U de Mann-Whitney, donde $p < 0.1$.

3.2. Precipitación asociada al CTs en función del tamaño

3.2.1. Climatología del tamaño de la PCT usando datos IMERG

Estudios previos usaron las imágenes del TRMM y TMPA para determinar el área de la PCT y su extensión (Kim y col., 2020; C. J. Matyas, 2010; Zhou & Matyas, 2021); sin embargo, tienen la limitante de que estas bases de datos tienen registros hasta el 2014 (Jiang y col., 2008; Xu y col., 2017). El algoritmo RBP surge de la modificación al algoritmo ROCLOUD, con el propósito de analizar los tamaños de los CTs en función de la lluvia, usando la base de datos IMERG.

Se usaron varios umbrales propuestos por la literatura: 2.5, 3.0, 5.0 y 10.0 mm h^{-1} . Sin embargo, el umbral 2.5 mm h^{-1} mostró los mejores resultados debido a que conservaba el mayor número de posiciones, en comparación con los otros umbrales. Sin embargo, el número de posiciones analizadas es menor (4417 en el NA y 6190 en el EP) a las usadas por ROCLOUD (Tabla 3.4). De manera similar a los resultados de la sección 3.1, los CTs del NA son más grandes que los del EP, en promedio. Estos resultados podrían indicar una mayor presencia de PCT en el NA. Lavender y McBride (2021) también encontraron estos resultados.

TABLA 3.4. Estadísticas de la media, mediana, el primer y tercer cuartil (25 % y 75 % respectivamente), la desviación estándar de los radios por cuadrante y del radio promedio (R_p), definidos por RBP, (km) para los CTs del NA y EP durante el periodo 2000-2020.

	N	Prom	Desv. Estand.	Mediana	Percentiles		Min	Max
					25 %	75 %		
Atlántico Norte								
<i>RNE</i>	4417	583.9	404.1	404.1	404.1	822.1	0.0	2700.5
<i>RNO</i>	4417	288.6	295.3	222.2	22.2	422.1	0.0	2023.6
<i>RSO</i>	4417	326.8	335.8	212.2	15.7	555.2	0.0	2324.9
<i>RSE</i>	4417	485.6	328.8	431.4	233.5	717.0	0.0	2255.4
R_p	4417	513.4	249.0	478.6	322.6	666.3	42.0	2298.9
Pacífico Noreste								
<i>RNE</i>	6190	418.1	367.1	322.3	122.7	666.9	0.0	2953.0
<i>RNO</i>	6190	251.8	250.0	191.1	77.7	346.0	0.0	1770.7
<i>RSO</i>	6190	382.3	322.4	294.1	106.4	662.1	0.0	1479.1
<i>RSE</i>	6190	421.2	340.9	355.5	129.5	688.7	0.0	1933.1
R_p	6190	448.5	236.5	424.5	265.3	595.4	45.7	2953.0

La Figura 3.13 muestra la distribución por cuadrantes y el promedio del tamaño de PCT para ambas cuencas. Similar a los resultados obtenidos usando ROCCLOUD, el cuadrante *RNE* tiene los radios de PCT más grandes, en comparación con los otros cuadrantes. La distribución de los tamaños de PCT comprende valores que oscilan desde los 0 km, debido a que no existe una precipitación mayor a 2.5 mm h^{-1} , hasta los 2500 km. Sin embargo, los radios están sesgados hacia valores pequeños (rangos intercuartílicos de la Tabla 3.4). De manera general, los valores del RNE, definido por RBP, tienen valores atípicos mayores a 2000 km, Los demás cuadrantes tienen usualmente valores menores a 2000 km (outliers) (Fig. 3.13). Estos resultados son parecidos a los obtenidos por ROCCLOUD (Fig. 3.1).

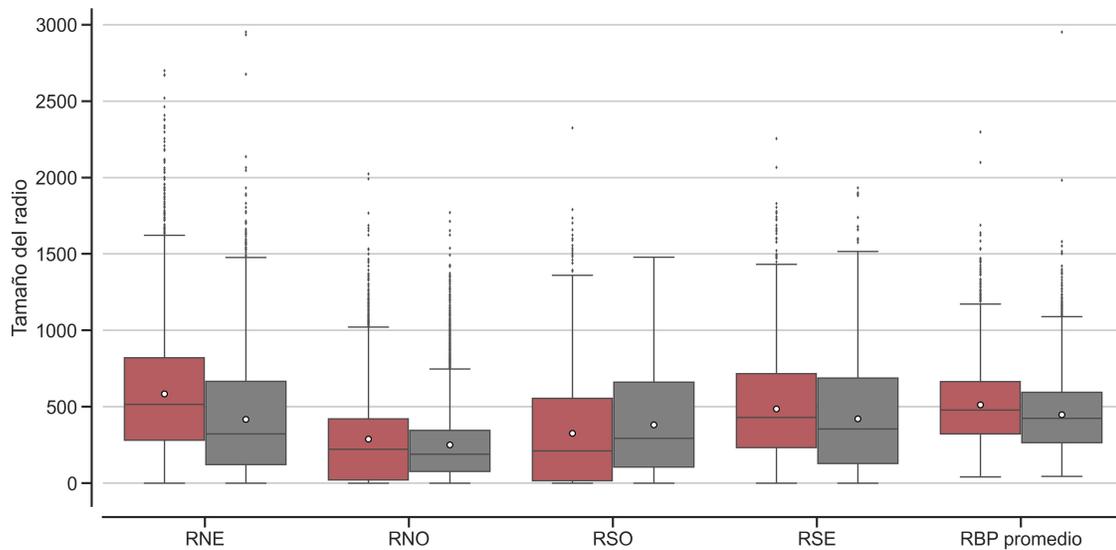


FIGURA 3.13. Cajas y bigotes de los radios por cuadrante y radio promedio (km) definido por el algoritmo RBP de los CTs del NA (en rojo) y EP (en gris). El promedio se encuentra representado por el punto blanco durante el periodo 2000-2020.

Estudios previos resaltan la posible relación entre la intensidad y la PCT (Kim y col., 2020; C. J. Matyas, 2010). Otros estudios encontraron que no existe una relación de la cantidad y distribución de la PCT con su categoría (Breña-Naranjo y col., 2015; Hidalgo y col., 2020; Touma y col., 2019). La Figura 3.14 muestra el cálculo de la frecuencia relativa de los radios promedio de PCT, definidos por RBP, en función de su categoría para ambas cuencas. Las DTs y TTs del NA presentan una mayor extensión del radio de la PCT (Fig. 3.14a). Este comportamiento también se encuentra en las DTs y TTs del EP (Fig. 3.14b).

Los CTs más intensos, con categoría de huracán, tienen radios menores de 500 km en su mayoría. Los radios mayores de 500 km corresponden a CTs débiles en intensidad. Estos resultados indican que la PCT de los CT más intensos se concentran cerca del ojo. Si son débiles, experimentan una dispersión en sus ROIs, que estarán más lejos del centro y afectarán regiones remotas al ojo del CT.

TABLA 3.5. Correlación de rango de Spearman (r) entre los tamaños calculados con las técnicas de ROCCLOUD y RBP para cada cuadrante y promedio; Se determinan para la cuenca NA. Los valores con un asterisco son significativos a un nivel del 95 % de confianza.

	RNE_RPB	RNO_RPB	RSO_RPB	RSE_RPB	Rp_RPB
RNE_ROCCLOUD	0.81*				
RNO_ROCCLOUD	0.14	0.67*			
RSO_ROCCLOUD	0.05	0.17	0.63*		
RSE_ROCCLOUD	0.32*	0.09	0.18	0.66*	
Rp_ROCCLOUD	0.59*	0.32*	0.37*	0.5*	0.73*

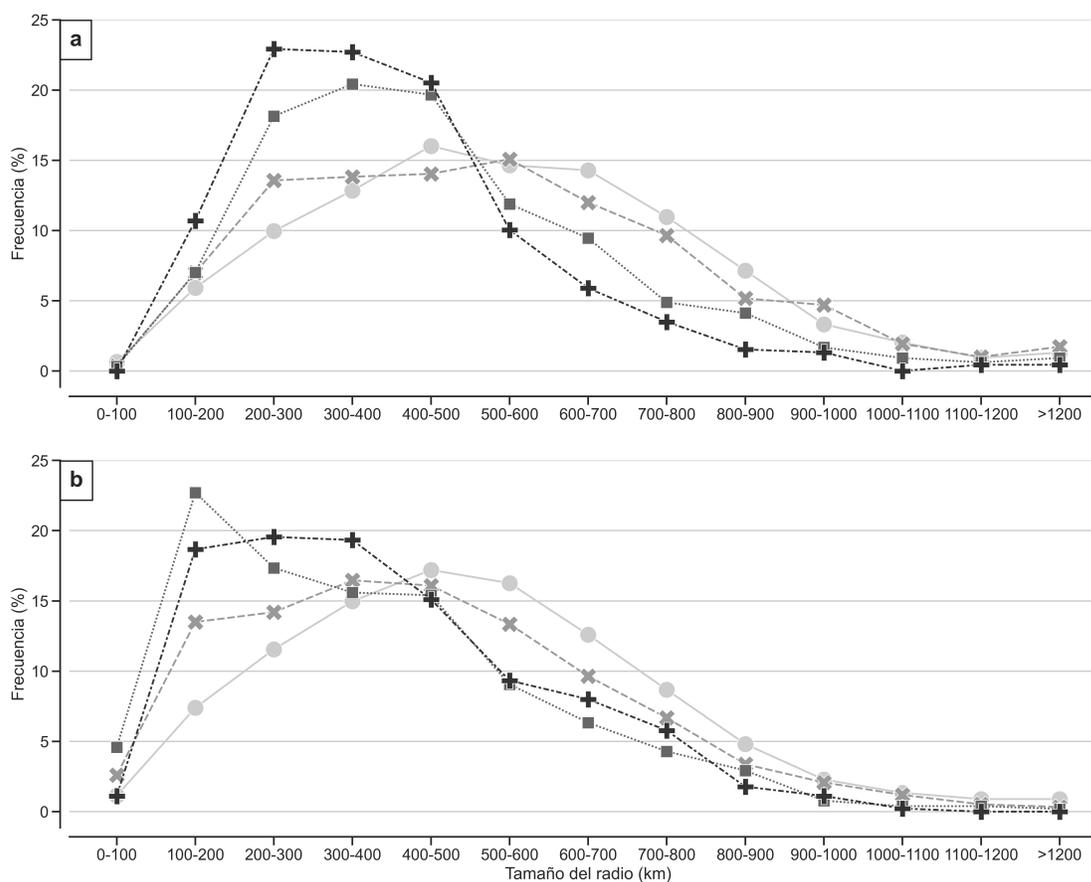


FIGURA 3.14. Frecuencia relativa (%) del tamaño de los radios de la PCT (km) por categoría del CT sobre: (a) NA y (b) EP durante el periodo 2000-2020. Las líneas representan las categorías: DT (\circ), TT (\times), HUR 1-2 (\square), HUR 3-5 ($+$)

Finalmente, se determina la correlación de Spearman entre los radios del CT calculados por ROCCLOUD que usa las imágenes IR, con los radios de la PCT obtenidos por RBP que usa la precipitación de IMERG. Lo anterior es con la finalidad

de demostrar que ROCLOUD puede ser útil para fines operativos y está relacionado con la PCT. Las correlaciones de los radios por cuadrante y el radio promedio de los CTs del NA (Tabla 3.5) y del EP (Tabla 3.6) son mayores a 0.5. Por lo que, existe una fuerte relación entre los valores de ROCLOUD y RBP a un nivel de confianza del 95 %. Este resultado demuestra que la definición del tamaño definido por ROCLOUD puede ser usado para estudiar la PCT.

TABLA 3.6. Igual a la Tabla 3.5, pero para el EP

	RNE_RPB	RNO_RPB	RSO_RPB	RSE_RPB	Rp_RPB
RNE_ROCLOUD	0.77*				
RNO_ROCLOUD	0.32*	0.71*			
RSO_ROCLOUD	0.12	0.21	0.69*		
RSE_ROCLOUD	0.26	0.08	0.28	0.67*	
Rp_ROCLOUD	0.56*	0.38*	0.48*	0.57*	0.74*

3.2.2. Dependencia de la PCT con el tamaño del CT

Esta sección investiga cómo se distribuye la precipitación dentro del tamaño del CT. Esta distribución se calcula realizando un supuesto de anillos espaciados cada 50 km. Lo anterior podría servir para determinar las áreas potencialmente peligrosas por lluvias extremas e inundaciones. Si bien los anillos nos indican una forma regular y circular del CT, permite conocer el alcance de la PCT presente en el ciclón dependiendo de su ubicación con respecto al centro y en forma radial. Esto principalmente permite reforzar la hipótesis de que puede existir lluvia importante más allá de las regiones descritas por el R34.

La Figura 3.15a muestra los perfiles radiales de la tasa de precipitación (mm h^{-1}) de los CTs del NA y EP (considerando océano y continente), cuya distribución se determina cada 6 h. Existe una clara relación entre la tasa de precipitación y el tamaño del CT. Los CTs del NA que tienen radios menores a 600 km tienen mayores tasas de precipitación que los mismos radios de CTs del EP. Sin embargo, no existe una diferencia entre cuencas en radios mayores a 750 km. Estos resultados coinciden con otros estudios donde se muestra que la influencia de la PCT es de ~ 500 km desde su centro definido por el NHC (Breña-Naranjo y col., 2015; Dominguez & Magaña, 2018; Khouakhi y col., 2017; Zhou & Matyas, 2021).

Los perfiles radiales de la tasa de precipitación de CTs sobre la parte continental se muestran en la Figura 3.15b y los perfiles radiales de los CTs cercanos a las costas (~ 250 km) se muestran en la Figura 3.15c. Los resultados resaltan que las tasas de precipitación son mayores sobre el continente en los primeros 150 km de distancia desde el centro de los CTs del EP, en comparación con los CTs del NA (Fig. 3.15b). Sin embargo, esta señal cambia después de los 150 km. Los CTs del NA tienen tasas de precipitación mayores a los CTs del EP en radios de 250-750 km. Por su parte, los CTs cercanos a las costas tienen un comportamiento similar que los resultados de considerar todas las posiciones de los CTs (Fig. 3.15a; 3.15c).

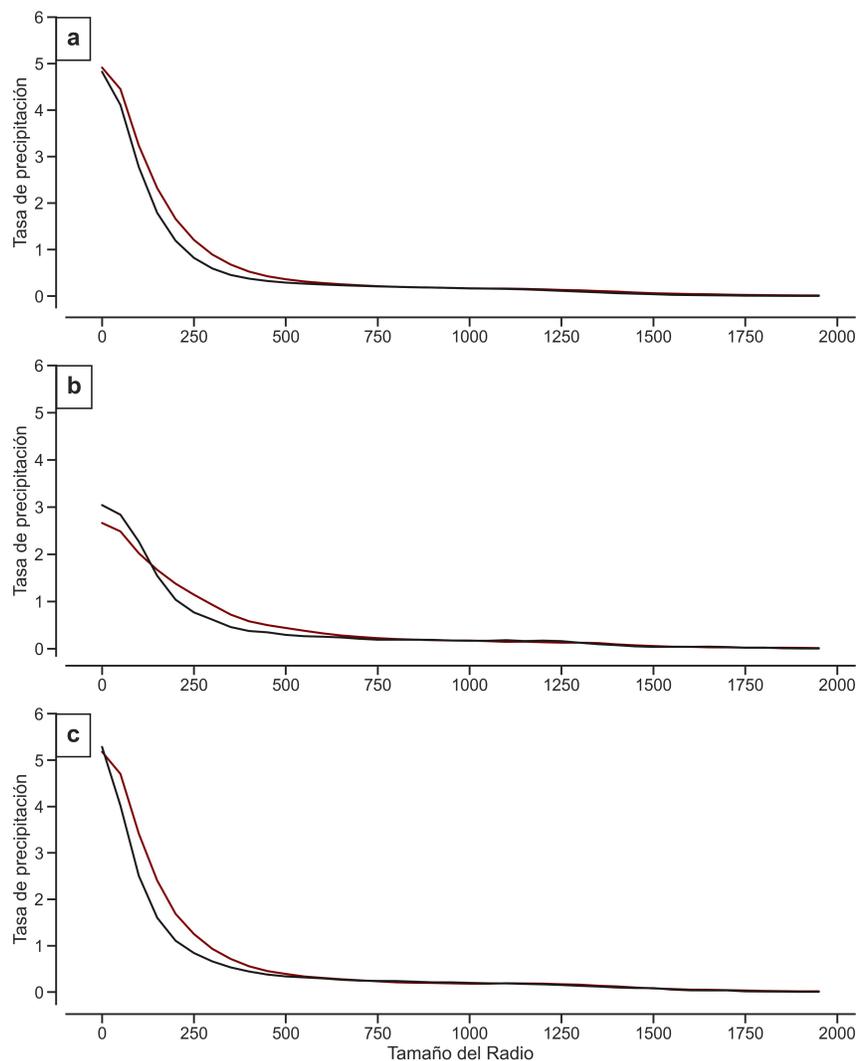


FIGURA 3.15. Tasa de precipitación (mm h^{-1}) de IMERG del CT en función del radio (km), medido por la técnica de anillos, para (a) todas las posiciones, (b) posiciones sobre continente y (c) posiciones que se encuentren al menos a 250 km de la costa. La línea roja representa los CTs del NA y la línea negra representa los CTs del EP.

La Figura 3.16 muestra las tasas de precipitación por cuadrante, presentados por perfil a partir de los anillos planteados desde el centro de la tormenta, y por cuenca. Sobre el NA (Fig. 3.16a), la tasa de precipitación es diferente entre los cuadrantes, hasta el radio de 750 km. Sin embargo, esta diferencia entre las tasas de los cuadrantes es menor en los CTs del EP, ya que hasta los 500 km existen diferencias claras (Fig. 3.16b).

Sobre el NA, el cuadrante *RNE* tiene la mayor tasa de precipitación hasta los 750 km, en comparación con los demás cuadrantes (Fig. 3.16a). Sobre el EP, la tasa de precipitación más grande ocurre sobre el cuadrante *RSO* hasta los 500 km (Fig. 3.16b). Los resultados sugieren que este cuadrante es más importante en el EP por

una posible interacción con la ITCZ (Berry & Reeder, 2014).

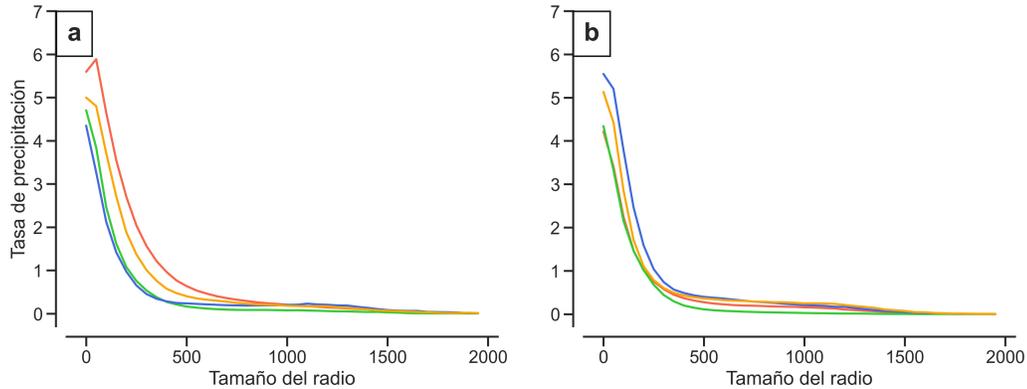


FIGURA 3.16. Tasa de precipitación (mm h^{-1}) de IMERG por tamaño del cuadrante del CT (km), definido por ROCLLOUD, sobre: (a) NA y (b) EP. La línea roja representa el cuadrante RNE, la línea verde representa el cuadrante RNO, la línea azul representa el cuadrante RSO y la línea amarilla representa el cuadrante RSE.

La correlación de Spearman entre los perfiles de PCT de los cuadrantes de los CTs del NA, definido por la técnica de anillos, y la PCT de IMERG muestra que la máxima correlación ocurre a los 600-700 km (Fig. 3.17a). Sin embargo, la correlación del tamaño promedio tiene su máximo en los radios de 1300-1400 km de los CTs del NA. Los cuadrantes RNE, RSE y RSO de los CTs del EP se comportan de manera similar a los del NA (Fig. 3.17b). Sin embargo, el cuadrante RNO del EP tiene una correlación de 0.6 en 200-600 km de distancia, siendo mayor en comparación con el RNO del NA.

Estos resultados sugieren que las PCT más intensas resultan en un tamaño de CT más grande y por ende, más peligroso. Estudios recientes de climatologías del tamaño de CTs encuentran que en las cuencas ciclogénéticas más húmedas, como el Pacífico del Oeste y el NA, se espera que los CT grandes produzcan precipitaciones intensas en un áreas geográficas más grandes que los CTs pequeños (Kim y col., 2020; Lavender & McBride, 2021; Pérez-Alarcón y col., 2021).

Las tasas de precipitación más intensas se encuentran confinadas en los primeros 250 km de distancia desde el centro, de acuerdo al perfil generado por los anillos, de los huracanes intensos (cat. 3, 4 y 5) en ambas cuencas (Fig. 3.18). Es interesante notar que las tasas de precipitación son menores para las DTs, TTs y HUR 1-2 en los primeros 250 km de los CTs en ambas cuencas. Sin embargo, no existe una diferencia entre las tasas de precipitación después de los 250 km para CTs con diferentes intensidades.

Lo anterior es válido para ambas cuencas. Este resultado coincide con un estudio previo en el que señalan que los CTs más intensos tienden a concentrar la precipitación más intensa cerca de la pared del ojo (Lin y col., 2015; Zhou & Matyas, 2021).

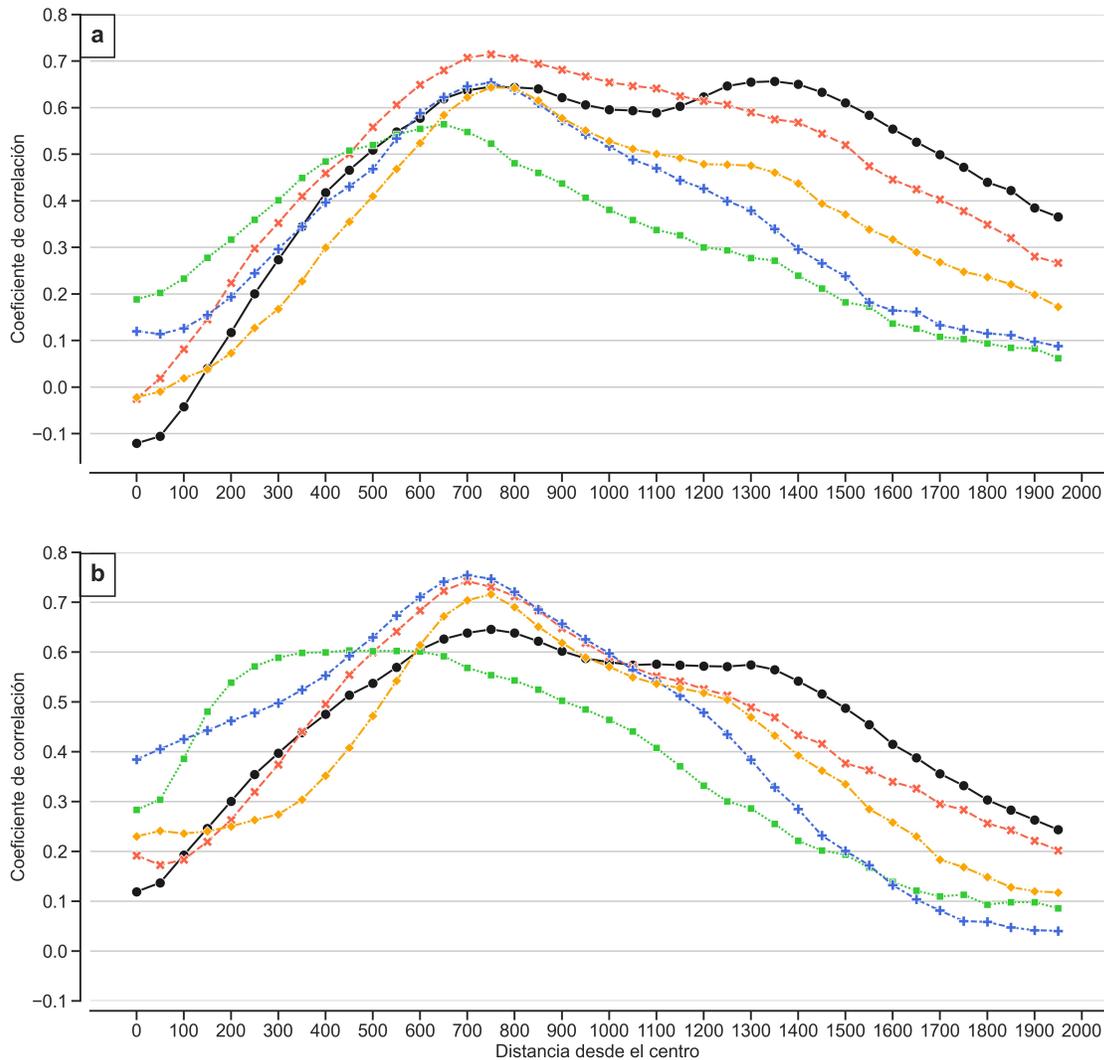


FIGURA 3.17. Correlación de Spearman entre el tamaño del CT (km), definida por la técnica de anillos cada 50 km, y los valores de la PCT de IMERG para la cuenca: (a) NA y (b) EP. La línea negra representa el radio promedio, la línea roja representa el cuadrante RNE, la línea verde representa el cuadrante RNO, la línea azul representa el cuadrante RSO y la línea amarilla representa el cuadrante RSE. Los valores son estadísticamente significativos a un nivel del 95 % de confianza, excepto en los radios de 0-100 km y mayores a 1800 km.

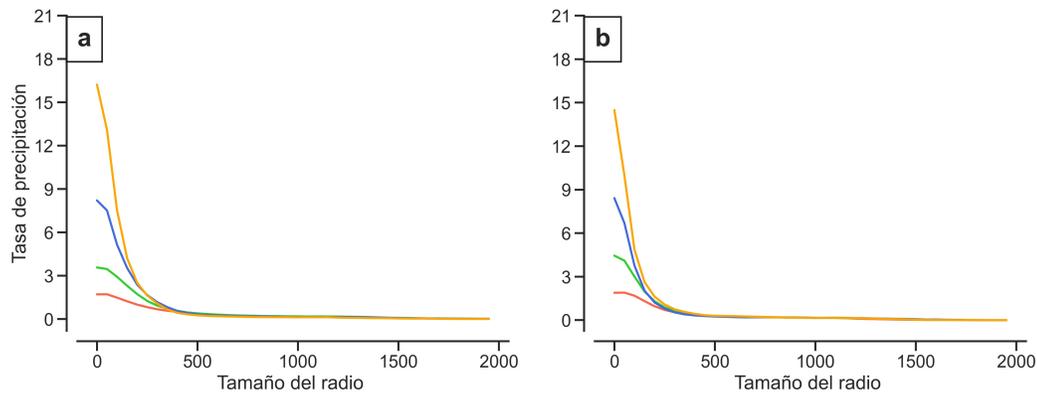


FIGURA 3.18. Tasa de precipitación (mm h^{-1}) de los CTs dependiendo de su intensidad y tamaño (km), usando perfiles radiales a partir de la técnica de anillos, para las cuencas: (a) NA y (b) EP. La línea roja representa las DTs, la línea verde representa las TTs, la línea azul representa los HUR 1-2 y la línea amarilla los HUR 3-5.

La Figura 3.19 muestra las tasas de precipitación de acuerdo a la clasificación de los CTs en grandes, pequeños y promedio, usando los rangos intercuartílicos del tamaño calculado por ROCCLOUD. Los CTs pequeños y promedio de ambas cuencas concentran tasas de precipitación de 5.5 mm h^{-1} dentro de sus primeros 250 km desde el centro. En radios más grandes, la tasa de precipitación decae hasta menos de 0.5 mm h^{-1} en los CTs de ambas cuencas. Por su parte, los CTs grandes tienen tasas de precipitación de $0.5 - 1.0 \text{ mm h}^{-1}$ desde los 250 km hasta los 1250 km y su tasa es mayor en comparación con los CTs pequeños y promedio de ambas cuencas. Se puede concluir de estos resultados que los CTs grandes afectan áreas más grandes a una tasa de precipitación mayor que los CTs pequeños y promedio, lo que los vuelve más peligrosos.

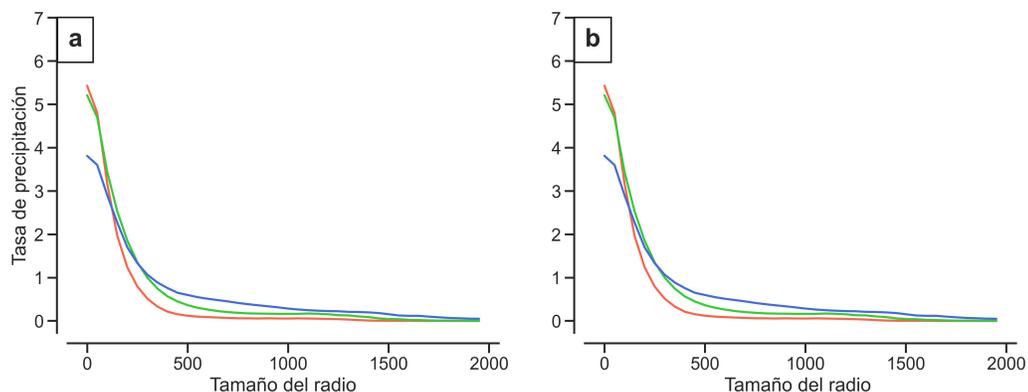


FIGURA 3.19. Tasa de precipitación (mm h^{-1}) de los CTs en función de su tamaño (km), definido por los rangos intercuartílicos del tamaño definido por ROCCLOUD, en las cuencas: (a) NA y (b) EP. La línea roja representa los CTs pequeños, la línea verde representa los CTs promedio y la línea azul representa los CTs grandes.

Yuan y col. (2021) encontraron que la PCT de IMERG subestima eventos de precipitación mayores a $150 \text{ mm } h^{-1}$. Por ello, es necesario analizar el tamaño de distribución de lluvia y su relación con la PCT usando CHIRPS, con la finalidad de comparar resultados usando diferentes bases de datos. La Figura 3.20 muestra los perfiles radiales, definidos por la técnica de anillos, de la PCT en ambas cuencas, utilizando los datos CHIRPS. El tamaño de los CTs del NA concentran una precipitación de hasta $12 \text{ mm } dia^{-1}$ en los primeros 250 km sobre el continente.

Después de esta distancia desde el centro, la precipitación disminuye drásticamente. La PCT de los CTs del EP alcanza hasta $\sim 4 \text{ mm } dia^{-1}$ en los primeros 100 kilómetros, después mantiene una precipitación constante desde los 250 km hasta los 750 km, siendo esta PCT menor en comparación con los CTs del NA. Los resultados de CHIRPS son similares a los encontrados usando IMERG, pero diferentes en la magnitud de PCT. Es importante mencionar que el número de posiciones se reduce considerablemente al considerar solamente CTs sobre el continente.

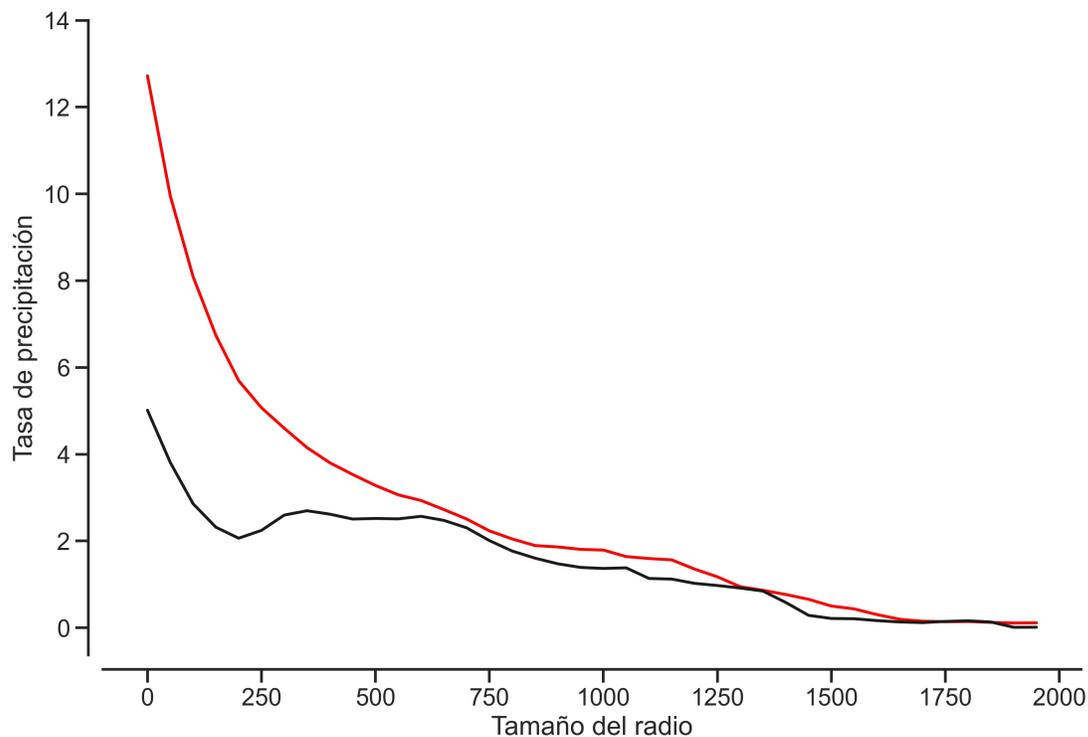


FIGURA 3.20. Tasa de precipitación ($\text{mm } h^{-1}$) del CTs en función de su tamaño (km), definido por los rangos intercuartílicos del tamaño definido por ROCCLOUD, en las cuencas: (a) NA y (b) EP. La línea roja representa los CTs pequeños, la línea verde representa los CTs promedio y la línea azul representa los CTs grandes.

También, se analizaron los perfiles por cuadrante, utilizando la técnica de anillos, para cada cuenca usando CHIRPS (Fig. 3.21). Sobre el continente, los cuadrantes de los CTs del NA tienen un comportamiento similar en los primeros 250 km de distancia desde el centro del CT, decayendo su lluvia desde $\sim 12 \text{ mm } dia^{-1}$ hasta ~ 6

mm dia^{-1} (Fig. 3.21a). Es interesante mencionar que el radio RNE en las distancias de 500 km hasta 1250 km tiene una PCT constante de 4 mm dia^{-1} .

El comportamiento de los perfiles de la PCT que provienen del EP, y que hacen *landfalling* de acuerdo a su cuadrante, es más heterogéneo (Fig. 3.21b), en comparación con los CTs que provienen del NA. El radio *RNE* (*RSE*) tiende a decaer en su precipitación sobre continente hasta los ~ 250 km, pero después aumenta su precipitación, llegando hasta ~ 6 mm dia^{-1} (~ 2 mm dia^{-1}), desde los 250 km hasta los 1000 km sobre continente (Fig. 3.21b). Esto podría estar relacionado con el número escaso de posiciones que se usaron en esta cuenca ($N = 191$). Los CTs del EP producen una precipitación importante en los cuadrantes que interactúan con el territorio (*i.e.* *RNE* y *RSE*).

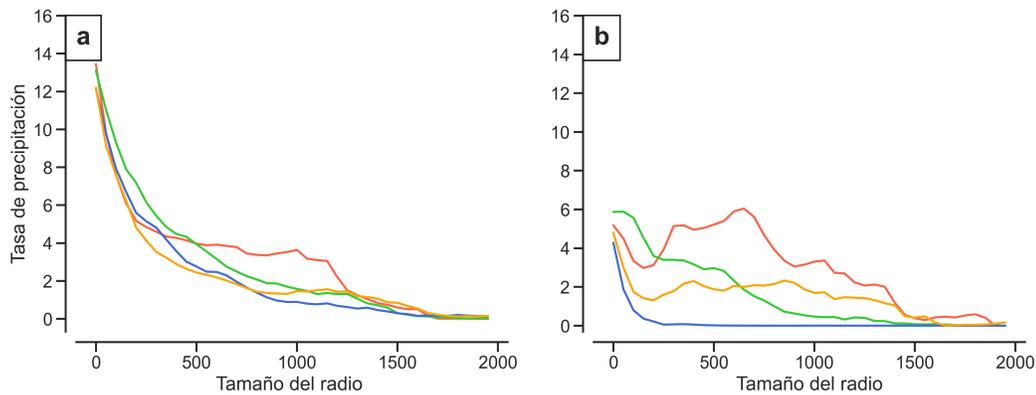


FIGURA 3.21. Precipitación diaria (mm dia^{-1}) del CT por tamaño de los cuadrantes (km), definido por la técnica de anillos, para la cuenca: (a) NA y (b) EP, usando los datos CHIRPS. La línea roja representa el cuadrante RNE, la línea verde representa el cuadrante RNO, la línea azul representa el cuadrante RSO y la línea amarilla representa el cuadrante RSE.

3.3. Relaciones estadísticas entre la precipitación y las variables medioambientales

En esta sección se investiga la relación del tamaño del CT, definido por RO-CLOUD, con las variables medioambientales para poder predecir la PCT. Para ello, se construyeron modelos GEEs, que miden el peso que cada variable debe tener para predecir la PCT y son no paramétricos (Zhou y col., 2018).

Se analizaron relaciones estadísticas entre las variables medioambientales usando el tamaño promedio y el tamaño por cuadrante, definido por RO-CLOUD. Sin embargo, se determinó que el uso del radio promedio servía mejor para predecir la PCT, en lugar del uso de radios por cuadrantes. Lo anterior es debido a que las variables medioambientales a gran escala no varían en unos cuantos kilómetros (Konrad & Perry, 2010; Perez-Estrada, 2020; Zhou & Matyas, 2021).

En el caso de los CTs grandes, las variables ambientales pueden tener una mayor influencia del ambiente, que en los CTs pequeños (Knaff y col., 2014; Mok y col., 2018). Por ello, los promedios ponderados de las variables medioambientales dan un mayor peso a las regiones centrales del CT (de hasta ~ 500 km de distancia del centro del CT) y un menor peso a las regiones más alejadas del centro (a partir de los 1000 km).

Las distribuciones de las variables medioambientales (Tabla 3.7) no son normales, de acuerdo con el test de Lilliefors. Por ello, se usa la correlación de Spearman para determinar sus relaciones con la PCT. Se utilizan dos aproximaciones para obtener estas correlaciones:

1. Se considera la distribución de los cúmulos de la PCT del algoritmo RBP, siguiendo el método propuesto por Zhou y col. (2018),
2. Se considera la lluvia acumulada diaria propuesta por IMERG, en el área constituida por los cuatro cuadrantes, definida por ROCLOUD, siguiendo el método propuesto por Lavender y McBride (2021) y Perez-Estrada (2020).

Cabe mencionar que estas correlaciones se obtuvieron usando todas las posiciones, cada 6h, de los CTs con al menos dos posiciones dentro de la región de estudio. Las correlaciones que se obtuvieron sirvieron para determinar los dos valores de la PCT adecuados para construir los modelos GEEs.

La Tabla 3.7 enumera los coeficientes de correlación de Spearman entre los atributos de la PCT y las variables medioambientales. Los resultados muestran que todas las variables tienen correlaciones estadísticamente significativas al relacionarlas con la lluvia acumulada diaria del CT en ambas cuencas.

TABLA 3.7. *Coefficientes de la correlación de Spearman entre las variables medioambientales y las distribuciones de los cúmulos, definidos por el algoritmo RBP, y correlación con la precipitación acumulada diaria considerando el área total del tamaño del CT, definido por ROCLOUD, para las cuencas NA y EP durante el periodo 2000-2020. El asterisco representa los valores significativos a un nivel de confianza del 99 %.*

<i>Variable</i>	Coeficiente de correlación con el tamaño de distribución de la PCT		Coeficiente de correlación de la lluvia acumulada considerando su área total	
	<i>NA</i>	<i>EP</i>	<i>NA</i>	<i>EP</i>
V_{max}	0.15*	-0.23*	0.38*	0.23*
R_p	0.74*	0.75*	0.57*	0.61*
PNM	0.1	0.19*	-0.43*	-0.24*
HE	-0.01	0.09	0.34*	0.43*
HR	-0.01	0.1	0.29*	0.45*
AP	-0.12*	-0.16*	0.29*	0.2*
CIZ	0.19*	0.1*	0.35*	0.14*
DIV	-0.18*	-0.02	0.36*	0.48*
VV	0.0	-0.11*	-0.56*	-0.6*
VOR	-0.17*	-0.41*	0.16*	-0.24*

Algunas variables medioambientales tienen correlaciones significativas usando la distribución de los cúmulos del CT en ambas cuencas. Por ello, se seleccionó la lluvia acumulada diaria en el área definida por los cuatro cuadrantes para construir los modelos estadísticos. Considerando la termodinámica, la humedad específica a 600 hPa (*HE* en la Tabla 3.7 y 3.8) tiene correlaciones más altas en ambas cuencas, en comparación con la humedad relativa al mismo nivel y el agua precipitable (*HR* y *AP* en la Tabla 3.7 y 3.8). Por ello, se optó por usar la *HE* en los modelos GEE. Esta variable también ha sido usada en otros estudios (Zhou et al. 2018; Zhou y Matyas, 2018).

Con respecto a las variables dinámicas, la divergencia a 200 hPa (*DIV* en la Tabla 3.7 y 3.8), la velocidad vertical del viento a 500 hPa (*VV* en la Tabla 3.7 y 3.8), la cizalla vertical del viento (*CIZ* en la Tabla 3.7 y 3.8), la Velocidad Máxima del Viento (V_{max}) y la presión al nivel del mar (*PNM*, en la Tabla 3.7 y 3.8) tienen correlaciones mayores a 0.25 en ambas cuencas. Es interesante notar que la vorticidad a 200 hPa (*VOR* en la Tabla 3.7) tiene correlación menor a 0.25, aunque es estadísticamente significativas. El estudio de Zhou y col. (2018) encuentran que la fuerte divergencia del viento en los niveles superiores induce que la masa de aire tropical transporte contenido de humedad en niveles medios, lo que a su vez aumenta la producción de lluvia.

Así que, se seleccionaron solamente las variables que tienen coeficientes de correlación mayores a $|0.3|$ a un nivel de confianza de 99%; es decir, se usó la *HE*, la *DIV* a 200 hPa, la *VV* a 500 hPa y la V_{max} como predictores de la lluvia acumulada diaria del CT, obtenida del IMERG, confinada en el área del CT, definido por ROCLOUD. Así, se construyó un modelo GEEs por cuenca (Tabla 3.8). Se usaron las métricas del RMSE (entre menor sea su valor, el modelo es mejor) y el QIC el cual es similar al RMSE pero utilizado durante los cálculos de modelos GEEs.

Los valores de RMSE son 0.53 y 0.49 para la lluvia acumulada dentro del área de los CTs del NA y EP, respectivamente. Ambos RMSE tienen magnitudes parecidas. Sin embargo, el modelo de la cuenca EP tiene ligeramente una mayor habilidad al tener un RMSE más pequeño, en comparación con el modelo de NA.

TABLA 3.8. *Coefficientes y estimación de modelos de la lluvia acumulada diaria en el área del CT para la cuenca NA y EP. Unidad de PCP: 10^4 mm.*

<i>Variables</i>	<i>Coefficientes del modelo NA</i>	<i>Coefficientes del modelo EP</i>
Intersección con el eje	1.366	-1.745
V_{max}	0.001	0.002
R_p	0.023	0.022
<i>PNM</i>	-0.00	-0.002
<i>HE</i>	2.114	2.089
<i>CIZ</i>	0.042	0.020
<i>DIV</i>	180.4	186.40
Número de casos	4526	6993
RMSE	0.529	0.498
QIC	453	699

Los coeficientes de los modelos GEEs para la cuenca del NA y EP muestran que la *DIV* es la variable que tiene un mayor peso. Este resultado coincide con otros estudios recientes, que encontraron que el flujo de salida en niveles superiores juega un papel importante en la intensificación de la tormenta, el tamaño de la tormenta o en la producción de lluvia del CT (Konrad & Perry, 2010; L. Wu y col., 2015; Zhou y col., 2018).

La segunda variable que tiene un gran peso en la lluvia acumulada diaria del CT es la *HE*. Este resultado coincide con Hill y Lackmann (2009), quienes mencionan que la humedad expande el tamaño de los CTs y, por lo tanto, induce que produzcan más precipitación, en comparación con los CTs situados en ambientes secos y que tienen una extensión pequeña del campo de viento.

Por su parte, la *CIZ* induce que los CTs sean asimétricos y más dispersos (Jiang y col., 2008; Konrad & Perry, 2010; Zhou & Matyas, 2021). Es interesante mencionar que la *CIZ* del modelo de NA tiene un coeficiente más grande que en el modelo de EP. Camargo y col. (2007) menciona que la *CIZ* juega un papel crucial en el comportamiento de los CTs del NA.

Los parámetros con menor peso son el tamaño promedio (R_p ROCCLOUD), V_{max} y la *PNM*. Los resultados sugieren que R_p tiene un cuarto orden de importancia para determinar la lluvia acumulada diaria. La *DIV*, *HE* y *CIZ* juegan un papel más importante que R_p , sugiriendo que estas variables medioambientales actúan por sí solas como moduladoras de la PCT y de su tamaño.

La intensidad máxima del viento es un predictor usado en los modelos GEEs, aunque tiene un peso pequeño. Varios estudios han demostrado que no hay una relación aparente con la PCT (Breña-Naranjo y col., 2015; Dominguez & Magaña, 2018; Hidalgo y col., 2020). Por su parte, la *PNM* tiene coeficientes negativos y pequeños, indicando una relación negativa y poco influyente en la PCT. Quiring y col. (2011) explica que valores menores de *PNM* están generalmente asociados a tormentas más grandes.

3.4. Métricas de forma de los Ciclones Tropicales

La forma de los CTs se mide a través de las métricas de Dispersión (*D*), Asimetría (*A*) y Solidez (*S*) para ambas cuencas, considerando todas las posiciones, reportadas cada 6h, de los CTs durante el periodo de estudio.

Los valores de *D* se encuentran principalmente en un rango que comprende 0.2 - 0.6, con una kurtosis hacia a la izquierda, indicando que el ~25% de los CTs de ambas cuencas tienden a concentrar las bandas nubosas más cerca de su centro (Fig. 3.22c ; 3.22d).

La métrica *A* tiene un comportamiento sesgado hacia la derecha; es decir, hacia los valores cercanos a 1, indicando que los CTs en ambas cuencas tienden a ser asimétricos (Fig. 3.22a ; 3.22b).

Por su parte, los valores de S oscilan de 0.0 a 0.4, mostrando que un $\sim 30\%$ de los CTs de ambas cuencas tienden a no ser sólidos, por lo que puede haber cuadrantes del CT que no tengan bandas nubosas (Zhou & Matyas, 2021) (Fig. 3.22e ; 3.22f).

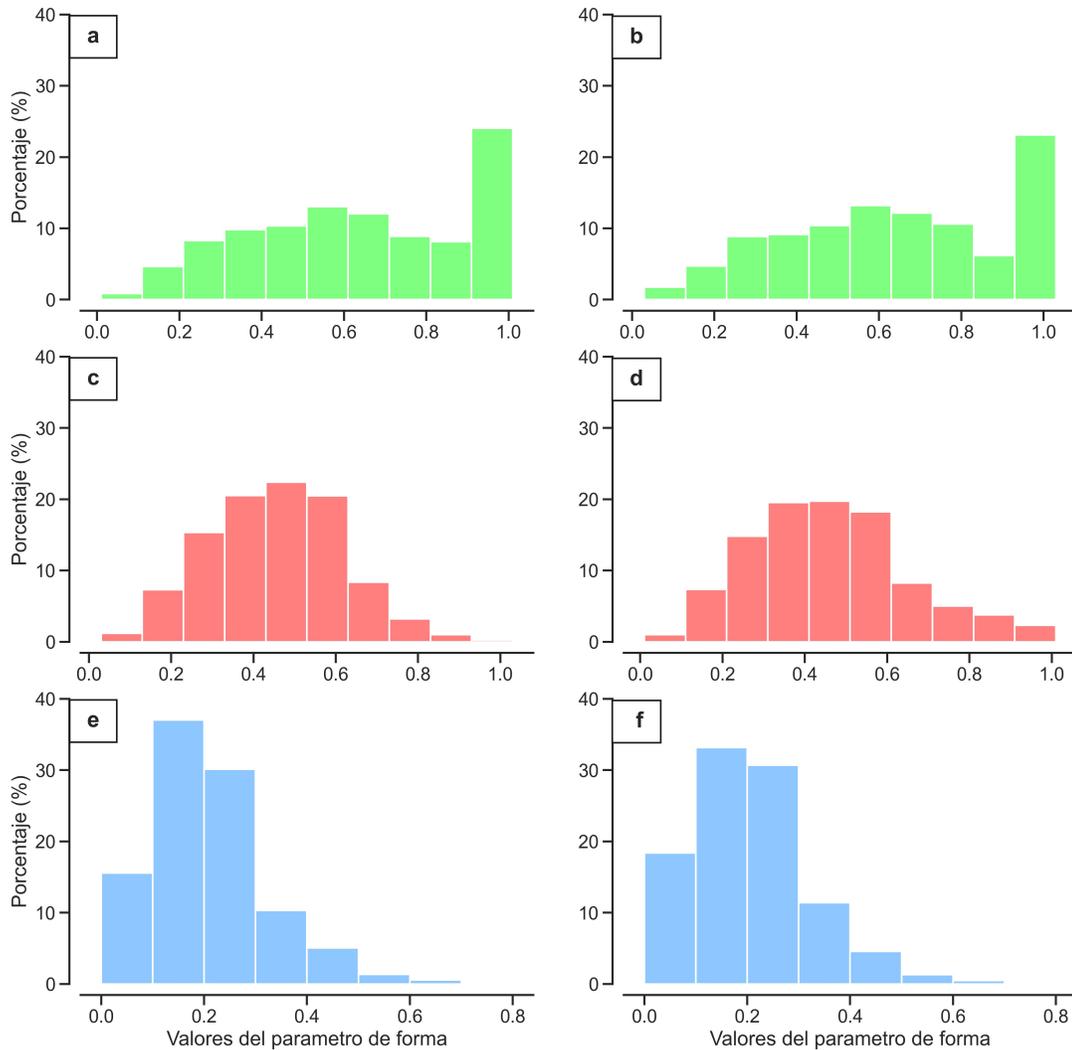


FIGURA 3.22. Frecuencia relativa (%) de las métricas de forma de los CTs de la cuenca NA (a,c,e) y EP (b,d,f) durante el periodo de 2000 al 2020. Las barras verdes corresponden a la asimetría (a,b). Las barras rojas (c,d) corresponden a la dispersión y las barras azules corresponden a la solidez (e,f).

Las estadísticas descriptivas de las tres métricas de forma, considerando todas las posiciones de los CTs durante el periodo de estudio, se muestran en la Tabla 3.9. En promedio, la métrica D tiene un valor de 0.5 ± 0.2 (la desviación estándar) en ambas cuencas (Tabla 3.9). Interesantemente, la D en ambas cuencas se comporta de manera similar en el promedio, los rangos intercuartílicos, los máximos y mínimos.

La métrica A tiene, en promedio, 0.7 ± 0.3 (la desviación estándar) en ambas cuencas. Este resultado coincide con los resultados de la Figura 3.22, indicando que

los CTs de ambas cuencas tienden a ser asimétricos. Esta métrica también tiene valores parecidos en ambas cuencas. Sus rangos intercuartílicos del 25 % y 75 % varían de 0.4 a 0.9, respectivamente, en ambas cuencas.

Por su parte, la métrica S tiene un promedio de 0.2 ± 0.1 (la desviación estándar) en ambas cuencas, lo que demuestra que los CTs de ambas cuencas tienden a tener regiones sin bandas nubosas.

TABLA 3.9. *Estadísticas de la media, mediana, el primer y tercer cuartil (25 % y 75 % respectivamente), la desviación estándar de las métricas de forma durante el periodo 2000-2020 para ambas cuencas.*

	Promedio	Desviación Estándar	Mediana	Percentiles		Min	Max
				25 %	75 %		
Atlántico Norte							
D	0.5	0.2	0.5	0.3	0.6	0.03	0.9
A	0.6	0.3	0.6	0.4	0.9	0.01	1.00
S	0.2	0.1	0.2	0.1	0.3	0.0	0.8
Pacífico Noreste							
D	0.5	0.2	0.4	0.3	0.6	0.01	0.9
A	0.7	0.3	0.7	0.4	0.9	0.03	1.0
S	0.2	0.1	0.2	0.1	0.3	0.0	0.8

3.4.1. Características de la forma y el tamaño del CT

En esta sección se relacionan la forma del CT con los tamaños del CT promedio, definido por la técnica ROCLOUD, con su distinción de tamaño y categoría. Las Figuras 3.23 y 3.24 muestran la dispersión de las métricas de forma en función del R_p obtenido con ROCLOUD. En la cuenca NA (Fig. 3.23), la distribución por tamaño del CT indica que no existe una señal clara en ninguna de las tres métricas. Distintos tamaños promedio del CT tienen valores de 1 en las métricas de forma. En especial, los valores de A varían desde 0.0 hasta 1.0. Sin embargo, la mayoría de sus valores son más grandes que 0.5, indicando que los CTs del NA tienden a ser asimétricos. En la cuenca EP (Fig. 3.24), tampoco existe una señal clara en las métricas de forma en función del tamaño promedio de los CTs. Sin embargo, la variabilidad de D en distintos tamaños indicó que los CTs suelen ser más dispersos en radios promedio de hasta 1000 km. Un resultado similar ocurre en la métrica S , los radios menores a 1000 km tienen valores entre 0.0 y 0.6, indicando que los CTs suelen tener regiones sin bandas nubosas. En ambos gráficos, los centros de la densidad de probabilidad se ubican entre los radios de 500-1000 km. Lo anterior demuestra que existe una mayor probabilidad de que los CTs en ambas cuencas sean menos sólidos (<0.5), asimétricos (>0.5) y medianamente dispersos (~ 0.5).

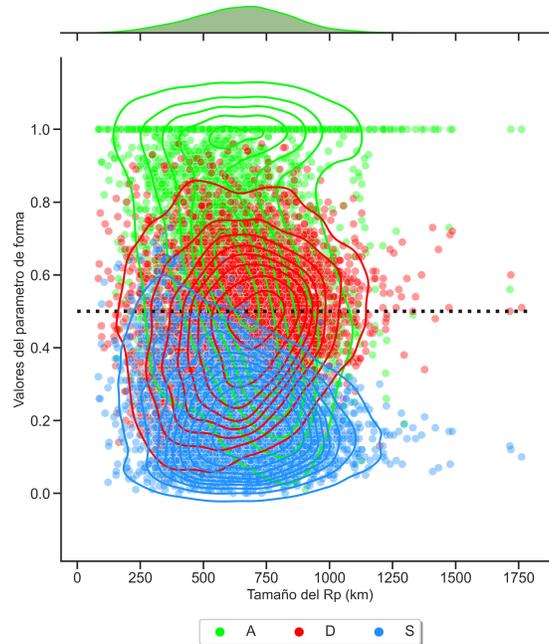


FIGURA 3.23. Diagrama de dispersión y densidad de probabilidad de las métricas de forma en función del tamaño promedio (km) de los CTs del NA, definidos por el algoritmo ROCCLOUD, durante el periodo 2000-2020. La línea punteada negra indica un valor de parámetro de 0.5. Los colores verdes corresponden a la A. Los colores rojos corresponden a la D y los colores azules corresponden a la S.

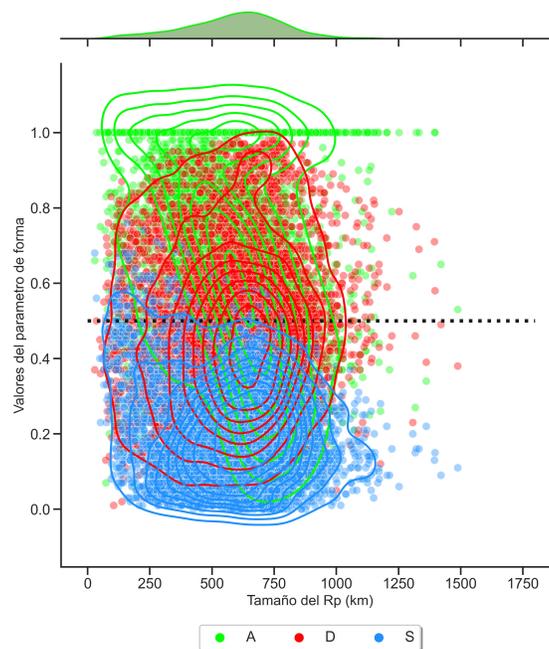


FIGURA 3.24. Como en la Fig. 3.23, pero para los CTs del EP.

Se analizó la distribución espacial de estas métricas para determinar si existe alguna predominancia en ciertas regiones geográficas. La Figura 3.25 muestra la distribución espacial de la métrica D en la región de estudio. Los CTs en ambas cuencas y sobre océano tienen valores menores a 0.4, indicando que sus bandas nubosas se acercan más al centro del CT. Sin embargo, al interior de la parte continental, tienen valores mayores a 0.5, siendo más dispersos. Lo cual puede estar relacionado a la interacción de las bandas nubosas con la topografía (Zhu & Aguilera, 2021), haciendo que los flujos de humedad y los cúmulos se dispersen lejos del centro del CT. Esta métrica podría ser un indicador adecuado del potencial peligro de la distribución de la PCT.

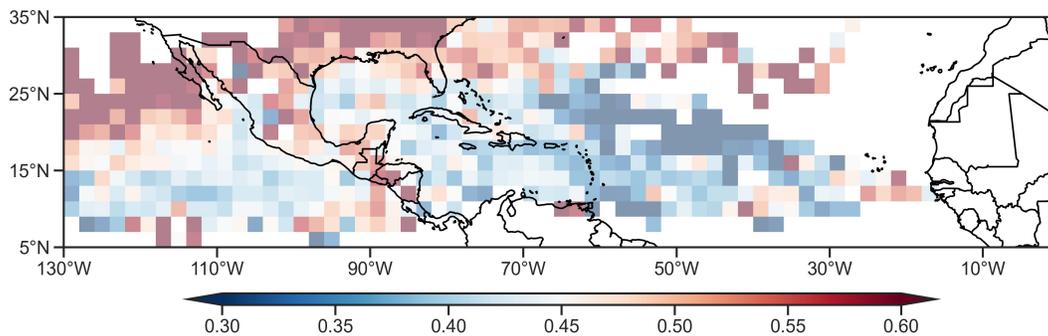


FIGURA 3.25. *Distribución espacial en una malla de $2^\circ \times 2^\circ$ de la métrica de D de los CTs analizados. Los rangos de color en la escala fueron determinados por los rangos intercuartílicos.*

La figura 3.26 muestra la distribución espacial de la métrica A . Los CTs que existen en latitudes tropicales (menor a 23.5°N) tienen valores menores de 0.6, indicando que tienden a tener una simetría en la distribución de bandas nubosas con respecto al centro del CT. Los CTs ubicados al norte de 20°N son asimétricos, valores mayores a 0.6, es decir, trayectorias hacia latitudes medias transicionan a ciclones extratropicales, expandiendo su tamaño y haciéndose más asimétricos (Zick & Matyas, 2016). Existen CTs asimétricos ($A > 0.6$) en la región noroeste del país, esto podría ser debido a que la temperatura de la superficie del mar es menor a 26°C (Dominguez, 2012) y esto impacta la organización de las bandas nubosas.

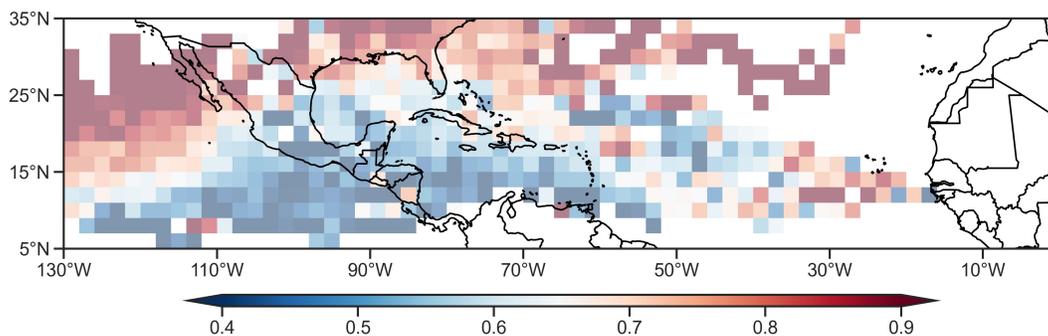


FIGURA 3.26. *Como en la Fig. 3.25, pero para A*

Finalmente, la figura 3.27 muestra la distribución espacial de la métrica S (Zhou & Matyas, 2021). Esta métrica se comporta de manera parecida a la métrica A (Fig. 3.26), ya que los valores mayores a 0.22 se encuentran en los trópicos. Lo anterior demuestra que los CTs ubicados al sur de 20°N tienen en sus cuadrantes bandas nubosas. Los valores de los CTs ubicados al norte de 20°N tienen valores cercanos a 0, indicando que los CTs pueden tener cuadrantes sin bandas nubosas, probablemente debido a su transición extratropical. Las posiciones con mayor solidez se encuentran en las regiones ubicadas en el centro del NA (océano abierto).

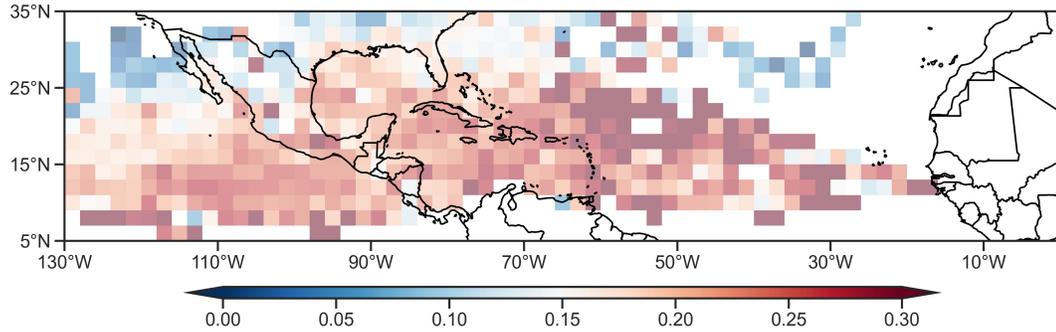


FIGURA 3.27. Como en la Fig. 3.25, pero para S

Se exploró el cambio temporal de las métricas de forma 24 h antes (-24h) y 24 h después (24h) de hacer *landfalling* (Fig. 3.28). La D y A de los CTs tienden a incrementar ligeramente después de hacer *landfalling* en ambas cuencas, debido a la interacción de las bandas nubosas con la topografía, como ya se ha discutido antes. Los valores de S de los CTs en ambas cuencas no varían horas antes y después de hacer *landfalling*. Es interesante notar que, en promedio, S se mantiene cercano a 0.2 (regiones dentro CT sin bandas nubosas), con un error estándar pequeño, en comparación con las áreas sombreadas de D y A .

Se realizó un análisis de las métricas de forma en función de su intensidad tomando en cuenta todas las posiciones de los CTs durante el periodo de 2000-2020. La Figura 3.29 muestra que el comportamiento de las métricas de forma por categoría es similar en ambas cuencas. En general, los CTs de NA y EP son asimétricos y dispersos cuando son DTs. Reducen su grado de asimetría y dispersión conforme adquieren una mayor intensidad (TT, HUR 1-2, HUR 3-5). Por el contrario, la métrica de solidez tiene un comportamiento opuesto, conforme incrementa la intensidad del CT, sus bandas nubosas se vuelven más organizadas.

Cabe mencionar que existe una mayor variabilidad de las métricas D y S en la cuenca EP (Fig. 3.29b), en comparación con la cuenca NA (Fig. 3.29a). Estos resultados muestran que conforme incrementa la intensidad del CT, se organizan mejor en su estructura y en sus bandas nubosas, pero reducen su tamaño (Breña-Naranjo y col., 2015; C. Matyas & Tang, 2019; Touma y col., 2019; Yang y col., 2022; Zick & Matyas, 2016).

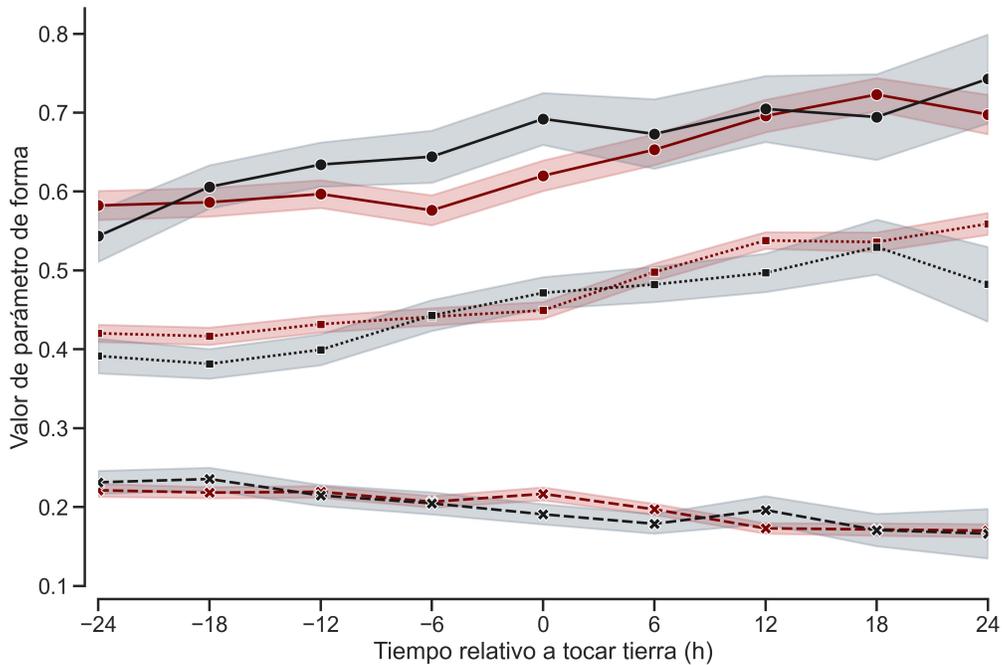


FIGURA 3.28. Comportamiento promedio de las métricas de forma de los CTs de la cuenca NA (en rojo) y EP (en negro) 24h antes (-24) y 24h después (24) de hacer landfalling. Las líneas con viñetas cuadradas representan la métrica D. Las líneas con viñetas circulares representan la métrica A. Las líneas con viñetas de cruz representan la métrica S. Las áreas sombreadas proporcionan el error estándar asociado a cada valor medio de las métricas.

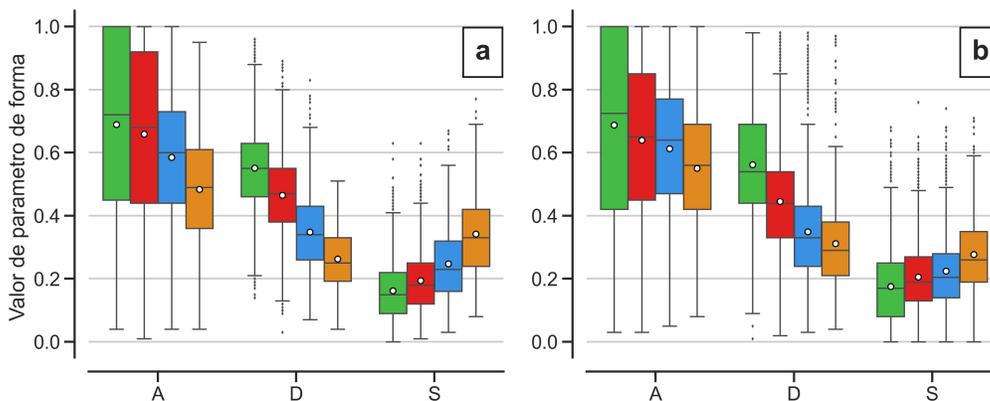


FIGURA 3.29. Cajas y bigotes de las distribuciones de las métricas de forma (D, A y S) de los CTs de la cuenca: (a) NA y (b) EP en función de la intensidad de los CTs durante el periodo 2000-2020. Los puntos blancos dentro de las cajas representan el promedio. Las cajas verdes representan DTs. Las cajas rojas representan TTs. Las cajas azules representan HUR 1-2 y las cajas amarillas representan HUR 3-5.

La Figura 3.30 muestra las distribuciones de las métricas de forma, de acuerdo a su clasificación en CTs pequeños, CTs promedio y CTs grandes, usando los rangos intercuartílicos obtenidos por ROCLOUD, en ambas cuencas. El comportamiento de las métricas en función del tamaño es parecido en ambas cuencas. En la cuenca NA (Fig. 3.30a), los CTs pequeños son, en promedio, más asimétricos que los CTs promedio y los CTs grandes. Sin embargo, los CTs grandes tienen mayor variabilidad en los valores A , en comparación con los CTs pequeños. Por su parte, los CTs grandes tienden a ser más dispersos en comparación con los otros tamaños, como se ha sugerido por resultados previos de este trabajo. Los CTs pequeños tienen la mayor solidez, en promedio, y también alcanza valores más altos, en comparación con los otros tamaños (Fig. 3.30a).

Por su parte, la métrica D de los CTs del EP (Fig. 3.30b) es poco variable en los tres tamaños. La métrica A de los CTs del EP se comporta de manera similar a los CTs del NA, teniendo los CTs pequeños la mayor asimetría, en comparación con los demás tamaños. El valor de S de EP también se comporta como en NA. En general, los CTs grandes del EP son más dispersos, más simétricos y menos sólidos, en comparación con los CTs pequeños (Fig. 3.30b).

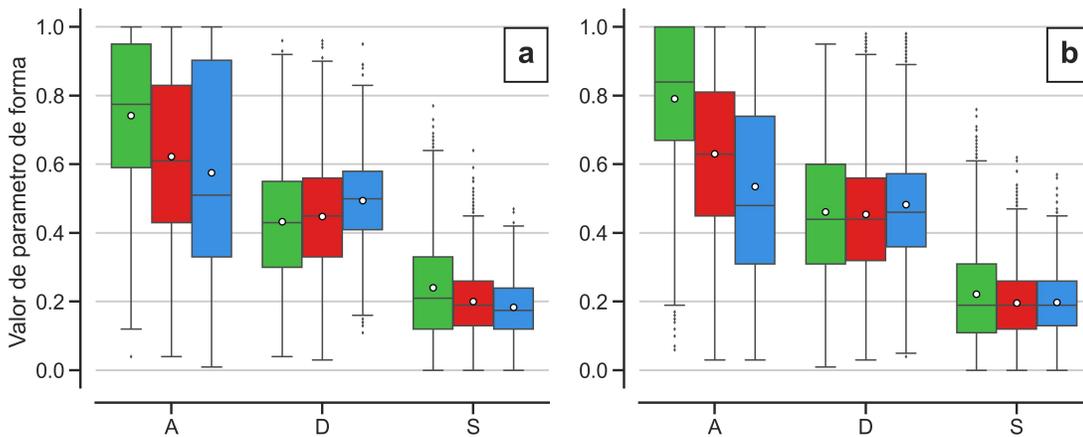


FIGURA 3.30. *Cajas y bigotes de las distribuciones de las métricas de forma (D , A y S) de los CTs de la cuenca: (a) NA y (b) EP, en función de los CTs pequeños ($p25$) y los CTs grandes ($p75$), definidos por el algoritmo ROCLOUD, durante el periodo 2000-2020. Los puntos blancos dentro de las cajas representan el promedio. Las cajas verdes representan los CTs pequeños. Las cajas rojas representan los CTs promedio. Las cajas azules representan los CTs grandes.*

3.4.2. Relación de las métricas de forma con la precipitación del CT

Esta sección correlaciona las métricas de forma con el tamaño promedio del CT en ambas cuencas, definido por el algoritmo RBP. Los coeficientes de correlación de Spearman (Tabla 3.10) de las métricas de forma con el tamaño promedio muestran

que los valores son pequeños en ambas cuencas. La métrica de forma D , considerando el tamaño promedio, tiene la mayor correlación en ambas cuencas. Lo que indica que, a mayores tamaños, mayor será la dispersión, como ya se ha discutido previamente.

Por su parte, las correlación de las métricas de forma con la PCT acumulada son mayores a 0.25 y son estadísticamente significativas. El valor más grande de correlación se encuentra en la métrica A de los CTs del EP, que indica que la acumulación de lluvia está inversamente relacionada con su asimetría. Los CTs que son más simétricos ($A \approx 0$) causarán más lluvia acumulada.

La métrica D tiene el valor más alto de la correlación, considerando la PCT acumulada, en los CTs del NA. Lo anterior sugiere que los CTs más dispersos producirán más lluvia y de acuerdo a la Figura 3.30a, tienden a tener un mayor tamaño. Sin embargo, es importante mencionar que la métrica D de los CTs del EP tienen también una correlación importante (0.54). Se puede deducir de este resultado, en conjunto con la Figura 3.30b, que los CTs del EP que son grandes son dispersos y pueden causar más lluvia acumulada.

TABLA 3.10. *Coefficientes de correlación de Spearman entre las métricas de forma con el tamaño promedio del CT considerando las bandas nubosas, definido por el algoritmo ROCLOUD y la lluvia acumulada en el área del CT, definida por el algoritmo RBP, para los CTs de NA y EP durante el periodo 2000-2020. El asterisco representa los valores significativos a un nivel de confianza del 99 %.*

Variable	Coeficiente de correlación con el tamaño promedio del CT		Coeficiente de correlación con la lluvia acumulada diaria en el área del CT	
	NA	EP	NA	EP
A	-0.02	-0.20*	-0.35*	-0.60*
D	0.38*	0.31*	0.48*	0.54*
S	-0.14*	-0.02	-0.28*	-0.39*

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

4.1. Conclusiones

Este estudio investiga el papel del tamaño del CT en la precipitación por medio del uso de imágenes satelitales IR, información operativa proveniente del NHC y perfiles de viento (Pérez-Alarcón y col., 2021; Willoughby y col., 2006). Se plantea el desarrollo de algoritmos capaces de medir la extensión radial de las ROIs, las bandas nubosas y la precipitación asociada al CT.

El algoritmo ROCLOUD determina el valor de cuatro cuadrantes, que determinan el tamaño promedio (R_p) de los CTs: radio del noroeste (RNO), radio del noreste (RNE), radio del suroeste (RSO) y radio del sureste (RSE) durante el periodo de junio del 2000 hasta noviembre del 2020. Así, se crea una climatología del tamaño de los CTs para las cuencas NA y EP.

Los resultados muestran que los CTs tropicales de la cuenca NA son más grandes que los del EP, en promedio. Estos resultados coinciden con estudios previos que usan otras técnicas (Knaff y col., 2014; Mok y col., 2018; Pérez-Alarcón y col., 2022). El RNE tiene la mayor extensión de los cuatro radios en ambas cuencas. Esto podría estar relacionado con su interacción con la topografía de las costas (Zhu & Aguilera, 2021) y la alberca de agua caliente que se encuentran en ambas cuencas (Dominguez & Magaña, 2018; Magaña & Caetano, 2005).

Además, no existe una relación entre la intensidad del CT y su tamaño definido por ROCLOUD. Es interesante mencionar que las DTs de la NA son más grandes que los HUR 3-5 del EP. La distribución espacial de los tamaños del CT, definido por ROCLOUD, no depende de la latitud, como sugieren otros estudios (Knaff y col., 2014; Pérez-Alarcón y col., 2021). La distribución temporal señala que los CTs más grandes, definidos por ROCLOUD, suelen ocurrir durante los meses de agosto-septiembre en ambas cuencas.

Se encontró que los tamaños del CT, definido ROCLOUD, están correlacionados con la distribución de las bandas nubosas, definido por el algoritmo RBP y estas correlaciones son estadísticamente significativas. Por su parte, la técnica de los anillos espaciados cada 50 km revela que las tasas de precipitación importantes se encuentran en los primeros 500 km de distancia desde el centro del CT, definido por el

NHC, en ambas cuencas.

Lavender y McBride (2021) encuentran este mismo resultado, pero utilizando otro producto satelital (TMPA) (Yuan y col., 2021). Esta técnica de anillos también mostró que las tasas de precipitación intensas se concentran en los primeros 250 km en huracanes intensos (cat. 3, 4 y 5), en los que la definición de tamaño del SIAT-CT podría funcionar. También, se encontró que, de manera general, los CTs tienen un radio de influencia en la precipitación asociada al CT (PCT) que supera los 750 km en ambas cuencas, usando datos de IMERG (que tiene datos de océano y continente) y CHIRPS (que tiene datos sólo sobre continente).

Se crearon modelos estadísticos (GEEs) para predecir la PCT por medio de variables medioambientales. Las variables con mayor correlación y peso en los GEEs son la *div* y la *he*. Estas variables tienen una explicación física que relaciona el transporte y contenido de humedad en el ambiente asociado, ayudando a que el CT produzca más lluvia y crezca en tamaño, en comparación con ambientes secos (Hill & Lackmann, 2009; C. J. Matyas & VanSchoick, 2021; Zhou & Matyas, 2021).

Finalmente, las métricas de forma Dispersión (D), Asimetría (A) y Solidez (S) muestran que, en promedio, los CTs de ambas cuencas tienden a ser más dispersos, asimétricos y menos sólidos. Los resultados de estas métricas indican que, a mayores tamaños, mayor será la dispersión. Los CTs que son más simétricos ($A \approx 0$) causarán más lluvia acumulada en el NA. Sobre ambas cuencas, se encontró que los CTs que son más dispersos producirán más lluvia y tendrán tamaños grandes.

4.2. Importancia de la incorporación del tamaño y la lluvia asociada al ciclón tropical en el SIAT-CT

La motivación principal de este trabajo radica en las limitaciones que tiene el SIAT-CT en términos de la definición del tamaño (Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana, 2019). Los resultados muestran que la influencia de la PCT puede alcanzar los 750 km desde el centro del CT. Por ello, se vuelve relevante usar una definición diferente al R34, que incorpore un tamaño del CT que considere la extensión de las bandas nubosas del CT y su precipitación.

Diversos estudios muestran que este reducido tamaño del R34 ignora las áreas potenciales de lluvia extrema asociada al CT y que está alejada del centro (Konrad & Perry, 2010; Lavender & McBride, 2021; Lu y col., 2017). Este trabajo propone el uso del tamaño R_p (en millas náuticas y definido por la técnica ROCLOUD) que se relaciona con la PCT y que podría sustituir el R34 en la ecuación que corresponde a la escala de circulación.

La Figura 4.1 muestra una comparación entre las alertas emitidas (en escala de colores) del SIAT-CT (Tabla 1.2) y las alertas emitidas si se considera el tamaño R_p , de ROCLOUD, propuesto por este trabajo. Para el caso de Cristóbal 2020, que

fue una TT y DT en las posiciones mostradas en la Figura 4.1, el color de las alertas cambia sutilmente. Sin embargo, los valores de peligro están subestimados por el SIAT-CT (Fig. 4.1 a; c; e; g; i), sobre todo en el noreste de la Península de Yucatán (Berg, 2021). Los municipios de Yucatán podrían experimentar una mejora en las alertas, ya que usando la definición de tamaño de este trabajo tienen un peligro moderado (Fig. 4.1 b; d; f; h; j), en lugar de un peligro bajo, como lo emitió el SIAT-CT (Fig. 4.1 a; c; e; g; i). Sin embargo, la lluvia reportada en la Península de Yucatán (Fig. 1.3) superó el percentil 95 (*i.e.* evento extremo), por lo que la alerta debió indicar un mayor peligro para los municipios de Quintana Roo.

Si bien se mejoran los alertamientos considerando el tamaño definido por RO-CLOUD en la ecuación de la escala de circulación, la escala de intensidad también debería ser replanteada. Lo anterior es debido a que como ya se demostró en este trabajo, la PCT no está relacionada directamente con la intensidad del CT. Una DT o una TT puede ser tan grande y producir PCT similar a un huracán intenso (Breña-Naranjo y col., 2015; Dominguez y col., 2019; Hidalgo y col., 2020). Por lo que, es necesario una actualización de los términos relacionados con la peligrosidad en el SIAT-CT de México.

4.3. Trabajo futuro

El trabajo a futuro comprende la aplicación de estos algoritmos para definir el tamaño de los CTs de forma operativa. Sería interesante usar salidas de modelos numéricos globales y/o regionales para calcular los tamaños de los CTs, con la finalidad de emitir alertas tempranas en el SIAT-CT usando el tamaño predecido por las salidas de los modelos.

También, se podría explorar usar técnicas de machine learning para predecir el tamaño de un CT, con fines operativos. Aparte del tamaño del CT, los resultados de este trabajo sugieren que el SIAT-CT debe incluir variables sociales, como la vulnerabilidad social, en sus alertamientos, ya que las regiones más vulnerables podrían necesitar alertamientos más intensos que las regiones menos vulnerables. También, sería ideal incluir otras variables físicas en los alertamientos del SIAT-CT, como los ríos que tienen rápida respuesta a las lluvias intensas.

Por otro lado, el cambio climático podría influenciar el tamaño de los CTs en un futuro. Si los CTs adquirieron un mayor tamaño, serían más peligrosos (Dominguez y col., 2021; Knutson y col., 2020). Es necesario estudiar las tendencias del tamaño de los CT en los escenarios de cambio climático para prevenir posibles riesgos futuros.

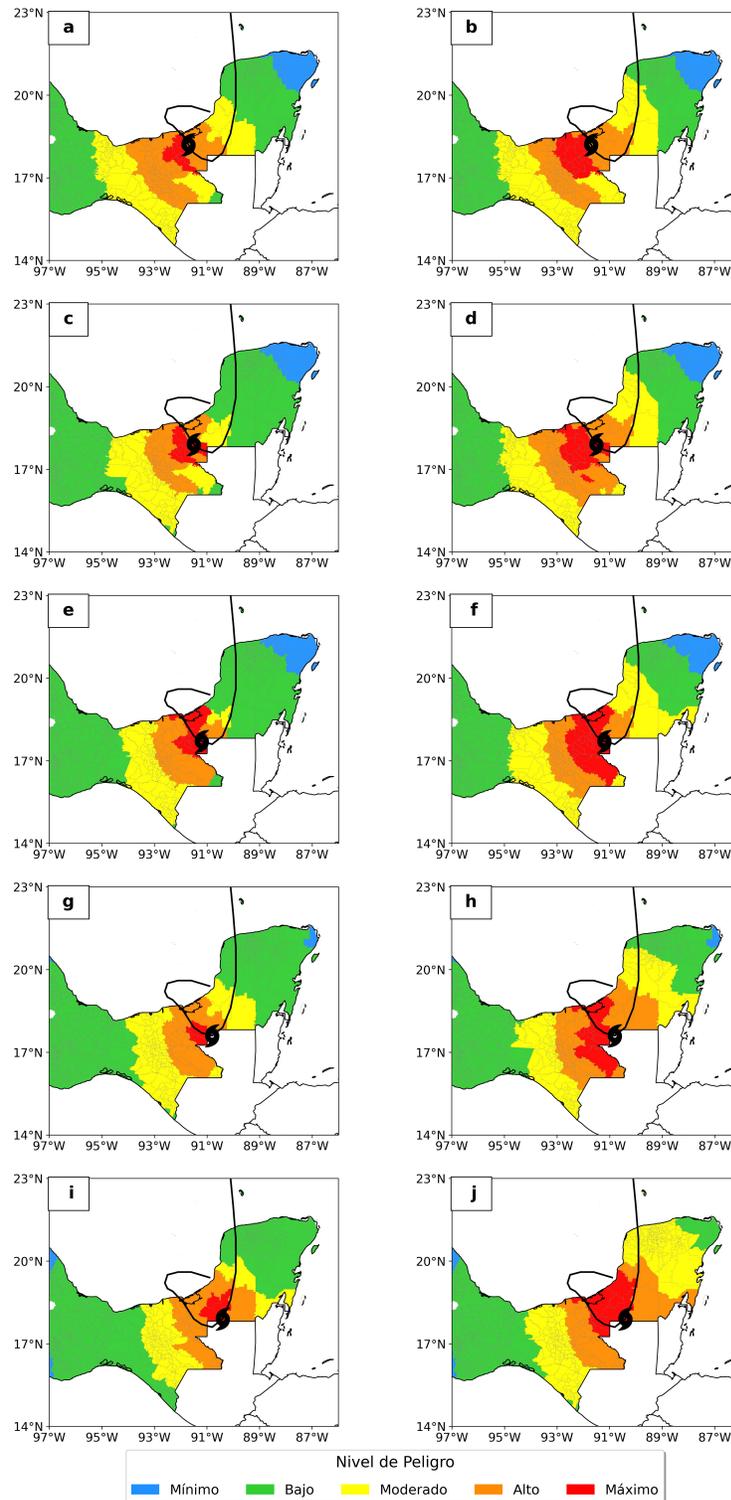


FIGURA 4.1. Alertamientos emitidos por el SIAT-CT usando la definición de tamaño del R34 (a,c,e,g,i) y alertamientos que podrían ser emitidos si se usara la definición del tamaño ROCLLOUD (b,d,f,h,j) para el 4 de junio del 2020 en las posiciones de Cristóbal 2020 durante las 00:00 UTC(a; b), 06:00 UTC(c; d), 12:00 UTC(e; f), 18:00 UTC(g; h) y las 00:00 UTC(i; j) del 5 de junio.

REFERENCIAS

- AghaKouchak, A., Nasrollahi, N., Li, J., Imam, B. & Sorooshian, S. (2011). Geometrical Characterization of Precipitation Patterns. *Journal of Hydrometeorology*, 12(2), 274-285. <https://doi.org/10.1175/2010JHM1298.1>
- Baez-Villanueva, O. M., Zambrano-Bigiarini, M., Ribbe, L., Nauditt, A., Giraldo-Osorio, J. D. & Thinh, N. X. (2018). Temporal and spatial evaluation of satellite rainfall estimates over different regions in latin-america. *Atmospheric Research*, 213, 34-50. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.05.011>
- Berg, R. (2021, 13 de enero). *TROPICAL STORM CRISTOBAL* (Tropical Cyclone Report AL032020). National Hurricane Center. Consultado el 11 de abril de 2021, desde https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL032020_Cristobal.pdf
- Berry, G. & Reeder, M. J. (2014). Objective Identification of the Intertropical Convergence Zone: Climatology and Trends from the ERA-Interim [Publisher: American Meteorological Society Section: Journal of Climate]. *Journal of Climate*, 27(5), 1894-1909. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00339.1>
- Bian, G.-F., Nie, G.-Z. & Qiu, X. (2021). How well is outer tropical cyclone size represented in the ERA5 reanalysis dataset? *Atmospheric Research*, 249, 105339. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105339>
- Brackins, J. T. & Kalyanapu, A. J. (2020). Evaluation of parametric precipitation models in reproducing tropical cyclone rainfall patterns. *Journal of Hydrology*, 580, 124255. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124255>
- Breña-Naranjo, A. J., Pedrozo-Acuña, A., Pozos-Estrada, O., Jiménez-López, S. A. & López-López, M. R. (2015). The contribution of tropical cyclones to rainfall in mexico. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 83-84, 111-122. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.05.011>
- Camargo, S. J., Emanuel, K. A. & Sobel, A. H. (2007). Use of a genesis potential index to diagnose ENSO effects on tropical cyclone genesis. *Journal of Climate*, 20(19), 4819-4834. <https://doi.org/10.1175/JCLI4282.1>
- Carrasco, C. A., Landsea, C. W. & Lin, Y.-L. (2014). The influence of tropical cyclone size on its intensification. *Weather and Forecasting*, 29(3), 582-590. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-13-00092.1>
- Cassidy, E. (2020, 9 de septiembre). *Explore 20 years of rain and snowfall data from NASA's precipitation missions* [EarthData]. Consultado el 19 de octubre de 2021, desde <https://earthdata.nasa.gov/learn/articles/20-years-of-precipitation-data/>

- CENAPRED. (2019). *Desastres en México: Impacto Social y Económico* (Infografía). México. <http://www.cenapred.unam.mx/>
- Chan, K. T. F. & Chan, J. C. L. (2015). Short Communication Global climatology of tropical cyclone size as inferred from QuikSCAT data. *International Journal of Climatology*, 35(15), 4843-4848. <https://doi.org/10.1002/joc.4307>
- Chavas, D. R. & Emanuel, K. A. (2010). A QuikSCAT climatology of tropical cyclone size: TROPICAL CYCLONE SIZE DISTRIBUTION. *Geophysical Research Letters*, 37(18), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2010GL044558>
- Chavas, D. R., Lin, N., Dong, W. & Lin, Y. (2016). Observed tropical cyclone size revisited. *Journal of Climate*, 29(8), 2923-2939. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0731.1>
- Corcos, M., Hertzog, A., Plougonven, R. & Podglajen, A. (2021). Observation of gravity waves at the tropical tropopause using superpressure balloons. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(15), e2021JD035165. <https://doi.org/10.1029/2021JD035165>
- Da Silva, N. A., Webber, B. G. M., Matthews, A. J., Feist, M. M., Stein, T. H. M., Holloway, C. E. & Abdullah, M. F. A. B. (2021). Validation of GPM IMERG extreme precipitation in the maritime continent by station and radar data. *Earth and Space Science*, 8(7), e2021EA001738. <https://doi.org/10.1029/2021EA001738>
- DeMaria, M., Mainelli, M., Shay, L. K., Knaff, J. A. & Kaplan, J. (2005). Further Improvements to the Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS). *Weather and Forecasting*, 20(4), 531-543. <https://doi.org/10.1175/WAF862.1>
- Demuth, J. L., DeMaria, M., Knaff, J. A. & Haar, T. H. V. (2004). Evaluation of Advanced Microwave Sounding Unit Tropical-Cyclone Intensity and Size Estimation Algorithms. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 43(2), 282-296. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0282:EOAMSU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0282:EOAMSU>2.0.CO;2)
- Dominguez, C. (2012). *El papel de los ciclones tropicales en el clima de México*. Consultado el 18 de noviembre de 2021, desde <http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat02029a&AN=tes.TES01000677990&lang=es&site=eds-live>
- Dominguez, C. (2018, 1 de marzo). *Los ciclones tropicales y la predictibilidad del clima de Mexico* (Tesis doctoral). <http://132.248.9.195/ptd2018/febrero/0771142/Index.html>
- Dominguez, C., Done, J. M. & Bruyère, C. L. (2021). Future changes in tropical cyclone and easterly wave characteristics over tropical north america. *Oceans*, 2(2), 429-447. <https://doi.org/10.3390/oceans2020024>
- Dominguez, C., Jaramillo, A. & Cuéllar, P. (2020). Are the socioeconomic impacts associated with tropical cyclones in Mexico exacerbated by local vulnerability and ENSO conditions? *International Journal of Climatology*, joc.6927. <https://doi.org/10.1002/joc.6927>
- Dominguez, C., Llanos-Rodríguez, M., Ochoa, C., Welsh-Rodríguez, C. M. & Perez Estrada, A. (2019). Sistema de Alerta Temprana Ante Ciclones Tropicales: Propuestas Para su Mejoría (Early Warning System for Tropical
-

- Cyclones: Proposals for Its Improvement, in English). *14*(2), 73-80. https://www.researchgate.net/publication/343228286_Sistema_de_Alerta_Temprana_Ante_Ciclones_Tropicales_Propuestas_Para_su_Mejoria_Early_Warning_System_for_Tropical_Cyclones_Proposals_for_Its_Improvement_in_English
- Dominguez, C. & Magaña, V. (2018). The Role of Tropical Cyclones in Precipitation Over the Tropical and Subtropical North America. *Frontiers in Earth Science*, *6*. Consultado el 3 de julio de 2022, desde <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/feart.2018.00019>
- Emanuel, K. (2005, septiembre). *Divine wind: The history and science of hurricanes* [Google-Books-ID: FvYRDAAAQBAJ]. Oxford University Press, USA.
- Feldmann, M., Emanuel, K., Zhu, L. & Lohmann, U. (2019). Estimation of Atlantic Tropical Cyclone Rainfall Frequency in the United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *58*(8), 1853-1866. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0011.1>
- Feng, Z., Leung, L. R., Liu, N., Wang, J., Houze Jr, R. A., Li, J., Hardin, J. C., Chen, D. & Guo, J. (2021). A global high-resolution mesoscale convective system database using satellite-derived cloud tops, surface precipitation, and tracking. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *126*(8), e2020JD034202. <https://doi.org/10.1029/2020JD034202>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A. & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, *2*(1), 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *146*(730), 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hidalgo, H. G., Alfaro, E. J., Hernández-Castro, F. & Pérez-Briceño, P. M. (2020). Identification of tropical cyclones' critical positions associated with extreme precipitation events in central america. *Atmosphere*, *11*(10), 1123. <https://doi.org/10.3390/atmos11101123>
- Hill, K. A. & Lackmann, G. M. (2009). Influence of environmental humidity on tropical cyclone size. *Monthly Weather Review*, *137*(10), 3294-3315. <https://doi.org/10.1175/2009MWR2679.1>
- Hoffmann, L., Günther, G., Li, D., Stein, O., Wu, X., Griessbach, S., Heng, Y., Konopka, P., Müller, R. & Vogel, B. (2019). From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF's next generation reanalysis on Lagrangian transport simulations. *Atmospheric Chemistry & Physics*, *19*(5). <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/acp-19-3097-2019>
- Hou, A. Y., Kakar, R. K., Neeck, S., Azarbarzin, A. A., Kummerow, C. D., Kojima, M., Oki, R., Nakamura, K. & Iguchi, T. (2014). The Global Precipita-
-

- tion Measurement Mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(5), 701-722. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00164.1>
- Huffman, G. J., Stocker, E. F., Bolvin, D., Nelkin, E. J. & Tan, J. (2019). GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree x 0.1 degree V06. Consultado el 19 de octubre de 2021, desde https://disc.gsfc.nasa.gov/datacollection/GPM_3IMERGHH_06.html
- Janowiak, J., Joyce, B. & Xie, P. (2017). *NCEP/CPC L3 Half Hourly 4km Global (60S - 60N) Merged IR V1*. Consultado el 19 de octubre de 2021, desde https://disc.gsfc.nasa.gov/datacollection/GPM_MERGIR_1.html
- Janowiak, J. E., Joyce, R. J. & Yarosh, Y. (2001). A real-time global half-hourly pixel-resolution infrared dataset and its applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(2), 205-218. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<0205:ARTGHH>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<0205:ARTGHH>2.3.CO;2)
- Jiang, H., Halverson, J. B. & Zipser, E. J. (2008). Influence of environmental moisture on TRMM-derived tropical cyclone precipitation over land and ocean. *Geophysical Research Letters*, 35(17). <https://doi.org/10.1029/2008GL034658>
- Khouakhi, A., Villarini, G. & Vecchi, G. A. (2017). Contribution of tropical cyclones to rainfall at the global scale. *Journal of Climate*, 30(1), 359-372. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0298.1>
- Kim, S., Matyas, C. J. & Yan, G. (2020). Rainfall symmetry related to moisture, storm intensity, and vertical wind shear for tropical cyclones landfalling over the u.s. gulf coastline. *Atmosphere*, 11(9), 895. <https://doi.org/10.3390/atmos11090895>
- Knaff, J. A., Longmore, S. P. & Molenaar, D. A. (2014). An objective satellite-based tropical cyclone size climatology. *JOURNAL OF CLIMATE*, 27, 26. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00096.1>
- Knutson, T., Camargo, S. J., Chan, J. C. L., Emanuel, K., Ho, C.-H., Kossin, J., Mohapatra, M., Satoh, M., Sugi, M., Walsh, K. & Wu, L. (2020). Tropical Cyclones and Climate Change Assessment: Part II: Projected Response to Anthropogenic Warming [Publisher: American Meteorological Society Section: Bulletin of the American Meteorological Society]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(3), E303-E322. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0194.1>
- Konrad, C. E. & Perry, L. B. (2010). Relationships between tropical cyclones and heavy rainfall in the carolina region of the USA: TROPICAL CYCLONES AND RAINFALL IN CAROLINA, USA. *International Journal of Climatology*, 30(4), 522-534. <https://doi.org/10.1002/joc.1894>
- Landsea, C. W. & Franklin, J. L. (2013). Atlantic Hurricane Database Uncertainty and Presentation of a New Database Format. *Monthly Weather Review*, 141(10), 3576-3592. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00254.1>
- Larson, J., Zhou, Y. & Higgins, R. W. (2005). Characteristics of landfalling tropical cyclones in the united states and mexico: Climatology and interannual variability. *Journal of Climate*, 18(8), 1247-1262. <https://doi.org/10.1175/JCLI3317.1>
-

- Lavender, S. L. & McBride, J. L. (2021). Global climatology of rainfall rates and lifetime accumulated rainfall in tropical cyclones: Influence of cyclone basin, cyclone intensity and cyclone size. *International Journal of Climatology*, 41. <https://doi.org/10.1002/joc.6763>
- Lee, C.-S., Cheung, K. K. W., Fang, W.-T. & Elsberry, R. L. (2010). Initial Maintenance of Tropical Cyclone Size in the Western North Pacific. *Monthly Weather Review*, 138(8), 3207-3223. <https://doi.org/10.1175/2010MWR3023.1>
- Li, J., Feng, Z., Qian, Y. & Leung, L. R. (2021). A high-resolution unified observational data product of mesoscale convective systems and isolated deep convection in the United States for 2004–2017. *Earth System Science Data*, 13(2), 827-856. <https://doi.org/10.5194/essd-13-827-2021>
- Lin, Y., Zhao, M. & Zhang, M. (2015). Tropical cyclone rainfall area controlled by relative sea surface temperature. *Nature Communications*, 6(1), 6591. <https://doi.org/10.1038/ncomms7591>
- Lu, X., Yu, H., Yang, X. & Li, X. (2017). Estimating tropical cyclone size in the northwestern pacific from geostationary satellite infrared images. *Remote Sensing*, 9(7), 728. <https://doi.org/10.3390/rs9070728>
- Lüdecke, D. (2018). ggeffects: Tidy Data Frames of Marginal Effects from Regression Models. *Journal of Open Source Software*, 3(26), 772. <https://doi.org/10.21105/joss.00772>
- Magaña, V. & Caetano, E. (2005). Temporal evolution of summer convective activity over the americas warm pools. *Geophysical Research Letters*, 32(2). <https://doi.org/10.1029/2004GL021033>
- Matyas, C. & Tang, J. (2019). Measuring radial and tangential changes in tropical cyclone rain fields using metrics of dispersion and closure. *Advances in Meteorology*, 2019, 1-14. <https://doi.org/10.1155/2019/8613943>
- Matyas, C. J. (2010). Associations between the size of hurricane rain fields at landfall and their surrounding environments. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 106(3), 135-148. <https://doi.org/10.1007/s00703-009-0056-1>
- Matyas, C. J. & VanSchoick, S. (2021). Geospatial analysis of rain fields and associated environmental conditions for cyclones eline and hudah. *Geomatics*, 1(1), 92-113. <https://doi.org/10.3390/geomatics1010008>
- McNeely, T., Vincent, G., Izbicki, R., Wood, K. M. & Lee, A. B. (2021). Identifying Distributional Differences in Convective Evolution Prior to Rapid Intensification in Tropical Cyclones. *arXiv:2109.12029 [cs, stat]*. Consultado el 19 de octubre de 2021, desde <http://arxiv.org/abs/2109.12029>
- Merrill, R. T. (1984). A Comparison of Large and Small Tropical Cyclones. *Monthly Weather Review*, 112(7), 1408-1418. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1984\)112<1408:ACOLAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112<1408:ACOLAS>2.0.CO;2)
- Mok, D. K. H., Chan, J. C. L. & Chan, K. T. F. (2018). A 31-year climatology of tropical cyclone size from the NCEP climate forecast system reanalysis: A 31-YEAR CLIMATOLOGY OF TROPICAL CYCLONE SIZE. *International Journal of Climatology*, 38, e796-e806. <https://doi.org/10.1002/joc.5407>
- Na, W., Xinghai, Z., Lianshou, C. & Hao, H. (2018). Comparison of the effect of easterly and westerly vertical wind shear on tropical cyclone intensity
-

- change over the western north pacific. *Environmental Research Letters*, 13(3), 034020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa496>
- Nguyen, K. T., Alenin, A. S., Ritchie, E. A. & Scott Tyo, J. (2019). Quantifying the contribution of tropical cyclones to the earth's outgoing radiation. *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 10107-10110. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8898504>
- Pasch, R. J. (2010, 15 de diciembre). *Hurricane Alex* (Tropical Cyclone Report). National Hurricane Center. https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL012010_Alex.pdf
- Pérez-Alarcón, A., Sorí, R., Fernández-Alvarez, J. C., Nieto, R. & Gimeno, L. (2021). Comparative climatology of outer tropical cyclone size using radial wind profiles. *Weather and Climate Extremes*, 33, 100366. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100366>
- Pérez-Alarcón, A., Sorí, R., Fernández-Alvarez, J. C., Nieto, R. & Gimeno, L. (2022). Dataset of outer tropical cyclone size from a radial wind profile. *Data in Brief*, 40, 107825. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.107825>
- Perez-Estrada, A. (2020). *Relación de la precipitación producida por los ciclones tropicales con variables medioambientales en México en el periodo de 1980-2017* (Tesis de Pregrado). Universidad Juárez Autónoma de México. Cunduacán, Tabasco.
- Quiring, S., Schumacher, A., Labosier, C. & Zhu, L. (2011). Variations in mean annual tropical cyclone size in the atlantic. *Journal of Geophysical Research*, 116, D09114. <https://doi.org/10.1029/2010JD015011>
- Ramon, J., Lledó, L., Torralba, V., Soret, A. & Doblas-Reyes, F. J. (2019). What global reanalysis best represents near-surface winds? *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145(724), 3236-3251. <https://doi.org/10.1002/qj.3616>
- Ramzai, J. (2021, 25 de mayo). *Clearly explained: Pearson v/s spearman correlation coefficient* [Medium]. Consultado el 14 de abril de 2022, desde <https://towardsdatascience.com/clearly-explained-pearson-v-s-spearman-correlation-coefficient-ada2f473b8>
- Reul, N., Chapron, B., Zabolotskikh, E., Donlon, C., Mouche, A., Tenerelli, J., Collard, F., Piolle, J. F., Fore, A., Yueh, S., Cotton, J., Francis, P., Quilfen, Y. & Kudryavtsev, V. (2017). A New Generation of Tropical Cyclone Size Measurements from Space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(11), 2367-2385. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00291.1>
- Schenkel, B. A., Lin, N., Chavas, D., Vecchi, G. A., Oppenheimer, M. & Brammer, A. (2018). Lifetime Evolution of Outer Tropical Cyclone Size and Structure as Diagnosed from Reanalysis and Climate Model Data. *Journal of Climate*, 31(19), 7985-8004. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0630.1>
- Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana. (2019, 9 de mayo). *Manual del Sistema de Alerta Temprana para ciclones tropicales (SIAT-CT) 2019* [gob.mx]. Consultado el 9 de abril de 2021, desde <http://www.gob.mx/sspc/documentos/manual-del-sistema-de-alerta-temprana-para-ciclones-tropicales-siat-ct-2019>
-

- Shen, Z., Yong, B., Gourley, J. J., Qi, W., Lu, D., Liu, J., Ren, L., Hong, Y. & Zhang, J. (2020). Recent global performance of the climate hazards group infrared precipitation (CHIRP) with stations (CHIRPS). *Journal of Hydrology*, 591, 125284. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125284>
- Simpson, R. H. (1974). The hurricane disaster—potential scale. *Weatherwise*, 27(4), 169-186. <https://doi.org/10.1080/00431672.1974.9931702>
- Sun, C., Liu, Y., Gong, Z., Kucharski, F., Li, J., Wang, Q. & Li, X. (2020). The Footprint of Atlantic Multidecadal Oscillation on the Intensity of Tropical Cyclones Over the Western North Pacific. *Frontiers in Earth Science*, 8. Consultado el 20 de abril de 2022, desde <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/feart.2020.604807>
- Sun, Y., Zhong, Z., Li, T., Yi, L., Hu, Y., Wan, H., Chen, H., Liao, Q., Ma, C. & Li, Q. (2017). Impact of ocean warming on tropical cyclone size and its destructiveness. *Scientific Reports*, 7(1), 8154. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08533-6>
- Tan, J., Huffman, G. J., Bolvin, D. T. & Nelkin, E. J. (2019). IMERG V06: Changes to the Morphing Algorithm. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 36(12), 2471-2482. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0114.1>
- Touma, D., Stevenson, S., Camargo, S. J., Horton, D. E. & Diffenbaugh, N. S. (2019). Variations in the intensity and spatial extent of tropical cyclone precipitation. *Geophysical Research Letters*, 46(23), 13992-14002. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2019GL083452>
- Tsuji, H. & Nakajima, K. (2019). Relationship between the change in size of tropical cyclones and spatial patterns of precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(17), 9948-9962. <https://doi.org/10.1029/2019JD030404>
- Wilks, D. S. (2019, 1 de enero). Chapter 3 - empirical distributions and exploratory data analysis. En D. S. Wilks (Ed.), *Statistical methods in the atmospheric sciences (fourth edition)* (pp. 23-75). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815823-4.00003-1>
- Willoughby, H. E., Darling, R. W. R. & Rahn, M. E. (2006). Parametric Representation of the Primary Hurricane Vortex. Part II: A New Family of Sectionally Continuous Profiles. *Monthly Weather Review*, 134(4), 1102-1120. <https://doi.org/10.1175/MWR3106.1>
- Wimmers, A. J. & Velden, C. S. (2007). MIMIC: A new approach to visualizing satellite microwave imagery of tropical cyclones. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(8), 1187-1196. <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-8-1187>
- Wu, L., Tian, W., Liu, Q., Cao, J. & Knaff, J. A. (2015). Implications of the Observed Relationship between Tropical Cyclone Size and Intensity over the Western North Pacific. *Journal of Climate*, 28(24), 9501-9506. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0628.1>
- Wu, Y., Chen, S., Li, W., Fang, R. & Liu, H. (2020). Relative vorticity is the major environmental factor controlling tropical cyclone intensification over
-

- the western north pacific. *Atmospheric Research*, 237, 104874. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104874>
- Xu, R., Tian, F., Yang, L., Hu, H., Lu, H. & Hou, A. (2017). Ground validation of GPM IMERG and TRMM 3b42v7 rainfall products over southern tibetan plateau based on a high-density rain gauge network. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(2), 910-924. <https://doi.org/10.1002/2016JD025418>
- Yang, L., Luo, X., Chen, S., Zhou, X.-L., Wang, W.-Q. & Wang, D.-X. (2022). Characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones in the south china sea, 1980–2016. *Advances in Climate Change Research*. <https://doi.org/10.1016/j.accres.2022.04.004>
- Yuan, S., Zhu, L. & Quiring, S. M. (2021). Comparison of Two Multisatellite Algorithms for Estimation of Tropical Cyclone Precipitation in the United States and Mexico: TMPA and IMERG. *Journal of Hydrometeorology*, 22(4), 923-939. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0296.1>
- Zhou, Y. & Matyas, C. (2021). Regionalization of precipitation associated with tropical cyclones using spatial metrics and satellite precipitation. *GIScience and Remote Sensing*, 58(4), 542-561. <https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1908675>
- Zhou, Y., Matyas, C., Li, H. & Tang, J. (2018). Conditions associated with rain field size for tropical cyclones landfalling over the eastern united states. *Atmospheric Research*, 214, 375-385. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.08.019>
- Zhou, Y. & Matyas, C. J. (2018). Spatial characteristics of rain fields associated with tropical cyclones landfalling over the western gulf of mexico and caribbean sea. *JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY*, 57, 17. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-18-0034.1>
- Zhu, L. & Aguilera, P. (2021). Evaluating variations in tropical cyclone precipitation in eastern mexico using machine learning techniques. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(7), e2021JD034604. <https://doi.org/10.1029/2021JD034604>
- Zick, S. E. & Matyas, C. J. (2016). A Shape Metric Methodology for Studying the Evolving Geometries of Synoptic-Scale Precipitation Patterns in Tropical Cyclones. *Annals of the American Association of Geographers*, 106(6), 1217-1235. <https://doi.org/10.1080/24694452.2016.1206460>
- Zou, X. (2020). Microwave temperature sounding observations. *Atmospheric satellite observations* (pp. 97-133). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820950-9.00007-6>
-

CAPÍTULO A

APÉNDICE: RADIOS CALCULADOS POR CATEGORÍA

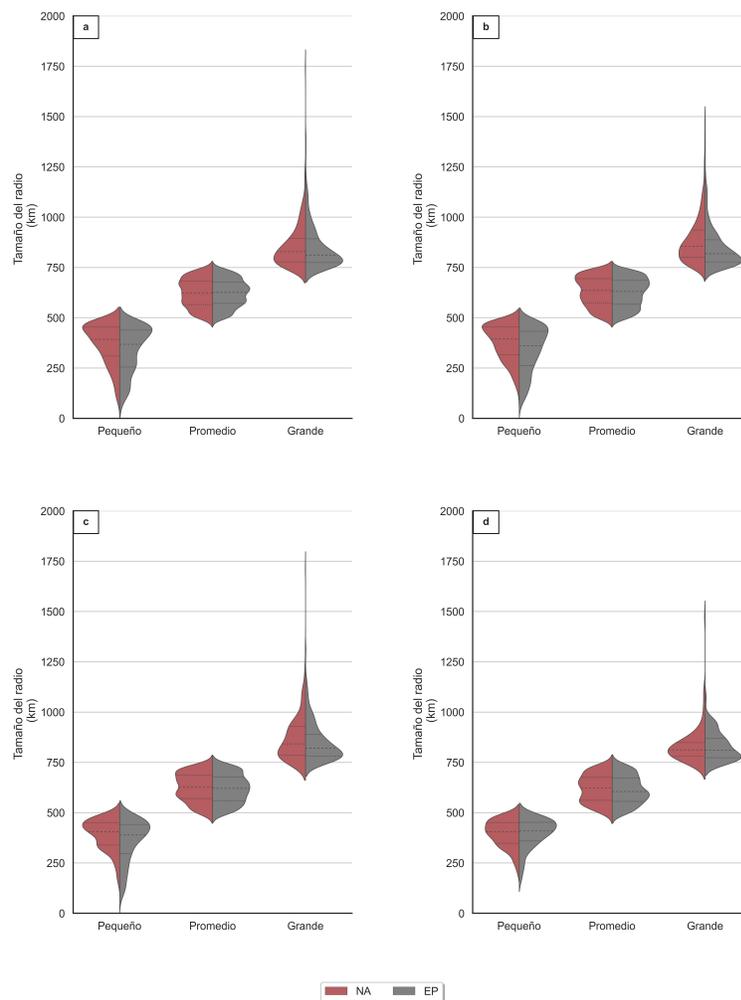


FIGURA A.1. Gráfico de violín de densidad por categoría del tamaño ROCL (km) de los CTs, con respecto al percentil 25 (CTs pequeños) y 75 (CTs grandes) por cuenca NA(rojo) y EP (gris). Se presenta el histograma para el radio promedio de acuerdo a la categoría de los CTs en la escala Saffir-Simpson: DT (a), TT(b), HUR 1-2 (c) y HUR 3-5 (d).

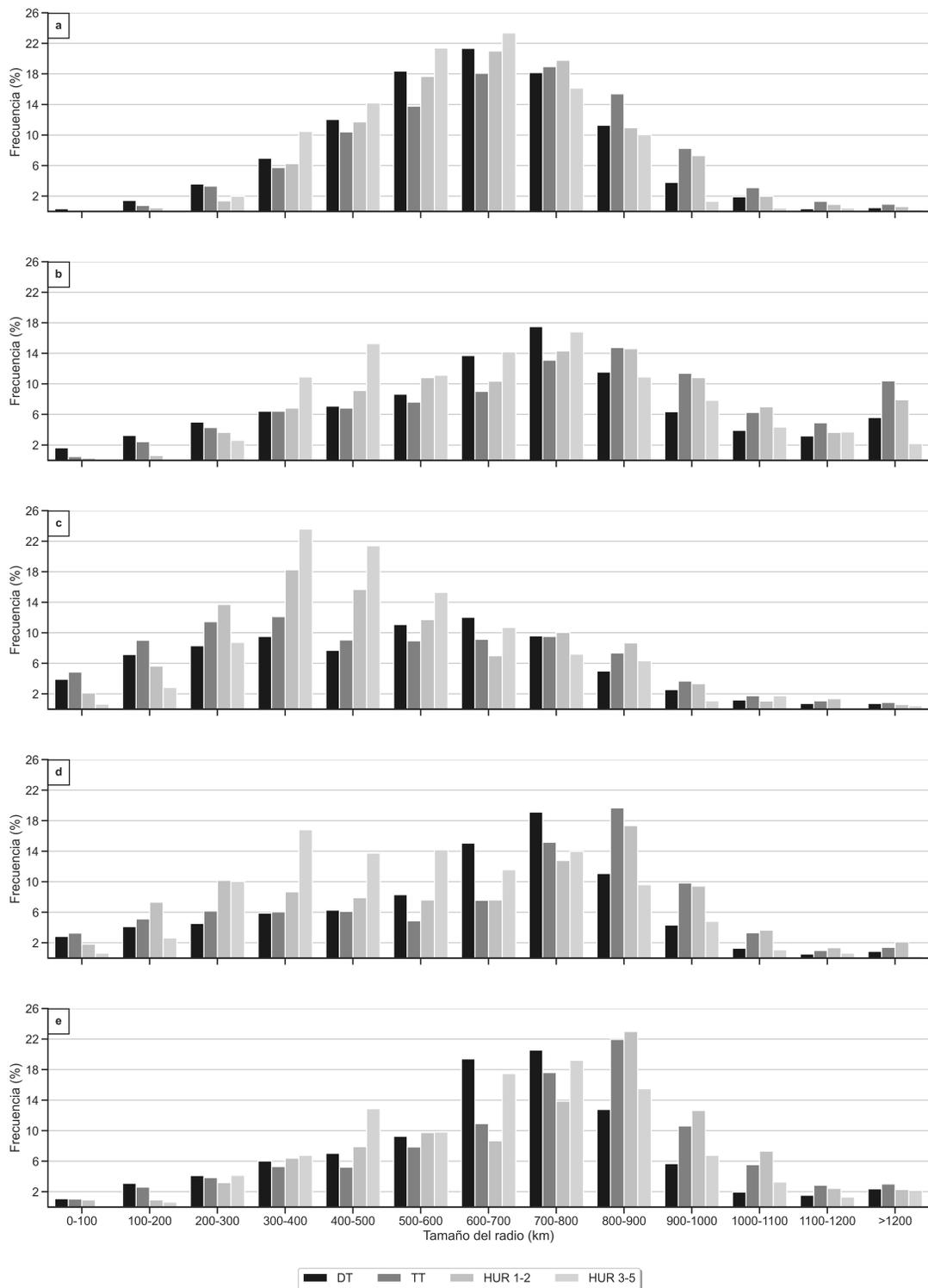


FIGURA A.2. *Histograma de frecuencia relativa por categoría del tamaño ROCL (km) de los CTs, con respecto al número de casos de cada categoría. Se presenta el histograma para el radio promedio (R_p ; a) y por cuadrante: RNE(b), RNO(c), RSO(d) y RSE(c). Información para la cuenca NA durante el periodo 2000-2020.*

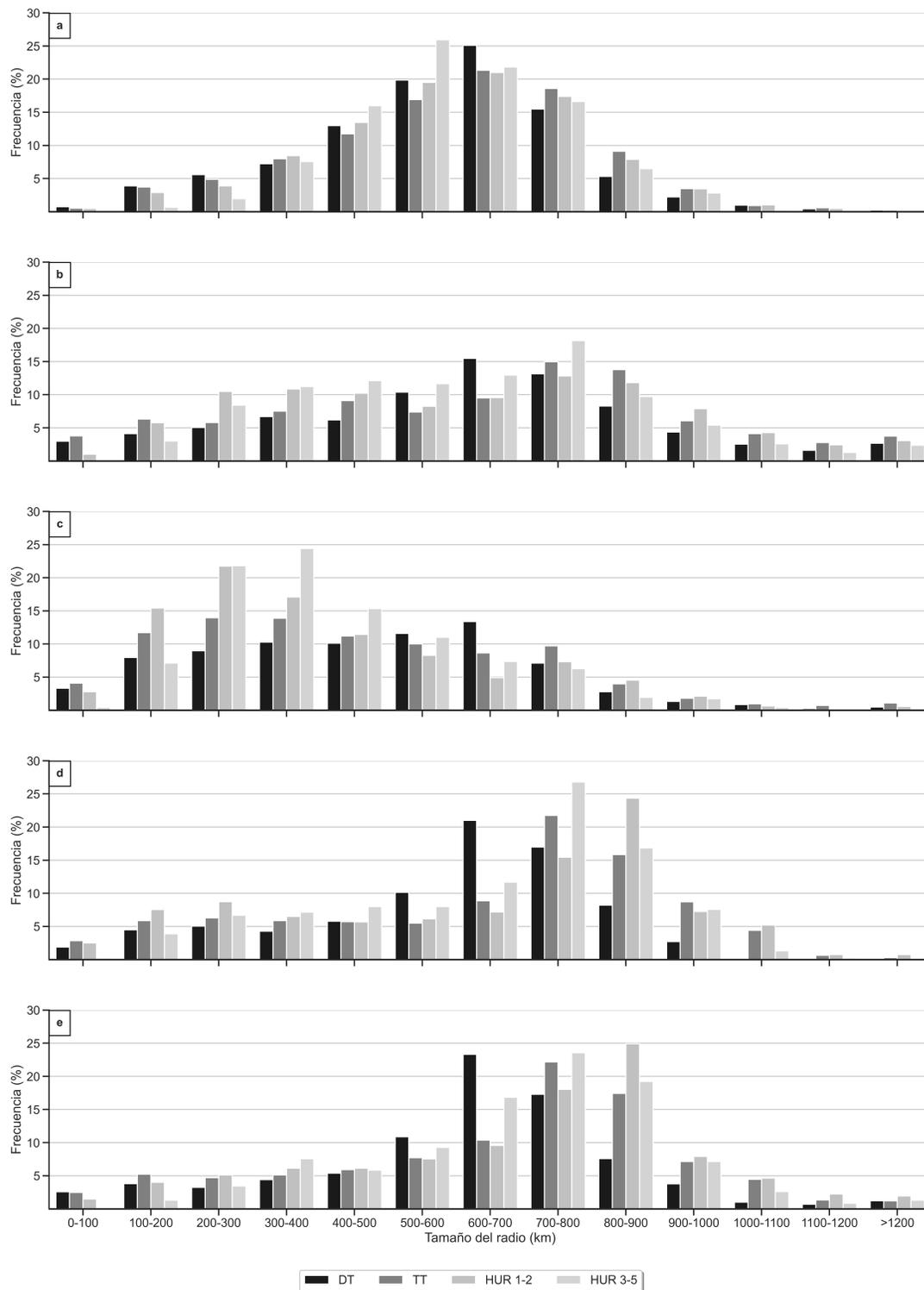


FIGURA A.3. *Histograma de frecuencia relativa por categoría del tamaño ROCL (km) de los CTs, con respecto al número de casos de cada categoría. Se presenta el histograma para el radio promedio (R_p ; a) y por cuadrante: $R_{NE}(b)$, $R_{NO}(c)$, $R_{SO}(d)$ y $R_{SE}(e)$. Información para la cuenca EP durante el periodo 2000-2020.*

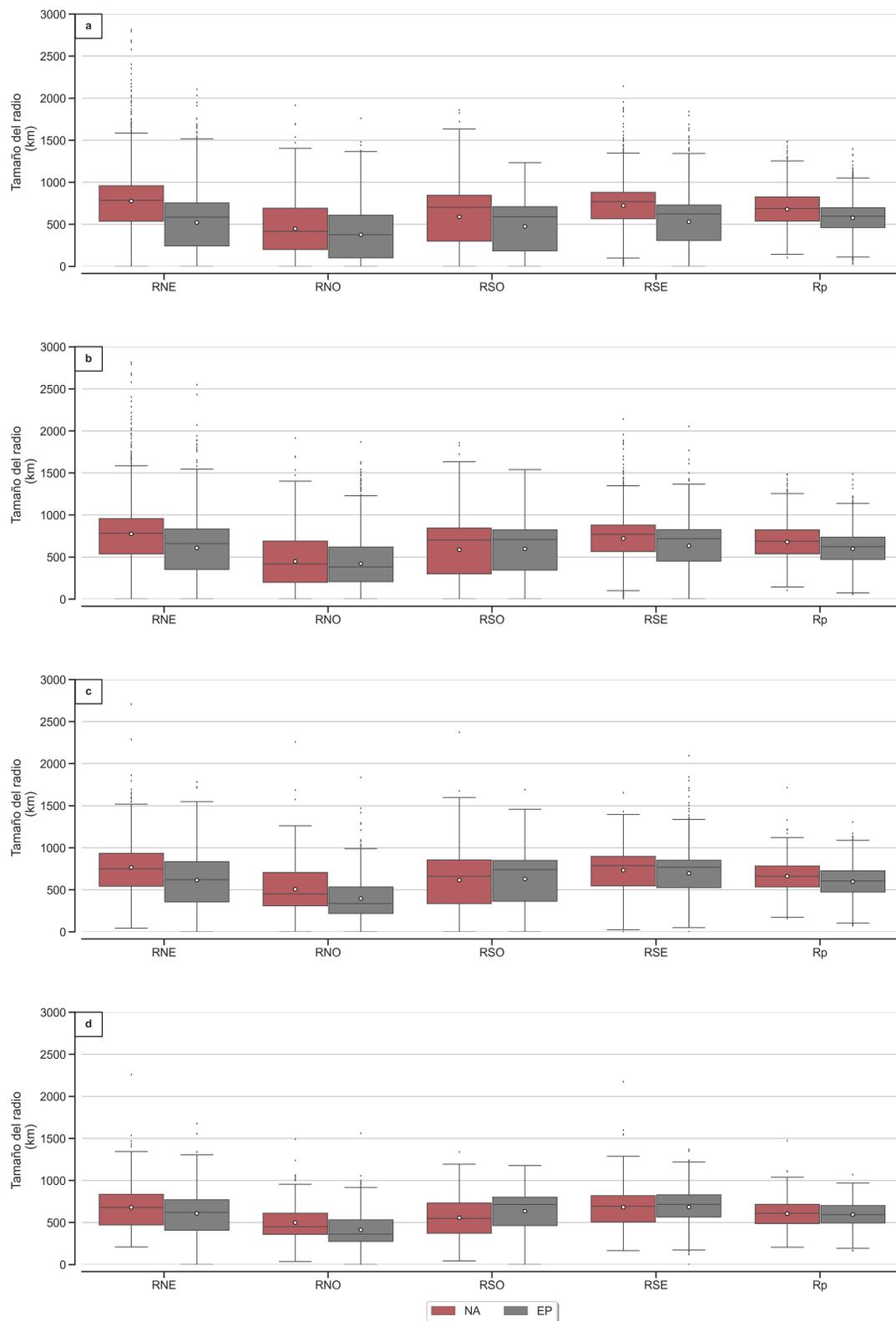


FIGURA A.4. Gráfico de cajas y bigotes de las distribuciones de los radios por cuadrante y radio promedio de los radios por cuadrante en la región de estudio de la cuenca NA y EP. Las gráficas se presentan de acuerdo a las categorías de los CTs: DT (a), TT(b), HUR 1-2 (c) y HUR 3-5 (d), durante el periodo 2000-2020.

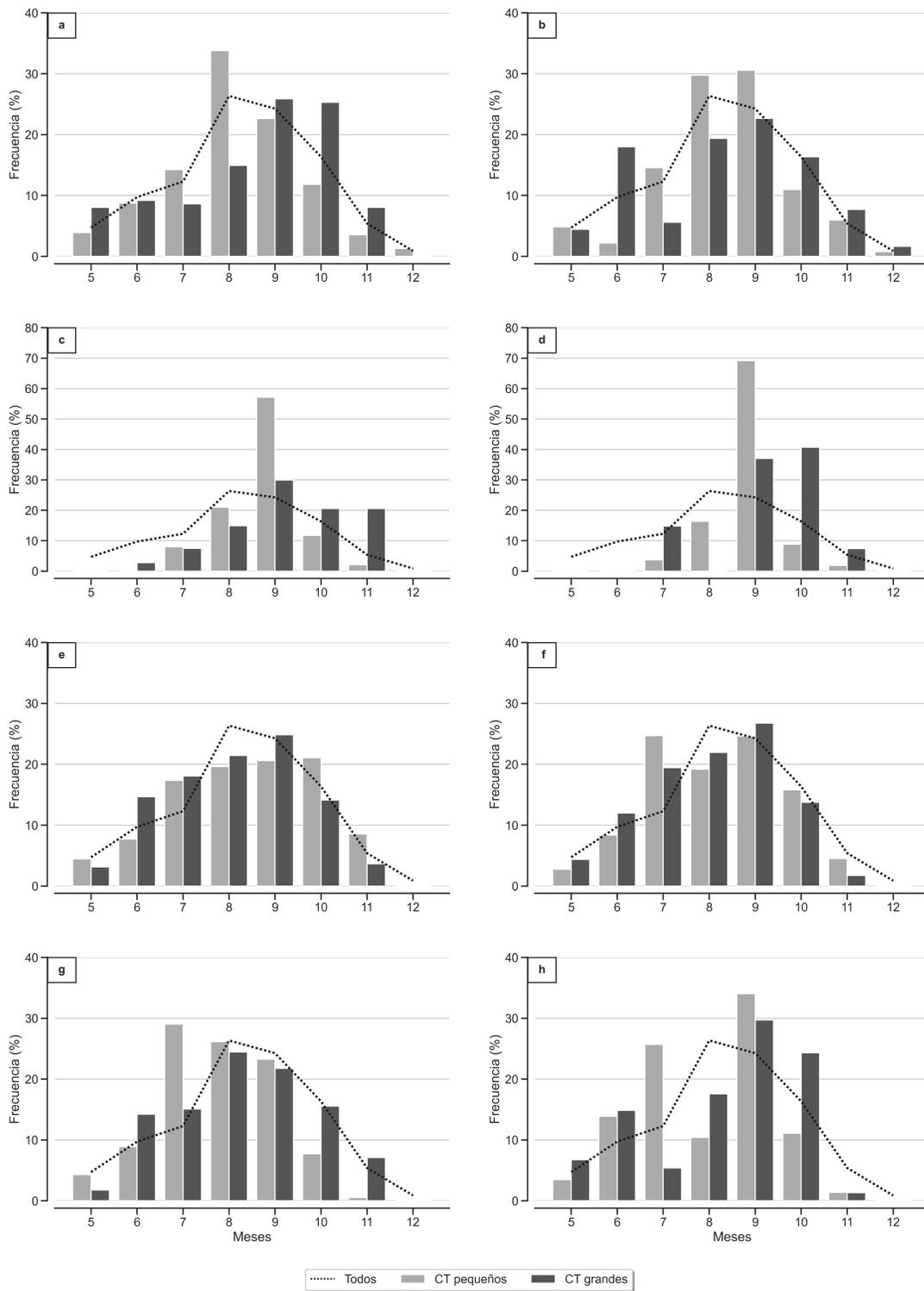


FIGURA A.5. Diagramas de frecuencia mensual del tamaño del CT. Se muestran las frecuencias de TC grandes (25% más grande) y pequeños (25% más pequeño) junto con la frecuencia típica de todas las tormentas. Los resultados se basan en los cuartiles inferior (pequeño) y superior (grande) de cada cuenca. Los resultados son de NA (a-d) y EP (e-h), por su categoría DT (a,e), TT(b,f), HU 1-2 (c,g) y HUR 3-5 (d,h).