



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA**

**DESCARGAS ELÉCTRICAS**

**EN EL INTERIOR**

**DE CICLONES TROPICALES**

**DEL PACÍFICO NORORIENTAL**

**T E S I S**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**

**M A E S T R O E N C I E N C I A S**

**P R E S E N T A :**

**ADOLFO LUGO RÍOS**

**DIRIGIDA POR:**

**DRA. GRACIELA L. BINIMELIS DE RAGA  
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA**

**DR. SERGIO F. ABARCA FUENTE  
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**MÉXICO, D.F. AGOSTO DE 2014**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.







DESCARGAS ELÉCTRICAS EN EL  
INTERIOR DE CICLONES TROPICALES  
DEL PACÍFICO NORORIENTAL

---



## **AGRADECIMENTOS**

A mis dos tutores, la Dra. Graciela Raga y el Dr. Sergio Abarca quienes más allá de orientarme académicamente, me permitieron tener un panorama de cómo se forja la ciencia, de los deberes y obligaciones como científico, así como alcanzar la excelencia. Nuevamente gracias a los dos, quienes más que considerarlos como tutores me gustaría considerarlos como amigos. Su calidez humana me ayudó a concluir esta parte importante de mi vida en la mejor forma y apoyándome en cualquier asunto.

Al Dr. Luis Farfán por introducirme en el mundo de los ciclones tropicales, por haberme orientado en mis primeros pasos en esta rama de la ciencia y por presentarme a la Dra. Graciela Raga.

Al Dr. David Adams por sus valiosos comentarios generándome más dudas, las cuales me permitirán perfilar mis futuros trabajos.

A la Dra. Beata Kucieńska por sus valiosos comentarios y consejos, por hacer mi estancia en el grupo Interacción Micro y Mesoescala agradable y por mantener unido al grupo.

A los integrantes del grupo Interacción micro y Mesoescala y a mis compañeros de generación por su compañerismo.

A mis padres por todo el apoyo recibido, por creer en mi y por su infinita paciencia y su invaluable apoyo a lo largo de toda mi vida.

A Caro, quien me ha apoyado en todo momento durante estos cinco años y me ha hecho mejor persona, por escucharme acompañarme durante gran parte de mi vida. Muchas gracias.

También agradezco al CONACYT por otorgarme la beca número 345314 para realizar mis estudios de maestría por estos dos años.



## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	<b>VII</b>
<b>INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIONES</b> .....	<b>IX</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>3</b>
<b>HIPÓTESIS GENERAL</b> .....	<b>4</b>
<b>DATOS Y METODOLOGÍA</b> .....	<b>5</b>
FUENTES DE DATOS .....	5
METODOLOGÍA .....	6
<b>1. ACERCA DE LAS NUBES EN CICLONES TROPICALES</b> .....	<b>9</b>
LAS NUBES EN EL OJO DE UN CT. ....	10
LA PARED DEL OJO.....	10
BANDAS DE LLUVIA Y PAREDES SECUNDARIAS. ....	12
MICROFÍSICA DE NUBES Y ELECTRIFICACIÓN.....	13
<b>2. DE LA ELECTRIFICACIÓN EN NUBES A CICLONES TROPICALES</b> .....	<b>15</b>
ACERCA DE LA ELECTRIFICACIÓN EN NUBES DE TORMENTA, UN POCO DE HISTORIA.....	15
LOS RELÁMPAGOS COMO ESTIMACIÓN DE LA INTENSIDAD Y CONVECCIÓN EN UNA TORMENTA.....	16
LA CONVECCIÓN EN LOS CICLONES TROPICALES APROXIMADA A TRAVÉS DE LA ACTIVIDAD ELÉCTRICA.....	18
<i>Modelo conceptual de Black y Hallet (1999) de la electrificación de nubes en un CT.....</i>	<i>20</i>
<i>El pronóstico de la intensidad en los CT. ....</i>	<i>21</i>
<b>3. REPRODUCCIÓN DE RESULTADOS PREVIOS.</b> .....	<b>23</b>
CONVERSIÓN DE DATOS PUNTUALES DE LA WWLLN A UNA MALLA REGULAR. ....	24
CÁLCULO DEL AZIMUT. ....	26
VALOR MEDIO DE LA CORTANTE DEL VIENTO EN LAS INMEDIACIONES DE UN CT.....	27
ANÁLISIS DEL VECTOR DE MOVIMIENTO Y DE LA CORTANTE PARA EL CASO DE BONNIE, 2004.....	28
<i>Resultados.....</i>	<i>28</i>
COMPARACIÓN ENTRE LAS DISTRIBUCIONES ESPACIALES DE LOS RELÁMPAGOS CON RESPECTO A LA CORTANTE.....	29
<b>4. EL AMBIENTE CIRCUNDANTE EN LOS CICLONES TROPICALES.</b> .....	<b>32</b>
VERIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE CADA CLÚSTER. ....	34
<i>Azimut de los CTs de cada clúster .....</i>	<i>35</i>
<i>Cercanía a tierra de los CTs de cada clúster. ....</i>	<i>36</i>
<i>SST sobre los CTs.....</i>	<i>38</i>

<b>5. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE RELÁMPAGOS EN CICLONES TROPICALES.....</b>	<b>41</b>
ANÁLISIS DE LA DECRM ACUMULADA.....	45
<i>Asimetrías radiales.....</i>	<i>45</i>
<i>Asimetrías azimutales.....</i>	<i>46</i>
ANÁLISIS DE LA DECRC ACUMULADA.....	47
<i>Asimetrías azimutales.....</i>	<i>47</i>
COMPARACIÓN ENTRE LAS DECRM.....	48
ANÁLISIS DE LA DENSIDAD DE RELÁMPAGOS EN LAS DECR.....	49
<b>6. RELACIONES EMPÍRICAS DE LA CANTIDAD DE RELÁMPAGOS EN EL NÚCLEO INTERNO.....</b>	<b>55</b>
RELACIÓN ENTRE LA CANTIDAD DE RELÁMPAGOS POR INTERVALO Y LA DENSIDAD EFECTIVA ( $\rho_e$ ) EN EL NÚCLEO INTERNO ( $SeN$ ).....	56
RELACIÓN ENTRE LA CANTIDAD DE RELÁMPAGOS EN CADA INTERVALO Y LA CANTIDAD DE RELÁMPAGOS MÁXIMA EN UN PUNTO DE MALLA.....	58
UTILIDAD DE ESTAS RELACIONES PARA DETERMINAR LAS POSIBLES DISTRIBUCIONES DE LOS RELÁMPAGOS EN CADA INTERVALO DE TIEMPO.....	60
<b>7. RELACIONES ENTRE LA CANTIDAD DE RELÁMPAGOS Y LA INTENSIDAD DE UN CICLÓN TROPICAL .....</b>	<b>62</b>
<b>8. INFLUENCIA DE FACTORES AMBIENTALES EN LOS RELÁMPAGOS PRODUCIDOS EN EL NÚCLEO INTERNO .....</b>	<b>75</b>
VARIACIÓN DIURNA DE LA DENSIDAD EFECTIVA DE RELÁMPAGOS .....	76
CORTANTE DE VIENTO.....	83
MOVIMIENTO DEL CT.....	89
TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DEL MAR.....	93
INFLUENCIA DE LA CANTIDAD DE CCN Y CERCANÍA DE LA COSTA SOBRE LA $\rho_e$ .....	96
<b>RESULTADOS Y CONCLUSIONES FINALES .....</b>	<b>102</b>
COMPORTAMIENTOS, RELACIONES Y PATRONES COMUNES A TODOS LOS CLÚSTERES.....	102
COMPORTAMIENTOS, RELACIONES Y PATRONES DIFERENCIADOS ENTRE LOS CLÚSTERES.....	103
CONCLUSIONES FINALES.....	106
<b>A. OPERACIONES SOBRE UNA SUPERFICIE ESFÉRICA.....</b>	<b>108</b>
BASE VECTORIAL EN COORDENADAS ESFÉRICAS.....	108
AZIMUT DE LA TRAYECTORIA.....	108
VELOCIDAD DE TRASLACIÓN SOBRE UNA ESFERA.....	109
VALOR MEDIO DE UNA VARIABLE SOBRE UNA REGIÓN EN UNA SUPERFICIE ESFÉRICA.....	110
ROTACIÓN SOBRE UNA SUPERFICIE ESFÉRICA.....	112
<b>B. PROYECCIÓN CÓNICA CONFORME DE LAMBERT.....</b>	<b>114</b>
<b>C. MANIPULACIÓN DE DATOS DEL NORTH AMERICAN REGION REANALYSIS.....</b>	<b>116</b>
ERROR INDUCIDO EN EL CÁLCULO DE SUPERFICIES DEBIDO A LA MALLA NARR SOBRE UNA ESFERA.....	117
<b>D. FUNCIÓN DE DENSIDAD ACUMULADA.....</b>	<b>119</b>
<b>GLOSARIO Y TÉRMINOS .....</b>	<b>120</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>122</b>

## INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIONES

Los ciclones tropicales (CTs) son fenómenos meteorológicos que generalmente ocurren mar adentro, pero cuando se acercan o entran a tierra pueden tener un gran impacto en las actividades humanas, tanto benéfico como perjudicial debido a la gran cantidad de precipitación y a los vientos intensos que producen, por lo que es importante monitorear y pronosticar la trayectoria, la intensidad de los vientos máximos y la precipitación que puede producir un CT sobre una región determinada, en particular si hay población que pueda resultar afectada.

Como los CTs generalmente se encuentran mar adentro, donde no existen estaciones meteorológicas, resulta difícil obtener mediciones directas y frecuentes de sus parámetros físicos, mismos que se emplean para inicializar modelos de pronóstico meteorológico utilizados por diferentes instituciones públicas y privadas encaminadas a tomar decisiones que minimicen los efectos de un CT sobre la población o sus intereses económicos los cuales pueden ser afectados por estos sistemas. Una forma de realizar mediciones directas en el interior de un CT a través de vuelos de reconocimiento y esto sólo es posible cuando los CT se encuentran lo suficientemente cerca de tierra y dentro del rango de acción de los aviones que cuenten con el equipo necesario para realizar las mediciones.

Cuando no es posible realizar estas mediciones directas, lo que ocurre en la mayoría de las ocasiones, se emplean técnicas de percepción remota para inferir los parámetros físicos de estos sistemas. Los dos principales instrumentos que sirven para estos fines son:

1. Los radares meteorológicos fijos en tierra, mismos que pueden mostrar con gran detalle, la estructura convectiva, perfil de hidrometeoros y el campo de viento. Su utilidad se encuentra limitada por el radio de cobertura de los radares, mismo que oscila entre 250 y 500 km dependiendo del radar en cuestión, y por la densidad de la red de radares, por lo que no resultan útiles cuando los CT se encuentran mar adentro, además de que son muy costosos, dificultando establecer una red que cubra grandes superficies como la costa occidental de México, cabe mencionar que la red de radares fijos en el país es de solamente 8 radares, de los cuales 7 se encuentran cerca de la costa, y pueden monitorear los ciclones que se aproximan o viajan cerca de la costa [[http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=14&Itemid=16](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=14&Itemid=16)].
2. Los satélites, la información obtenida de ellos puede ser esporádica o frecuente y dependerá del tipo de órbita y de instrumentos de cada satélite. Un tipo particular de

estos satélites son los geoestacionarios, aquellos que se mantienen fijos con respecto a un punto fijo en la tierra, estos pueden observar un CT durante toda su vida en intervalos de tiempo del orden de algunos minutos, con el propósito de monitorear a los CT, solamente pueden tomar imágenes en algunas bandas del espectro electromagnético (infrarrojo, vapor de agua, visible y otros) por lo que es necesario estimar a partir de estas imágenes, los parámetros físicos de estos sistemas, las cuales no siempre son las mejores. Por otro lado, existen satélites cuyas órbitas son más bajas, con respecto a los satélites geoestacionarios, y poseen gran cantidad de instrumentos que sirven para estimar en una forma mucho más adecuada los parámetros del sistema, la desventaja que presentan estos satélites es que efectúan observaciones esporádicas sobre un CT lo cual minimiza la disponibilidad de datos necesarios para inicializar óptimamente los pronósticos numéricos de estos sistemas.

Considerando estas fuentes de observación de CT se destaca que en la mayoría de las situaciones, los CT solamente son monitoreados a través de satélites geoestacionarios, por lo que inferir con gran detalle la estructura convectiva (misma que se emplea para estimar la cantidad de lluvia) y los campos de viento de estos sistemas resultan un reto en la actualidad, por lo que se han desarrollado diversos métodos y técnicas para inferir estas características.

En el caso de los procesos convectivos, se han creado técnicas para detectar la actividad eléctrica. Para lograr este objetivo se han construido diversas redes que detectan las ondas electromagnéticas emitidas por los relámpagos, en este sentido se pueden mencionar dos tipos diferentes de redes que si bien operan bajo el mismo principio físico, tiene alcances y fines distintos.

El principio físico sobre el cual yacen estas redes es la detección de ondas electromagnéticas que producen las descargas eléctricas, cabe mencionar que los relámpagos además de emitir en la región del visible emiten una gran variedad de frecuencias del espectro electromagnético. De esta forma algunas redes se concentran en detectar frecuencias altas, las cuales son absorbidas rápidamente por la atmósfera pero que son emitidas por la gran mayoría de los relámpagos, por lo que es necesario tener una red muy densa de detectores. Estas redes en general pueden detectar la gran mayoría de los relámpagos, mientras la red de detección sea lo suficientemente extensa y densa. Tal es el caso de la National Lightning Detection Network (NLDN) la cual solamente opera sobre los Estados Unidos y Canadá, cuenta con aproximadamente unas 100 estaciones y tiene una eficiencia de detección del 99%, es decir, detecta, en un sentido estadístico noventa y nueve de cada cien relámpagos (<http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Brochures%20and%20Datasheets/NLDN-brochure-B210412EN-F-low.pdf>).

Otras redes se centran en detectar ondas electromagnéticas de *muy baja frecuencia*, mismas que pueden viajar grandes distancias sin ser atenuadas por la atmósfera, sin embargo solamente los relámpagos más energéticos son los que producen ondas con estas frecuencias, por lo que es no es posible detectar todos los relámpagos, a pesar de esta aparente desventaja solamente es necesario que la red este compuesta por algunos detectores para detectar los relámpagos formados sobre grandes extensiones, llegando a tener cobertura mundial con

apenas unas decenas de detectores, tal es el caso de la World Wide Lightning Location Network (WWLLN), la cual cuenta con 68 detectores y tiene una eficiencia de detección del 30% (<http://wwlln.net/new/network/>).

Algunos de los aspectos que pueden modular la cantidad y distribución de rayos en un CT son:

- La variación vertical de los vientos horizontales (cortante vertical);
- El movimiento y rapidez de traslación del CT,
- La cantidad de núcleos de condensación de nubes (CCN),
- La temperatura de la superficie del mar (SST),
- La hora local.

Estos procesos o variables pueden mostrar donde y cuando son más frecuentes las descargas en un CT, lo que puede ser traducido en identificar la región del CT donde la convección es más intensa.

Las redes de detección de descargas globales son una realidad en la actualidad, aunque su eficiencia de detección puede ser aproximadamente del 30% y detectan principalmente relámpagos entre la nube de tormenta y la tierra y en menor medida entre nube y nube, es posible estudiar la convección en formas que antes no eran posibles debido que no se contaban con maneras de monitorear la convección durante toda la vida de un CT en cualquier cuenca del mundo, esta nueva forma de “observar” la convección puede ayudar a comprender el proceso de la convección cuando un CT se encuentra inmerso en un ambiente con los parámetros y procesos listadas en el párrafo anterior.

A través de esta variable se han revelado procesos que muestran cambios que ocurren en el ojo de los CTs, cuando se presenta esta estructura; por otro lado se cree que los procesos dinámicos en el ojo y su pared rigen en gran medida la intensidad y su evolución temporal, aunque en la actualidad no se encuentran totalmente comprendidos estos procesos. También se han revelado estructuras convectivas en las bandas de lluvia externas y como son afectadas por variables externas como la cantidad de CCN y posibles relaciones íntimas entre las bandas externas y la pared del ojo.





---

*Quando tambien en la interpretacion de los rayos ha llegado tan adelante la ciencia, que pronostica las cosas que han de suceder en dia determinado: y si acaso han ellos de fenecer el hado, o antes han de dar principio a otros hados, que en vno y otro se escondan con infinitas experiencias publicas y secretas*

---

*Naturalis historia  
Libro II Cap. LIV  
Del llamar, o atraer los rayos.  
Plinio El viejo (ca. 77 D.C.)*

---





## OBJETIVOS

1. Comprender como ocurren los procesos de electrificación dentro de los CT con ayuda de material bibliográfico (capítulos 1 y 2).
2. Documentar la ocurrencia de rayos dentro de CT en el Pacífico Nororiental entre 2006 y 2009.
3. Describir la modulación de los siguiente factores sobre la cantidad de rayos, así como su distribución azimutal bajo la influencia de variables vectoriales:
  - 3.I la cortante vertical (capítulos 5 y 8);
  - 3.II movimiento del CT (capítulos 5 y 8);
  - 3.III La intensificación e intensidad de cada CT (capítulo 7);
  - 3.IV la variación diurna en los CTs (capítulo 8);
  - 3.V temperatura de la superficie del mar (SST) (capítulo 8) y
  - 3.VI cantidad de núcleos de condensación de nube (CCN) (capítulo 8).

## **HIPÓTESIS GENERAL**

En general los relámpagos en el interior de CTs son eventos transitorios y esporádicos, los cuales pueden potenciarse o inhibirse dependiendo del ambiente en el que se encuentre inmerso el CT, los principales elementos que influyen sobre la producción de relámpagos son los mencionados en los objetivos.

Para evaluar la influencia de estos elementos se ha considerado que los CTs que ocurren en el Pacífico Nororiental pueden ser clasificados en clústeres (agrupaciones o conjuntos) de tal forma que cada uno de estos clústeres tenga características ambientales diferentes a las de los otros clústeres, de tal forma que cada clúster sirva identificar mejor la influencia de uno solo de los factores que influyen en la producción de relámpagos.

Cada uno de estos factores ambientales no influye sobre los otros de tal forma que se puede considerar que estos son variables independientes, lo cual facilita relacionar la cantidad de relámpagos con cada uno de estos factores sin que se consideren relaciones complejas entre los factores que se estudian. En este sentido la clasificación en clústeres permite minimizar estas relaciones entre estos factores. Sin embargo, estos factores pueden influir de tal forma que combinaciones de estos tiendan a minimizar o a maximizar la producción de relámpagos en los CTs.

Dada la gran cantidad de factores ambientales, las hipótesis asociadas a la influencia de cada uno de los factores sobre la producción de relámpagos serán discutidas en los capítulos y secciones alusivos a cada uno de ellos, con el propósito de que el estudio de su influencia sobre la producción de relámpagos se encuentre en una sola sección y se facilite la comprensión de las ideas planteadas en cada una de estos factores.

## **DATOS Y METODOLOGÍA**

Para lograr los objetivos y evaluar las hipótesis se utilizaron diversos tipos de datos aquí descritos.

### **Fuentes de datos**

#### **a) Intensidad del ciclón tropical (Best-Track).**

La base de datos Best-Track (<http://www.nhc.noaa.gov/data/#hurdat>) es un análisis individual de cada ciclón tropical posterior a su disipación, está basada en todas las observaciones disponibles, incluyendo aquellas que no estuvieron disponibles en tiempo real.

#### **b) Posición, dirección y velocidad del ciclón tropical (Hursat).**

Imágenes de satélites geostacionarios en formato Net-CDF obtenidas de la base de datos Hurricane Satellite (HURSAT) Data ([www.ncdc.noaa.gov/oa/rsad/hursat](http://www.ncdc.noaa.gov/oa/rsad/hursat)), con una resolución espacial de  $0.07^\circ \times 0.07^\circ$  y una temporal de 3 horas centradas en el centro de cada CT basándose en la base de datos Best-Track, lo cual garantiza consistencia con esta fuente de datos y duplica la cantidad de posiciones de cada CT con respecto a la base datos Best-Track.

#### **c) Datos de ubicación de relámpagos.**

La ubicación de los relámpagos en este estudio se obtuvo con World Wide Lightning Location Network (WWLLN), los archivos indican la posición y el momento en que se produce un relámpago.

#### **d) Datos de viento y cortante vertical.**

Los campos de viento se obtuvieron del North American Reanalysis Region (NARR), el cual es una base de datos de variables atmosféricas con un dominio que abarca básicamente a Norteamérica, al Atlántico Noroccidental y al Pacífico Nororiental; cuenta con una resolución espacial aproximada de  $0.29^\circ \times 0.29^\circ$  y 28 niveles verticales (para calcular la cortante se emplean los niveles de 850 hPa y 200 hPa), la resolución temporal de estos campos es de 3 hasta horas, lo cual la hace adecuada para trabajar con las imágenes HURSAT dada su resolución espacial como temporal.

#### **e) Estimación de la cantidad de aerosoles.**

La cantidad de aerosoles es estimada a partir del espectrorradiómetro de resolución moderada (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) montado en el satélite sincrónico al sol Terra, dicho satélite siempre pasa a las 10:00 hrs tiempo local, dado un punto sobre la superficie de la tierra. El producto diario de nivel 3 MOD08\_D3, con una resolución

espacial de un grado y una temporal de un día es empleado para estimar el valor promedio del espesor óptico de los aerosoles (AOD) a 500 nm ([http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/MOD08\\_D3](http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/MOD08_D3)) en las inmediaciones un CT.

#### **f) Temperatura de la superficie del mar.**

Para estimar la temperatura de la superficie del océano (SST) se empleó el producto Microwave (MW) + InfraRed (IR) OI Sea Surface Temperature (SST) derivado de la interpolación óptima entre la MW SSTs (AMSR-E y TMI) y la IR SST (MODIS), la cual posee una resolución espacial de  $\sim 0.09^\circ \times 0.09^\circ$  y temporal de un día. Además este producto posee una máscara de tierra para discernir los cuerpos de agua de los continentes.

### **Metodología**

Con base en trabajos anteriores (Lugo, 2011), los CTs formados en la cuenca del Pacífico Nororiental (PNO) entre las temporadas 2006 y 2009, fueron clasificados subjetivamente en seis clústeres de acuerdo a la forma de la trayectoria, a las condiciones sinópticas y termodinámicas, así como su proximidad a la costa.

En cada uno de estos clústeres se estudiaron las asimetrías ocasionadas por la cortante vertical y el movimiento del CT en la distribución de los relámpagos producidos por este, en forma semejante a la hecha por Corbosiero y Molinari (2003). Sin embargo el dominio espacial del NARR no alcanza a cubrir todos los periodos de tiempo (intervalos) correspondientes a los CTs de la muestra, por lo que dichos intervalos no fueron estudiados, y cuando se compara con el movimiento, se estudiaron solamente los intervalos que se encuentran dentro de este dominio. Además se validaron estos resultados comparando los resultados producidos por el algoritmo diseñado para este fin aplicado sobre la muestra de CT iguales a los empleados por Abarca (2011) y se comparó con los resultados obtenidos por él.

Además se estudió la influencia de la cortante en combinación con el movimiento con las descargas, empleando diagramas de dispersión entre el ángulo formado por la cortante y el vector de movimiento (medido en sentido de las manecillas del reloj) y la cantidad de relámpagos en cada intervalo así también el diagrama de dispersión entre el cociente de la rapidez de traslación y la intensidad de la cortante y la cantidad de relámpagos.

Las posiciones individuales de los relámpagos fueron asociados a puntos de una malla regular tridimensional, con la misma resolución tanto temporal (3 horas) como espacial ( $0.07^\circ \times 0.07^\circ$ ) que el Hursat, con el propósito de estudiar la densidad, de esta forma, los relámpagos asociados un tiempo en particular (intervalo de tiempo), serán aquellos que se produjeron una hora y media antes y una después de la hora en que se encuentra centrada la imagen HURSAT.

La posible relación entre la intensidad de un CT y la intensificación será estudiada realizando histogramas para identificar bajo que situaciones es más probable que se formen relámpagos, así como bajo qué circunstancias la cantidad de relámpagos se incrementa. Así también, con ayuda de diagramas de dispersión se estudiará la posible relación entre la cantidad de relámpagos y la superficie que ocupan los relámpagos en el CT.

---

La posible influencia del ciclo diurno en los procesos convectivos en CT será evaluada elaborando histogramas de la cantidad de relámpagos producidos en diferentes horas (tiempo local) para identificar en que parte del día se producen más descargas por cada clúster, esta parte se seguirá del artículo de Kucieńska et al (2012).

Una forma cruda pero representativa de la energía termodinámica y de la cantidad de vapor de agua en los niveles inferiores en un CT disponible es la SST, por lo que para evaluar la importancia e influencia de estos parámetros en la producción de relámpagos también se realizaran diagramas de dispersión entre la SST y la cantidad de relámpagos sobre cada clúster.

Para estudiar la influencia de los aerosoles sobre cada clúster, se asumió que estos son bien representados por el valor del AOD (Kucieńska , Raga, & Romero-Centeno, 2012) y (Altaratz, Koren, Yair, & Price, 2010), de este forma, empleando el producto MOD08\_D3 del satélite Terra se obtuvieron los valores del AOD para estimar la cantidad de aerosoles en las inmediaciones de cada CT y se elaboraron diagramas de dispersión para evaluar la influencia de los aerosoles sobre los CT.

Algunas consideraciones particulares de la metodología se discutirán en los capítulos correspondientes.



# CAPÍTULO 1

## ACERCA DE LAS NUBES EN CICLONES TROPICALES

Algunos sistemas convectivos tropicales de mesoescala (sistemas con escala horizontal del orden de 100 km) pueden evolucionar en tormentas ciclónicas (circulación alrededor de un punto en sentido de las manecillas del reloj en el hemisferio norte). Estas tormentas se originan a partir de pequeñas perturbaciones en la escala sinóptica, son altamente simétricos con respecto a su centro, el cual puede encontrarse sin una cubierta nubosa, en este caso es llamado ojo, contrastando con una cubierta de nubes cirros alrededor de este ojo. Las nubes altas presentan un movimiento anticiclónico (circulación en sentido contrario a las manecillas del reloj en el hemisferio norte) divergente, mientras que las nubes cúmulos y estratiformes giran en una espiral ciclónica hacia el centro de la tormenta (Houze R. A., 1993).

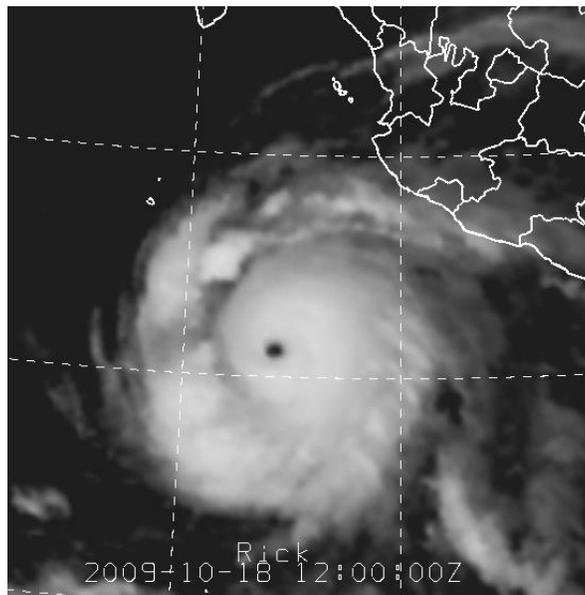


Figura 1-1. Imagen del HR Rick (2009) en el infrarrojo.

Se considera que un CT es un HR cuando los vientos horizontales sostenidos durante un minuto a nivel de la superficie cerca del vórtice u ojo son mayores a  $32 \text{ ms}^{-1}$ , se forman generalmente a bajas latitudes, pero no a menos de  $5^\circ$  del ecuador, donde la fuerza de Coriolis tiende a cero. También se requiere que exista una vorticidad inicial en el ambiente sinóptico que alberga al CT, esto se puede deducir de la teoría de fluidos, la cual indica que si un campo

de velocidades tiene vorticidad nula (irrotacional) en un tiempo  $t$  entonces el campo será irrotacional todo el tiempo (en el caso de un fluido barotrópico).

Además se requiere que la SST se encuentre por arriba de los  $26.5^{\circ}\text{C}$ , de otra forma a cantidad de energía en los niveles bajos será insuficiente para sostener a la tormenta durante largos periodos de tiempo; que el aire sea condicionalmente inestable y que la cortante vertical del viento sea débil. Esto último es requerido para prevenir que haya un flujo de aire externo (mismo que en niveles medios y superiores es seco) intenso que atraviese a la tormenta y evite su formación vertical.

Sus trayectorias son influenciadas por el flujo de aire entre los 3 y 8 km de altura, sin embargo los factores que controlan su movimiento son complejos.

Cada uno de los factores mencionados en los párrafos anteriores, es motivo de estudios adicionales y ajenos a los propósitos de este trabajo, aunque no menos importantes. Dado los objetivos y alcances de este trabajo resulta más útil describir cómo son las nubes en los CTs ya formados, en este sentido el artículo de Houze (2010) es una compilación de muchos esfuerzos y trabajos dedicados a estudiar las nubes en los CTs, por lo que las conclusiones de este trabajo resultan muy adecuadas para exponer brevemente los tipos y características de las nubes que ocurren en los CTs, mismas que se exponen a continuación en las siguientes secciones:

### **Las nubes en el ojo de un CT.**

Cuando un CT se encuentra completamente formado este muestra en el centro una región donde los vientos son calmos, la cual se encuentra rodeada por una pared de nubes con desarrollo vertical.

Esta región de vientos calmos (el ojo, centro de la figura 1-1) generalmente se encuentra libre de nubes, debido a que en el ojo los movimientos verticales son descendentes, y las parcelas de aires se incorporan en la pared del ojo conforme van descendiendo. Sin embargo cuando la temperatura la superficie del mar (SST) es alta y hay una mezcla eficiente del aire húmedo ascendente proveniente de la capa límite con el aire que desciende se forma una región estable donde se puede formar una cubierta nubosa de nubes estratocúmulos en niveles inferiores (Houze R. A., 1993), las cuales pueden cubrir todo el ojo, véase la figura 9 en Houze (2010) para observar en forma esquemática las nubes y movimientos en esta región del ojo.

### **La pared del ojo.**

La pared del ojo puede visualizarse como una región que rodea el centro del CT con nubes de desarrollo vertical, las cuales tienen características únicas en el mundo en el sentido de que estas nubes se encuentran formadas por parcelas de aire se mueven alrededor de un vórtice de baja presión, conservando su momento angular en todo momento, lo cual puede ser considerada como una buena aproximación, y se encuentran ascendiendo por esta región conservando su temperatura potencial equivalente ( $\theta_e$ ) (Rotunno & Emanuel, 1987).

Estas restricciones sobre el movimiento de la parcela inducen a que estas se alejen del centro del CT conforme vayan ascendiendo, ocasionando que la pared del ojo tenga una estructura oblicua con una simetría azimutal, en lugar de tener una estructura semejante a un tubo o cilindro, véase la figura 12 en Houze (2010) donde se muestra un esquema de estos movimientos.

Superpuestos a estos movimientos típicos también ocurren movimientos verticales intensos en regiones localizadas dentro del ojo, las cuales pueden llegar a formar celdas convectivas prácticamente verticales, esto puede ocurrir por varias razones:

- a) Mientras el CT se intensifica, el aire con una alta  $\theta_e$  fluye hacia el centro del CT mezclándose con el aire de la capa límite debajo de la pared del ojo produciendo una estratificación inestable en niveles inferiores.
- b) Los vientos máximos en el vórtice, situados en la pared del ojo, son supergradientes, implicando que en la pared haya un flujo de aire con alta  $\theta_e$  de los niveles inferiores.
- c) Modelos tridimensionales muestran que el anillo de vorticidad positiva situado dentro del radio de vientos máximos (RMW) muestra una inestabilidad barotrópica y termina rompiéndose formando pequeños vórtices con vientos máximos (eyewall vorticity máxima, EVM) los cuales incorporan aire con alta  $\theta_e$  de los alrededores (incluyendo el ojo) y se desarrollan verticalmente.

Estos EVM forman la base de corrientes ascendentes que resultan de la ingesta y mezcla de aire cálido y húmedo proveniente de la capa límite, esta corriente vertical tiende a ser vertical, debido a su resistencia inercial (se oponen a deformarse) a la cortante de viento en la región de la pared del ojo. En los EVM, tanto la vorticidad como las corrientes ascendentes pueden ser muy intensas.

Es posible que bajo circunstancias favorables se formen diversos EVM en la pared del ojo, los cuales pueden organizarse e intensificar el CT. En forma semejante a los sistemas convectivos (Vortical Hot Towers, VHT) que se forman cuando un CT se está formando, los cuales también se encuentran girando alrededor de un vórtice, también muestran vientos máximos, y máximos en la vorticidad, véase figura 2 para observar un esquema de las VHT y la 17 para observar un esquema de los EVM, ambas figuras en Houze (2010).

Observaciones de la reflectividad del radar en la pared del ojo han mostrado que estas nubes son muy diferentes a sistemas convectivos no asociados a CTs; siendo una de las principales características observadas en la reflectividad, su gran uniformidad con respecto a la altura, y una distribución de frecuencias muy localizada en todas las alturas. El eco característico de esta región es debido en gran parte a la circulación secundaria inclinada, lo cual es una propiedad de los movimientos de escala del vórtice del centro del CT, véase figura 32 en Houze (2010), donde se muestra la distribución de frecuencias de la reflectividad para varios niveles de altura.

Además de que la distribución de la reflectividad es muy localizada, también tiene valores extremos muy alejados de los valores típicos, los cuales se encuentran asociados a corrientes

ascendentes muy intensas superpuestas al movimiento básico asociado al vórtice en los EVM como se describió en párrafos anteriores.

La pared del ojo también muestra asimetrías, las cuales son derivadas de la ruptura de la rigidez inercial ocasionadas por el movimiento del vórtice del CT inmerso en un ambiente estacionario. Aunque en mayor medida la asimetría ocurrida en la pared del ojo es ocasionada por la cortante del viento horizontal de los alrededores del CT. Estos dos factores conllevan a movimientos ascendentes más intensos en la parte frontal de la pared con respecto al vector cortante. Las partículas de lluvia que resultan de estas corrientes ascendentes y que crecen en esta parte frontal son advectadas horizontalmente y diseminadas alrededor de la tormenta por los vientos tangenciales, véase figura 24 en Houze (2010).

### **Bandas de lluvia y paredes secundarias.**

Fuera de la pared del ojo, las nubes del CT pueden tomar una de las siguientes configuraciones, esquematizadas en la figura 30 de Houze (2010):

- a) La banda principal de lluvia es una banda cuasi-estacionaria la cual se mueve en un movimiento espiral “desenroscándose” de la pared del ojo hasta llegar a ser, al menos en una primera aproximación tangente a esta.

El mecanismo básico que rige a esta banda consiste de celdas convectivas, las cuales se forman cerca del ojo y se van alejando con un movimiento espiral hacia afuera de la pared del ojo, conforme estas celdas se van alejando van perdiendo su estructura convectiva disipándose y formando regiones de lluvia estratiforme las cuales se pueden considerar tangentes al ojo.

Estas celdas son mucho menos profundas que las que se forman en la pared del ojo, debido a que en los niveles superiores hay una divergencia en el campo de viento, la cual fluye de la pared del ojo hacia el exterior del CT impidiendo que las celdas de esta banda sean profundas.

Las corrientes ascendentes de estas celdas convectivas en forma semejante a lo que ocurre en la pared del ojo también se encuentran inclinadas hacia afuera, con excepción de que los movimientos ascendentes se localizan solamente en las celdas convectivas. Estas corrientes ascendentes fortalecen los vientos horizontales creando un segundo máximos en la intensidad de los vientos horizontales (este viento tiene una dirección en general a lo largo de la banda de lluvia, en forma análoga a como ocurre en el ojo). La mayor diferencia que existe entre esta banda y la pared del ojo consiste en que en esta banda las corrientes descendentes son más intensas que en el ojo y logran penetrar la capa límite.

Esta corriente descendente se sitúa justo donde la lluvia en esta banda es más intensa y transporta aire con baja  $\theta_e$  hacia la capa límite el cual es transportado radialmente hacia el centro del CT ocasionando que este no ingiera aire con alta  $\theta_e$  y este pueda debilitarse parcialmente. Además las corrientes ascendentes tienden a profundizar la convección en las celdas convectivas vigorizando las corrientes descendentes que ocurren en la parte interior de la banda de lluvia debido a los efectos del gradiente vertical de presión (en estas celdas convectivas la aproximación hidrostática no ocurre) y a fuerzas de flotación

negativas. Estas corrientes descendentes ayudan a fortalecer la circulación en el vórtice del CT.

Estas situaciones se esbozan en la figura 36 de Houze (2010).

- b) Las bandas de lluvia secundarias son bandas de lluvia que se propagan en espiral desde el núcleo interno de la tormenta hacia sus exteriores, sus características cinemáticas son semejantes a ondas de Rossby cilíndricas, de acuerdo con observaciones hechas con radar (Corbosiero K. L., Molinari, Ayyer, & Black, 2006) y con modelos numéricos reales (Chen & Yau, 2001) y (Chen, Brunet, & Yau, 2003), véase figura 38 de Houze (2010).
- c) Las paredes secundarias se forman en el núcleo interno alrededor de la pared del ojo, a partir de la coalescencia de bandas de lluvia sobre un anillo. El proceso que rige esta coalescencia que transforma bandas de lluvia y celdas de convección en paredes secundarias, aunque se no se conoce con gran detalle las causas físicas que originan esta coalescencia hasta la fecha, se ha propuesto que consiste en la combinación de procesos de axisimetrización, cambios en la estructura media del vórtice (Terwey & Montgomery, 2008), o cambios en factores ambientales como la humedad (Ort, 2007).

Esta pared secundaria es cualitativamente igual a la pared del ojo, pero más somera que esta última, debido principalmente a la divergencia en los niveles superiores originada en el centro del CT.

Entre la pared primaria (pared del ojo) y la pared secundaria existe una región donde la humedad es mínima y con fuertes corrientes descendentes, llamada el foso (moat, en inglés), la cual actúa como un ojo que rodea la pared primaria. Estas características del foso ayudan a destruir la pared primaria debido a la baja humedad y la alta temperatura de las parcelas de aire secas que descienden (Houze, Chen, Smull, Lee, & Bell, 2007). A pesar de esta situación, en ocasiones la pared primaria persiste durante algún tiempo, tal vez, debido a que el flujo de aire húmedo que va del exterior del vórtice hacia la pared primaria proveniente de la capa límite persiste.

Las figuras 41 C y 42 en Houze (2010) muestran estas características y la 41 B muestra la pared secundaria y la pared del ojo a través de la reflectividad en el radar a bordo de una visión de reconocimiento.

- d) Bandas de lluvia distantes, estas bandas de lluvia de nubes convectivas se forman fuera de la región de influencia del vórtice y de su dinámica, o bien pueden ser prolongaciones de la banda principal. Estas bandas están compuestas principalmente de nubes cumulonimbos prácticamente idénticas a nubes convectivas que no están asociadas a CTs. La convección en esta región puede ser más profunda que en la banda principal o en las paredes secundarias debido a que se encuentra más allá de la influencia del flujo superior proveniente del centro del CT.

### **Microfísica de nubes y electrificación.**

A partir de datos de vuelos de reconocimiento en CTs se ha observado que los CTs son grandes productores de hielo en niveles medios y superiores. Esta característica junto con la pared del ojo inclinada permite imaginar a los CT como fuentes que arrojan partículas las cuales en una mayor parte cuentan con alguna componente en fase sólida que surgen de la

pared del ojo. Cabe mencionar que en la pared del ojo también se producen grandes cantidades de graupel.

De esta forma las partículas con fase sólida o mixta que surgen del CT son advectadas por el flujo divergente de los niveles superiores en la pared del ojo o la banda de lluvia principal forman hidrometeoros, los cuales se mantienen suspendidos durante mucho tiempo y producen precipitación estratiforme donde se derriten y caen. Los vientos horizontales que advectan estas partículas pueden hacer que estos hidrometeoros giren alrededor del centro del CT unas 1.5 veces antes de que estas caigan, de esta forma la precipitación estratiforme que originan estas partículas puede cubrir grandes extensiones y precipitar lejos de las celdas convectivas donde se generaron estas partículas.

La forma geométrica y la dinámica de la pared del ojo conllevan a que los procesos de electrificación sean diferentes a los que ocurren en tormentas eléctricas ordinarias. Mediciones tomadas de vuelos de reconocimiento (Black & Hallet, 1986) y (Black & Hallet, 1999) sobre los CTs muestran que las partículas con cargas negativas producidas por las colisiones entre graupel y partículas de hielo en la pared del ojo, las cuales se mantienen dentro de la pared, y posteriormente advectadas hacia arriba y hacia afuera del centro del CT producen un gradiente vertical en el campo eléctrico el cual se puede descargar en forma de relámpagos. Esta forma de electrificación es diferente a como se observa en las distribuciones tripolares en tormentas eléctricas típicas. Si bien no se ha estudiado los procesos de electrificación en las celdas que se encuentran en las bandas distantes, es de suponerse que es semejante al de tormentas eléctricas ordinarias.

En el siguiente capítulo se ahondará la más acerca de la electrificación tanto en nubes de tormenta ordinarias como en las que ocurren en los CTs, así como su relación con la convección en las celdas que la producen.

## CAPÍTULO 2

### DE LA ELECTRIFICACIÓN EN NUBES A CICLONES TROPICALES

#### **Acerca de la electrificación en nubes de tormenta, un poco de historia.**

Los estudios de la electricidad dentro de nubes comenzaron a realizarse desde principios del siglo XX, en especial los trabajos de George C. Simpson en (1909) y (1927) basados en mediciones de la carga de las gotas de lluvia y en experimentos con gotas de agua, formaron una de las primeras teorías del origen de la electricidad dentro de las tormentas eléctricas, en la cual el papel de las corrientes ascendentes y la ruptura de gotitas, debido a la inestabilidad dinámica, las cuales poseen una carga eléctrica negativas eran los causantes de la separación de carga que dan origen a los relámpagos. Estudios posteriores (Simpson & Scrase, 1937), empleando globos con sondas, mostraron que la distribución de la carga dentro de las nubes es multipolar y se observó que la separación entre las regiones positivas superiores y las negativas inferiores ocurre aproximadamente a los  $-10^{\circ}\text{C}$  o menos, aunque no se pudo explicar la presencia de carga positiva en el tope de la nube, pero se reconoció que deben existir dos procesos físicos que rigen la separación de cargas, cada uno asociado a las distintas fases del agua (sólida y líquida).

La carga positiva del tope de la nube posteriormente fue explicada (Vonnegut, 1953) si se considera que iones positivos cerca de la superficie de la Tierra son atraídos por la nube con carga negativa, mismos que son capturados por las gotitas que son transportadas por la corriente ascendente al tope de la nube, lo cual forma una región positiva que a su vez, atrae iones (partículas de Aitken, en particular) negativos que son capturados por las gotas que caen, fortaleciendo las regiones inferiores con carga negativa. Sin embargo, recientes experimentos numéricos aplicando estas teorías (Helsdon, Gattaleeradapan, Farley, & Waits, 2002) resultaron en distribuciones de carga eléctrica desorganizadas, así como campos eléctricos débiles.

Teorías y experimentos más recientes sugieren que el proceso de carga de las partículas en la nube debe ocurrir en presencia de un campo eléctrico de fondo (Saunders, 2008), como puede ser el campo eléctrico de la atmósfera (positivo en las regiones superiores y negativo en las inferiores), estas teorías consideran que las gotitas de agua colisionan y rebotan con la cara inferior del graupel, el cual tiene una velocidad mayor que las gotitas y una carga alineada con el campo eléctrico de fondo, positiva en la cara inferior y negativa en la cara superior, y las gotitas adquieren carga positiva y son transportadas por la corriente vertical reforzando el campo eléctrico de fondo. Bajo estas circunstancias, la transferencia de carga también puede

ocurrir con la coalescencia parcial entre pares de gotitas o gotas de tamaños semejantes, aunque en esta situación, la transferencia de carga es tal que tiende a minimizar el campo de fondo.

Este mecanismo, llamado inductivo, no siempre ocurre, pues se ha observado (Christian, Holmes, Bullock, Gaskell, & Illinworth, 1980) que el graupel, en etapas iniciales de la tormenta, tiene una carga eléctrica mayor que la que puede ser generada por el campo eléctrico más intenso medido en tormentas. En este sentido se ha observado que la colisión y astillamiento entre graupel y cristales de hielo provocan la separación de cargas (Saunders, 2008), aunque el signo de la carga que adquiere el graupel y el que adquiere el cristal depende tanto de la cantidad de agua sobreenfriada en esa región de la nube como de la temperatura a la que se encuentran estas partículas; estas observaciones muestran que el graupel a altas temperaturas ( $> -20^{\circ}\text{C}$ ) inmerso en una cantidad fija de agua sobreenfriada se carga positivamente, pero si el contenido de agua sobreenfriada disminuye la carga en el graupel puede invertirse, este tipo de mecanismos puede explicar la estructura dipolar o incluso tripolar que se ha observado en distintas nube de tormenta.

En la actualidad no existe una sola teoría que explique en conjunto todo el proceso de electrificación en una nube de tormenta. Sin embargo, desde los trabajos de Simpson (1937) hasta el presente (Saunders, 2008), se ha reconocido que los principales mecanismos de separación de carga están predominantemente ligados a la fase sólida del agua, ya sea como cristales o como granizo y a las corrientes ascendentes dentro de las nubes de tormenta. El trabajo de Takahashi (1975) reafirma la importancia de la fase sólida, pues él estudió los mecanismos de separación de carga en nubes calientes (nubes sin presencia de fase sólida) y concluyó que estas nubes podrían llegar a producir relámpagos solo si alcanzaran toques tan altos como los 7 km sobre el suelo, lo cual difícilmente podría suceder sin que haya un cambio de fase, puesto que a esas alturas la nube ha superado el punto de congelamiento del agua.

### **Los relámpagos como estimación de la intensidad y convección en una tormenta.**

Dada la naturaleza de los procesos de separación de carga en nubes de tormenta se ha ligado la producción de relámpagos con las características verticales de las nubes de tormentas (corrientes verticales y el volumen en donde ocurre esta corriente, perfil vertical de temperaturas y cantidad de hielo precipitable) realizándose numerosos esfuerzos Gatlin & Goodman, (2010), Jacobson & Heanver (2004) y (Price, Asfur, & Yair, 2009) para emplear las descargas como indicadores de la convección con el objetivo final de poder emplear las descargas como pronosticadores de la convección.

Los radares meteorológicos han jugado un papel fundamental para el estudio de las convección en las tormentas, puesto que con los perfiles verticales de la reflexión del radar (PVRR) se puede estudiar remotamente la posición de las regiones de fase sólida y mixta (agua líquida y sólida) dentro de las tormentas, de esta forma, con los PVRR se han encontrado diferencias en la estructura vertical de los sistemas convectivos de mesoescala (SCM) oceánicos y continentales (Zipser & Lutz, 1994), mostrando que los SCM oceánicos

tienen una región con fases mixta y sólida mucho menor que los continentales, además presentan corrientes verticales débiles en los primeros kilómetros de altura y un perfil vertical de temperatura que varía poco en contraste con los SCM continentales, lo cual se traduce en un proceso de separación de cargas poco eficiente y con pocas posibilidades de producir relámpagos, contrario a los SCM continentales. Este contraste discutido por Williams (2002) es explicado empleando argumentos del método de la parcela, y es debido a que la base de una nube oceánica (continental) se encuentra más (menos) cerca de la superficie terrestre, puesto que el gradiente vertical de la temperatura de bulbo seco es menor (mayor) en el océano (continente) y la humedad relativa alta, 80% (baja, 50%), lo que ocasiona que la parcela se condense en regiones de menor (mayor) altura, lo que se traduce en condensación a altas (bajas) temperaturas.

Otra explicación de este contraste apela a la diferencia en la cantidad de aerosoles (Rosenfeld, y otros, 2008) que sirven como núcleos de condensación de nube (CCN) que existen entre las regiones oceánicas (baja concentración de aerosoles) y continentales (alta concentración de aerosoles), la cual consiste en que una gran cantidad de CCN provoca un crecimiento en el número de gotitas, haciendo menos eficientes los procesos de colisión coalescencia, lo cual conlleva a suprimir la formación de gotas en las regiones cálidas de la nube, esta gran cantidad de gotitas pueden ser advectadas por las corrientes ascendentes, provocando que las regiones de bajas temperaturas contengan gran cantidad de partículas. Esta influencia de los aerosoles ha sido identificada y observada (Kucieńska, Raga, & Torres-Puente, 2011) llegando incluso a correlacionarse la actividad humana (aerosoles antropogénicos) con la intensidad de la lluvia a través de ciclones semanales (Bell T. L., Rosenfeld, Kim, Yoo, Lee, & Hahnenberger, 2008), pero la influencia directa de los aerosoles sobre la electrificación de una tormenta es un tema actual de debate (Williams & Stanfill, 2002), (Bell, Rosenfeld, & Kim, 2009) y (Williams, y otros, 2002).

Trabajos empleando radares realizados en tormentas continentales individuales (Deierling & Petersen, 2008) muestran correlaciones lineales significativas ( $r^2 \geq 0.93$ ) entre el volumen dentro de la nube donde las corrientes verticales son mayores a  $5 \text{ ms}^{-1}$  y la temperatura es menor a  $-5^\circ\text{C}$  con la cantidad de relámpagos producidos por minuto, siendo muy evidente la correlación entre ellos cuando estos volúmenes son mayores a  $10^{12} \text{ m}^3$ . Este mismo trabajo muestra que las series de tiempo del promedio de relámpagos por unidad de tiempo, de la cantidad de hielo precipitable y del volumen de aire donde las corrientes ascendentes son mayores a  $5 \text{ ms}^{-1}$  muestran estar muy correlacionadas. También se han realizado trabajos globales empleando radares dispuestos en el satélite TRMM, que muestran una alta correlación entre la cantidad de hielo precipitable y la cantidad de relámpagos producidos (Petersen, Christian, & Rutledge, 2005).

Se han hecho esfuerzos enfocados en pronosticar la intensidad de una tormenta y algunos resultados consisten en algoritmos que permiten pronosticar en el corto plazo (hasta 27 minutos) la "severidad" de una tormenta a partir de observar únicamente cambios intensos en la cantidad de relámpagos producidos (Gatlin & Goodman, 2010), estos esfuerzos se realizaron sobre tormentas individuales continentales. Sin embargo, en general una relación

útil para el pronóstico la “severidad” de la convección, debe considerar el tipo de lluvia (cálida o fría), su relación con los relámpagos y otros factores, puesto que esta relación depende de cada lugar (Kucieńska, Raga, & Torres-Puente, 2011).

### **La convección en los ciclones tropicales aproximada a través de la actividad eléctrica.**

Estudiar la convección en las tormentas con el objeto de pronosticar su intensidad, resulta difícil de hacerse sin ayuda de radares meteorológicos; por lo que emplear la cantidad de descargas como un indicador indirecto de la convección, puede ayudar a conocer la convección en sistemas que se encuentren fuera del alcance de los radares.

En este sentido, los ciclones tropicales (CT) son sistemas convectivos que pasan la mayor parte de su vida mar adentro y generalmente fuera del alcance de los radares, pero cuando tocan tierra estos pueden ocasionar grandes pérdidas humanas y económicas si hay poblaciones que sientan los efectos de estos. Por lo que es importante estudiar y tener la capacidad de pronosticar la convección en los CT.

Citando a Lyon y Keen (1994), *“Basándose principalmente en evidencia anecdótica, los meteorólogos generalmente han considerado la actividad eléctrica relacionada con las tormentas tropicales como algo minúsculo e irrelevante”*, sin embargo en la actualidad y con ayuda de técnicas de percepción remota se han observado y estudiado relámpagos dentro de los CT con el mismo objetivo que los relámpagos formados en las tormentas continentales, encontrar estructuras convectivas en los CT, la intensidad de estos así como la evolución temporal de estos, aunque a la fecha no hay algún algoritmo operativo aplicable a la convección en los CTs.

Las primeras observaciones de la composición de hidrometeoros en CTs por debajo de la isoterma de 0°C fueron hechas por Black y Hallet (1986), y encontraron que la cantidad de agua sobreenfriada era minúscula y limitada por la isoterma de los -10°C (por encima de esta isoterma se encuentra gran cantidad de cristales de hielo y copos de nieve) en el caso de CT maduros, excepto donde las corrientes ascendentes de la pared del ojo son intensas ( $> 5\text{ms}^{-1}$ ). En el caso de los CT en desarrollo, la presencia de agua sobreenfriada es mayor en todo el sistema.

Estudios posteriores (Lyons & Keen, 1994) en CT individuales empleando las primeras redes de detección terrestre de relámpagos observaron que los relámpagos sirven de ayuda para identificar las celdas donde se origina la convección profunda y cómo estas celdas pueden relacionarse con la intensidad y organización del CT. Además vislumbraron el potencial que tienen los relámpagos para poder pronosticar la intensidad de los CT.

Las celdas más profundas no siempre se encuentran en la pared del ojo (Lyons & Keen, 1994); aunque en ocasiones es posible identificar la pared de ojo a través de la localización de los relámpagos (Lascody, 1993) y son más frecuentes en las bandas exteriores de los CT. Molinari et al (1999) estudiaron la distribución radial de los relámpagos en los CT y encontraron tres regiones características, una región con mucha actividad eléctrica en el núcleo interno (0-60

km de la posición de la tormenta), después una región de mínima actividad (60-200 km) y la tercera región correspondiente a las bandas exteriores (200-300 km) con mucha actividad eléctrica.

Además Molinari et al (1999) estudiaron la precipitación en los CT y encontraron tres diferentes regímenes, uno dentro de la pared del ojo, que corresponde a regiones con corrientes ascendentes promedio menores a  $2 \text{ ms}^{-1}$ . La segunda región, en las afueras de la pared del ojo, muestra precipitación estratiforme, por lo que en esta región la actividad eléctrica es escasa. El tercer régimen de precipitación ocurre en las bandas exteriores y posee las características del aire en las inmediaciones, por lo que en esta región pueden formarse sistemas convectivos que pueden estar electrificados. En forma independiente Black y Hallet (1999) estudiaron las velocidades verticales, la distribución de carga y de los hidrometeoros dentro de CT y encontraron que la electrificación se encontraba en las regiones de precipitación convectiva, como es de esperarse, y propusieron un modelo conceptual, el cual se discute en la siguiente sección.

El trabajo de Molinari y otros (1999), así como posteriores (Demetriades & Holle, 2005) mostraron que los relámpagos pueden ser empleados como indicadores de los cambios en la estructura del núcleo interno (contracción de la pared del ojo, reemplazo de la pared del ojo, así como una disipación o intensificación muy rápida del sistema), también cuando una tormenta tropical se intensifica lo suficiente para alcanzar la categoría de huracán; en la situación opuesta, la escasez de relámpagos en el núcleo interno pueden servir como indicadores de que un CT se encuentra en un estado estacionario (sin cambios en su intensidad) de acuerdo a sus observaciones.

Dado que la dinámica de la pared del ojo se encuentra íntimamente relacionada con la intensidad de un huracán (HR) (Houze, Chen, Smull, Lee, & Bell, 2007) y (Montgomery, Bell, Aberson, & Black, 2006) es posible emplear la cantidad de relámpagos producidos por algún CT como un indicador en los cambios internos de la pared del ojo, así como para encontrar "torres convectivas extremadamente altas" dentro de un CT (Kelley, Stout, & Halverson, 2004), lo que a su vez puede ser empleado como un pronosticador de la intensidad de algún CT.

En el sentido de pronosticar la intensidad de un CT se han realizado esfuerzos tanto estadísticos como dinámicos, y en cualquiera de estos dos esfuerzos la detección de las descargas puede jugar un papel importante.

Hasta este momento solo se ha mostrado la posible utilidad de monitorear la actividad eléctrica dentro de los ciclones tropicales, pero no se ha discutido nada acerca de la variabilidad de las actividades eléctricas en casos particulares de CT, al respecto Black (1999) enfatiza la gran variabilidad entre casos individuales de CTs; contrastando el caso de Hugo (HR categoría 4, 1989), el cual solamente produjo 33 relámpagos durante las 18 horas antes de tocar tierra con el caso de Andrew (HR categoría 1, 1989), el cual produjo una gran cantidad de relámpagos, dada esta variabilidad Black (1999) enfatiza que *"las altas velocidades horizontales que caracterizan a los huracanes no son un buen predictor de la*

*actividad eléctrica”, pero “sí se pueden comprender los procesos físicos y dinámicos que conllevan a la actividad eléctrica en tormentas eléctricas, podemos sugerir las diferencias que deben ser buscadas entre tormentas eléctricamente activas o inactivas.”*

#### **Modelo conceptual de Black y Hallet (1999) de la electrificación de nubes en un CT.**

Esta sección presenta el modelo conceptual que propusieron Black y Hallet (1999) basándose en observaciones de vuelos de reconocimiento en las paredes del ojo de varios CT. Los aviones que realizaron dichos vuelos contaban con instrumentos capaces de medir el campo eléctrico en el plano perpendicular a la trayectoria del avión, cámaras para estimar las concentraciones de graupel, de cristales de hielo y de agua sobreenfriada, así como radares. El modelo es como sigue:

Consideremos el caso de una sola celda convectiva, bajo esta situación, la nucleación primaria del hielo ocurrirá entre los  $-10^{\circ}\text{C}$  y los  $-20^{\circ}\text{C}$  dependiendo del tipo de aerosol que sirva como núcleo de glaciación, mientras que los procesos secundarios ocurren a temperaturas de entre  $-4^{\circ}\text{C}$  y  $-8^{\circ}\text{C}$ , dependiendo de la cantidad de agua líquida disponible a esas temperaturas (Foster & Hallet, 1982). En esta situación la única fuente de hielo es la nucleación primaria seguida de los procesos secundarios que pueden formar graupel; si esta celda posee un yunque superior, como es común en los HR (como en una pared simétrica o fuera de la pared y en los flujos divergentes superiores), las partículas de hielo que precipiten del yunque o bien, que circulen en las paredes del ojo, pueden ocasionar la solidificación del agua sobreenfriada apenas esta alcance la isoterma de los  $-5^{\circ}\text{C}$  a través de procesos secundarios, de esta forma pueden ocurrir colisiones entre hielo y graupel, las cuales conllevan a la separación de carga entre el hielo y el graupel, que ocurre en un rango de temperaturas que va de los  $-5^{\circ}\text{C}$  a los  $-20^{\circ}\text{C}$ . Estos procesos solo pueden ocurrir en tormentas con vientos verticales lo suficientemente intensos que soporten la masa individual de cada uno de estos hidrometeoros.

Los CTs que estudiaron Black y Hallet, mostraban grandes regiones con altos contenidos de partículas sólidas a temperaturas cálidas ( $\sim -5^{\circ}\text{C}$ ), debido a hielo que fue advectado de diversas regiones del CT, este exceso de partículas sólidas inhibe la producción de graupel, minimizando la posibilidad de separación de cargas. Peor aún, si la liberación de calor latente es lenta (como cuando el hielo se funde) entre los  $-5^{\circ}\text{C}$  y los  $-15^{\circ}\text{C}$  las corrientes verticales tienden a disminuir su altura (Sax, Thomas, Bonebreak, & Hallet, 1979), ocasionando que las partículas más grandes precipiten y el sistema pierda carga eléctrica.

De sus observaciones, Black y Hallet sospecharon que los hidrometeoros son advectados tangencialmente alejándose de una trayectoria puramente vertical por lo que el momento dipolar formado entre las partículas de hielo más grandes que adquieren carga eléctrica opuesta a las pequeñas, y las pequeñas no apunta en la vertical sino que se encuentra inclinado hacia afuera, este tipo de movimiento disemina la carga total en grandes regiones. En forma semejante, una cortante vertical del viento intensa en la pared del ojo tendería a diseminar las partículas cargadas sobre grandes áreas, minimizando el gradiente de la carga eléctrica y en consecuencia disminuyendo el campo eléctrico.

Como la separación de carga depende fuertemente de la mezcla de hidrometeoros en fase sólida que se encuentra principalmente en las corrientes descendentes; con los que se encuentran en fase líquida, que predomina en las corrientes ascendentes, sugirieron que un proceso eficiente de separación de cargas que conlleve a la producción de relámpagos requiere de distribuciones de carga muy estratificadas que sigan un proceso de separación de carga puramente gravitacional, y esto solamente puede ocurrir en un estado cuasiestacionario local, es decir, los procesos microfísicos de un CT deben ser semejantes a los de una tormenta eléctrica, y de acuerdo con sus estimaciones, el tamaño característico donde la separación de carga ocurre es del orden de un kilómetro en la horizontal. El mecanismo que ocurre en esta pequeña región es el siguiente:

- Las corrientes ascendentes en el interior de la pared del ojo advectan agua sobreenfriada y es convertida en hielo a través de procesos de nucleación primaria.
- La cortante vertical transporta estos cristales de hielo hacia regiones exteriores de la pared del ojo conforme se elevan.
- Conforme se alejan horizontalmente de la pared del ojo, la corriente ascendente disminuye ocasionando que las partículas mayores caigan.
- La región óptima donde ocurrirá la separación de cargas será donde la temperatura sea lo suficientemente cálida (entre  $-5^{\circ}\text{C}$  y  $-15^{\circ}\text{C}$ ) como para permitir la existencia suficiente de agua sobreenfriada para que se forme graupel a través de la acreción del hielo, pero no tanta que desaparezca el hielo, se funda o se convierta totalmente en graupel. De esta forma las colisiones entre el graupel y los cristales de hielo serán frecuentes en esta región y se producirá la separación de cargas.

Es importante que en esta región existan corrientes ascendentes mayores a  $5 \text{ ms}^{-1}$  para que las partículas cargadas puedan volver a ascender.

### **El pronóstico de la intensidad en los CT.**

Uno de los objetivos de monitorear la convección en los CT es conocer si existe una relación directa entre la convección y la intensidad de los vientos en superficie asociados al CT. En este sentido se discute brevemente acerca como ha ido evolucionando el error en el pronóstico de la intensidad con el objeto de compararlo con la evolución en el pronóstico de la trayectoria de un CT.

Los errores en el pronóstico a corto plazo (24 hrs) de la posición de ciclones tropicales han disminuido en promedio 50% en los últimos 20 años, por el contrario el pronóstico de la intensidad no ha mejorado en este periodo de tiempo, mayor aún la incertidumbre asociada a la intensidad en la base de datos del Best-Track, la cual es un reanálisis de la intensidad, presión central, posición y tamaño de los ciclones tropicales generados en las cuenca del Atlántico y del Pacífico nororiental, tampoco ha sido reducida, el cual es semejante a la incertidumbre asociada a los pronósticos a 24 horas (Landsea & Franklin, 2013).

Una de las razones por la cual no ha sido posible reducir la incertidumbre de la intensidad en los pronósticos es la dificultad a la que se enfrentan los pronosticadores para medir o estimar los campos de viento, los cuales son empleados como condiciones iniciales y de frontera en los

modelos numéricos; bajo ciertas circunstancias estas incertidumbres pueden llegar a tener valores relativos de hasta 50% en el peor de los casos (Landsea & Franklin, 2013).

En la cuenca del Atlántico Norte, donde los ciclones tropicales son monitoreados frecuentemente por vuelos de reconocimiento y por radar (cuando se encuentran cerca de la costa de EUA), además de las imágenes de satélites geoestacionarios, la incertidumbre en estos casos puede reducirse hasta el 25% sin considerar las estimaciones del viento hechas por satélites, las cuales son esporádicas. Por el contrario, en la Cuenca del Pacífico Nororiental, los ciclones solamente son monitoreados a través de satélite, lo cual ocasiona que la incertidumbre en el viento alcance sus valores máximos (~50%).

Dado que las condiciones iniciales, en particular el campo de viento, pueden presentar incertidumbres de hasta el 50% no resulta sorprendente que la incertidumbre del pronóstico de la intensidad no haya disminuido en los últimos años. Para reducir la incertidumbre en estos pronósticos, Landsea (2013) comenta que se debe poner énfasis en el estudio de los cambios rápidos de la intensidad respecto al tiempo, pero mientras no se hagan mejoras sustanciosas en nuestra capacidad de observar la intensidad de los ciclones tropicales, no se podrá reducir la incertidumbre en el pronóstico de esta variable.

Para reducir esta incertidumbre se han explorado los diversos mecanismos que inducen cambios en la intensidad, como los son el reemplazo de la pared del ojo, la interacción de ciclones tropicales con vórtices oceánicos, así como métodos indirectos para estimar la convección como la electrificación dentro de estos.

## CAPÍTULO 3

### REPRODUCCIÓN DE RESULTADOS PREVIOS.

Se han reproducido algunos resultados elaborados por Abarca, 2011 con el objetivo de determinar la validez de los códigos empleados en este trabajo y comparar las variaciones inducidas debido al empleo de diferentes bases de datos. De esta forma si los resultados son reproducibles se puede asegurar que los códigos empleados en esta tesis reproducen resultados previamente conocidos.

Las principales diferencias entre el enfoque de Abarca, 2011, en adelante y el enfoque de esta tesis se resumen en la Tabla 3-1. El principal resultado a reproducir es la distribución espacial de relámpagos respecto a la cortante (figuras 6 d-f, Abarca, 2011), misma que se define como la superposición de las rotaciones de cada distribución espacial de relámpagos por el azimut de la cortante de viento en cada intervalo de tiempo.

Diferencias entre el trabajo de Abarca, 2011 y esta tesis (Lugo, 2014)		
	Abarca, 2011	Lugo, 2014
Posición de relámpagos	Posiciones individuales	Malla regular
Cortante del viento	ECMWF	NARR
Posición de centro del CT	Best-Track	HURSAT

**Tabla 3-1. Principales diferencias entre el enfoque de Abarca y el de esta tesis.**

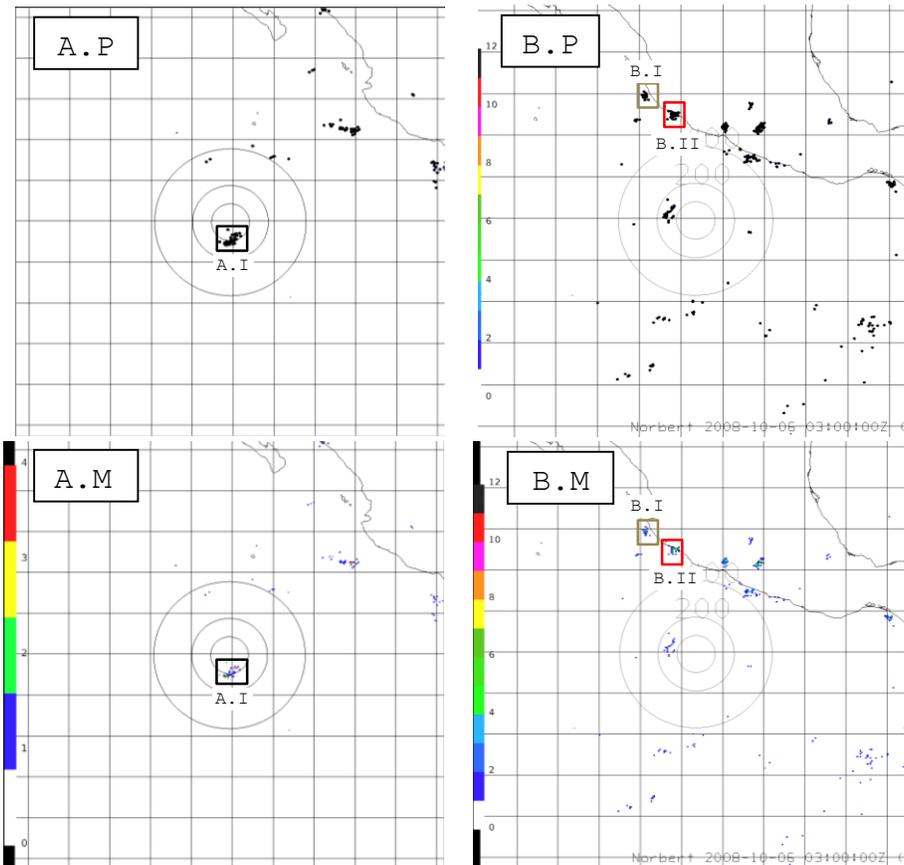
Antes de reproducir esta distribución espacial se van a verificar los siguientes resultados parciales intermedios, mismos que servirán para elaborar la distribución espacial de relámpagos respecto a la cortante:

- 1) Elaboración de la malla regular con la cantidad de relámpagos en cada punto de malla elaborada a partir de datos individuales de la posición de relámpagos.
- 2) Estimación del error medio del azimut del vector de movimiento considerando que el azimut de este vector verdadero es el de Abarca 2011, empleando los CTs que él trabajó.
- 3) Análisis de los vectores de movimiento y de la cortante en el caso de Bonnie, 2004.

Posteriormente se muestran las distribuciones de relámpagos elaboradas por Abarca y las elaboradas en esa tesis.

### Conversión de datos puntuales de la WLLN a una malla regular.

Los objetivos de agrupar las posiciones individuales de los relámpagos en una malla regular, tanto en espacio como en tiempo, sobre una superficie esférica es facilitar el cálculo de la densidad de relámpagos y comparar la cantidad de relámpagos con diferentes variables que se encuentren sobre una malla regular.



**Figura 3-1. Posición de los relámpagos que se produjeron durante un periodo de tres horas en dos regiones centradas en la posición de dos CTs diferentes, intervalo A centrado en Bud el 2006/07/11 a las 1500 UTC, mientras que el intervalo B está centrado en Norbert el 2008/10/06 a las 0300 UTC. Los rectángulos con bordes de colores muestran las regiones la Figura 2. A.P) y B.P) muestran las posiciones originales de la WLLN. A.M) y B.M) Muestran los datos dispuestos en una malla rectangular uniforme.**

Considerando que la cantidad de relámpagos se va a comparar con los datos HURSAT, la malla tendrá la misma resolución tanto espacial como temporal de las imágenes HURSAT. Los relámpagos asociados a cada intervalo de la malla serán los producidos una hora y media y una hora y media después de la imagen HURSAT.

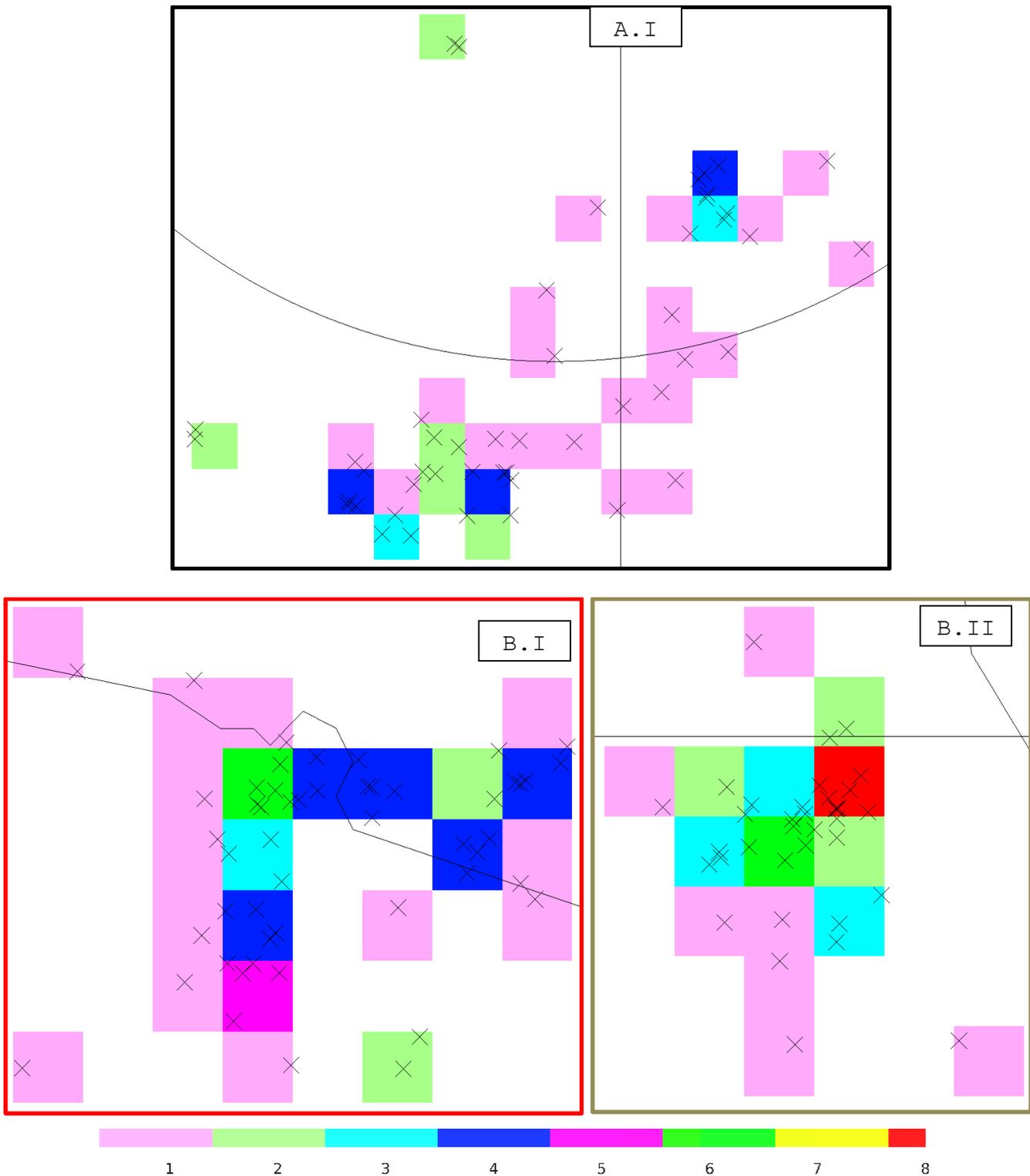


Figura 3-2. Acercamiento y superposición de los datos originales sobre la malla regular de las tres subregiones mostradas en los recuadros de la Figura 3-1 (A.P superpuesta sobre A.M y B.P superpuesta sobre B.M). Se observa que la cantidad de puntos coincide con la escala de colores de los puntos de malla.

La WWLLN proporciona la posición y el tiempo en que se produce cada relámpago por lo que cada relámpago debe ser asociado a un punto de la malla. Es fácil visualizar estos datos, puesto que se encuentran en archivos de texto ordenados cronológicamente, donde cada línea del archivo muestra datos de un solo relámpago. Cada línea presenta la siguiente estructura:

aaaa/mm/dd, HH:MM:SS, lat, lon, num1, num2

Donde: aaaa/mm/dd es la fecha en la que ocurrió el relámpago.

HH:MM:SS es la hora UTC en la que ocurrió el relámpago.

lat es la latitud en grados decimales en donde ocurrió el relámpago.

lon es longitud en grados este decimales en donde ocurrió el relámpago.

num1 es un número de verificación.

num2 es la cantidad de estaciones que detectaron a este relámpago

Para evaluar la correcta creación de la malla regular de datos, se superpondrán los datos originales sobre la malla regular y se observará que el valor asociado a cada punto de malla posea la misma cantidad de relámpagos que puntos que indique los relámpagos de la WWLLN.

La Figura 3-1 muestra dos intervalos de tiempo donde se muestran en forma separada las posiciones individuales de los relámpagos (A.P y B.P) y la malla con la cantidad de relámpagos (A.M y B.M), en estas figuras se muestra que tanto la malla como las posiciones individuales de los relámpagos en cada intervalo de tiempo (intervalo A e intervalo B) son iguales.

La Figura 3-2 muestra en detalle la superposición de las posiciones individuales de los relámpagos sobre la malla regular en tres subregiones de los intervalos A (A.I) y B (B.I y B.II), en cada subregión se observa que el valor asociado a cada punto de malla representado por el color de cada pixel coincide con la cantidad de relámpagos dentro de este pixel. Por lo que se considera que la malla representa fielmente la cantidad de relámpagos en cada punto de la malla.

### **Cálculo del azimut.**

El azimut tanto de la cortante de viento como de la trayectoria de los CTs se calculó empleando la ecuación (A.2.6) y la Tabla A-1.

Para cada CT de la tabla 3-2 se ha calculado el valor absoluto del promedio de la diferencia entre el azimut calculado por Abarca, 2011 y el azimut estimado por la ecuación (A.2.6) ( $\overline{\Delta\alpha_z}$  de dicha tabla), para todos los intervalos de tiempo donde existan valores del azimut. Recordando que la resolución temporal del Best-Track es de 6 horas y de 3 horas para el HURSAT. El valor de  $\overline{\Delta\alpha_z}$  es menor a  $4.0^\circ$  en el 95% de los casos por lo que se puede considerar que esta forma de calcular el azimut es válida para la base de datos HURSAT y será empleada para calcular el azimut de cualquier vector sobre la superficie de una esfera.

Año	CT	Intervalos de estudio				$\overline{\Delta\alpha_z}$ (°)
		Inicio		Fin		
		Hora (UTC)	Fecha	Hora (UTC)	Fecha	
2004	Bonnie	1200	11 ags	1800	13 ags	0.6
	Charley	1200	13 ags	1800	14 ags	0.1
	Frances	0000	04 sep	1800	08 sep	1.0
	Gaston	1200	27 ags	0000	01 sep	1.0
	Hermine	1200	30 ags	0600	31 ags	0.3
	Ivan	1200	15 sep	0600	24 sep	0.0
	Jeanne	1200	25 sep	1800	28 sep	1.1
	Matthew	1200	08 oct	1800	10 oct	0.7
2005	Arlene	0000	11 jun	0600	13 jun	1.2
	Cindy	1200	05 jul	0600	07 jul	1.4
	Dennis	0000	09 jul	0600	13 jul	0.5
	Emily	1200	19 jul	1200	21 jul	0.6
	Katrina	0000	25 ags	1800	30 ags	0.2
	Ophelia	0600	06 sep	1800	17 sep	5.2
	Rita	0000	23 sep	0000	26 sep	1.4
	Tammy	0600	05 oct	1800	06 oct	3.7
2006	Wilma	0000	24 oct	0000	25 oct	1.4
	Alberto	0600	12 jun	0600	14 jun	0.1
	Beryl	1200	18 jul	1200	21 jul	2.9
2007	Ernesto	1200	24 ags	1200	01 sep	0.5
	Barry	0600	02 jun	1800	02 jun	0.7
	Erin	1200	15 ags	0600	17 ags	0.1
	Gabrielle	0000	09 sep	0000	11 sep	0.2
	Humberto	1200	12 sep	0000	14 sep	0.3

Tabla 3-2. Población muestra de CTs empleada por Abarca et al, 2011 con la que se comparará el azimut de la trayectoria y la cortante durante los intervalos de tiempo que se indican en la tabla,  $\overline{\Delta\alpha_z}$  representa el error promedio del azimut calculado con la ecuación de arriba y la fuente confiable.

### Valor medio de la cortante del viento en las inmediaciones de un CT.

La cortante al ser un vector también puede expresarse en términos de su azimut y su magnitud (intensidad de la cortante). El campo de viento en diferentes niveles de presión (en particular a 850 hPa y a 200 hPa) es una variable estimada por el NARR en cada punto de malla cada tres horas. De esta forma, de acuerdo con la ecuación (A.4.4), es posible definir el valor medio de la cortante (diferencia entre el viento a 850 hPa y el viento a 200 hPa) sobre alguna región interna del NARR, en particular se puede definir sobre una región como la descrita por (A.4.5) con un radio de 500,000 m, este casquete puede centrarse en la posición de un CT en un tiempo dado, siguiendo la metodología de Molinari, J., y D. Vollaro, (1989) y empleada por Abarca 2011 para evaluar el valor medio de la cortante sobre un CT.

El dominio del NARR cubre principalmente Norteamérica (Figura 3-3, región negra), en general la posición de un CT no necesariamente se encuentra dentro de este dominio, ni todo el interior de la región donde se evalúa el valor medio de la cortante, por lo que es necesario encontrar la subregión donde es posible definir el valor medio de la cortante (Figura 3-3,

región gris), en esta subregión se puede definir el valor medio de la cortante asociado a un CT en un intervalo.

El objeto de emplear el NARR es que tiene mayor resolución, tanto espacial ( $\sim 32 \times 32$  km) como temporal (3 hrs), comparada con la del reanálisis ECMWF ( $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  cada 6 hrs) empleado por Abarca, 2011, lo cual permite tener una mayor cantidad de datos de la cortante en cada CT y tiene la misma resolución espacial que los datos de HURSAT.

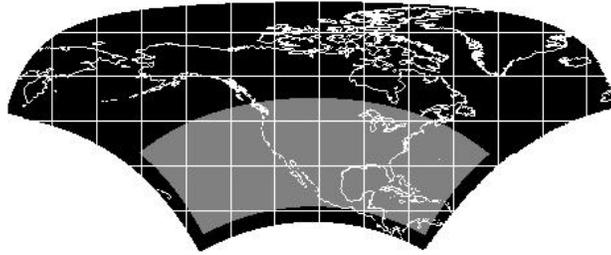


Figura 3-3. Dominio del Narr (en negro) y subdominio de estudio (en gris).

### **Análisis del vector de movimiento y de la cortante para el caso de Bonnie, 2004.**

Se ha comparado (azimut y magnitud) tanto el vector de movimiento como la cortante en cada intervalo de tiempo en la vida del CT Bonnie de la temporada 2004, entre los valores calculados por Abarca, 2011 y los valores calculados con las ecuaciones del azimut (A.2.6) y de la magnitud (A.3.4).

Además, se comparó el error del azimut del vector de movimiento de ambos cálculos (Abarca, 2011 y esta tesis) con un tercer valor calculado con el software IDV, el cual provee una forma de calcular el azimut entre dos puntos de una trayectoria a través de una interfaz gráfica, pero no resulta fácil de automatizar ni es fácil estimar el valor medio de la cortante, por lo que no resulta adecuado para estimar muchos valores del azimut.

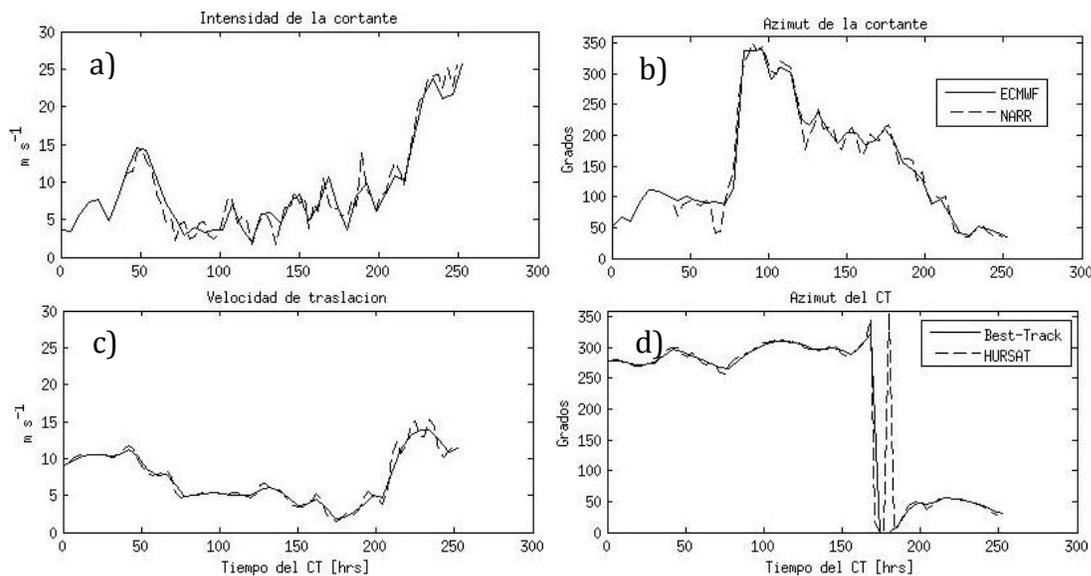
#### **Resultados.**

Si se considera que el azimut del vector de movimiento calculado con IDV es el valor real, el valor absoluto del promedio de la diferencia entre el azimut calculado por Abarca y el de IDV es de  $4.2^\circ$ , valor que se encuentra dentro del rango mostrado en la Tabla 3-2. Si se hace lo mismo pero con las ecuación (A.2.6) el valor absoluto del promedio de la diferencia resulta ser  $2.4^\circ$ , lo cual muestra que cualquiera de los tres cálculos resulta adecuado para calcular el azimut del vector de movimiento, dentro de los límites de la Tabla 3-2.

La variación entre los cálculos del azimut elaborados por Abarca y los elaborados con las ecuaciones antes mencionadas, a lo largo de toda la vida de Bonnie resulta ser casi nula (Figura 3-4 c y d), mostrándose una pequeña oscilación que aparece en los datos del HURSAT (línea punteada) alrededor de los valores obtenidos por Abarca, 2011 (línea sólida) en las etapas de finales cuando este incrementó su velocidad, también se puede observar una aparente variación mayor a  $300^\circ$  en el azimut de este vector, pero resulta ser una variación pequeña, puesto que el valor de Abarca, 2011 es de  $0^\circ$  mientras que el valor calculado con las

ecuaciones es de  $357^\circ \cong -3^\circ$ , por lo que la diferencia resulta ser menor de lo que aparenta la figura.

Sin embargo, la cortante (Figura 3-4 a y b) calculada con datos del NARR (línea punteada) fluctúa alrededor de la cortante del reanálisis ECMWF (línea sólida) más que el vector de movimiento, siendo este fenómeno más notorio en el azimut (Figura 3-4 a) donde las diferencias alcanzan valores aproximados de hasta  $40^\circ$ , lo cual puede ser debido a la diferencia en las bases de datos y al método seguido por Abarca, 2011 con el método aquí empleado, mismos que matemáticamente son equivalentes en el límite, pero arrojan diferentes resultados originadas por las aproximaciones numéricas.



**Figura 3-4. Comparación entre cada componente de la cortante empleando datos del NARR (línea punteada) y datos del ECMWF (línea sólida), así como cada componente del vector de movimiento (C y D) calculados a partir del HURSAT (línea punteada) y del Best-Track (línea sólida), durante la vida del CT Bonnie.**

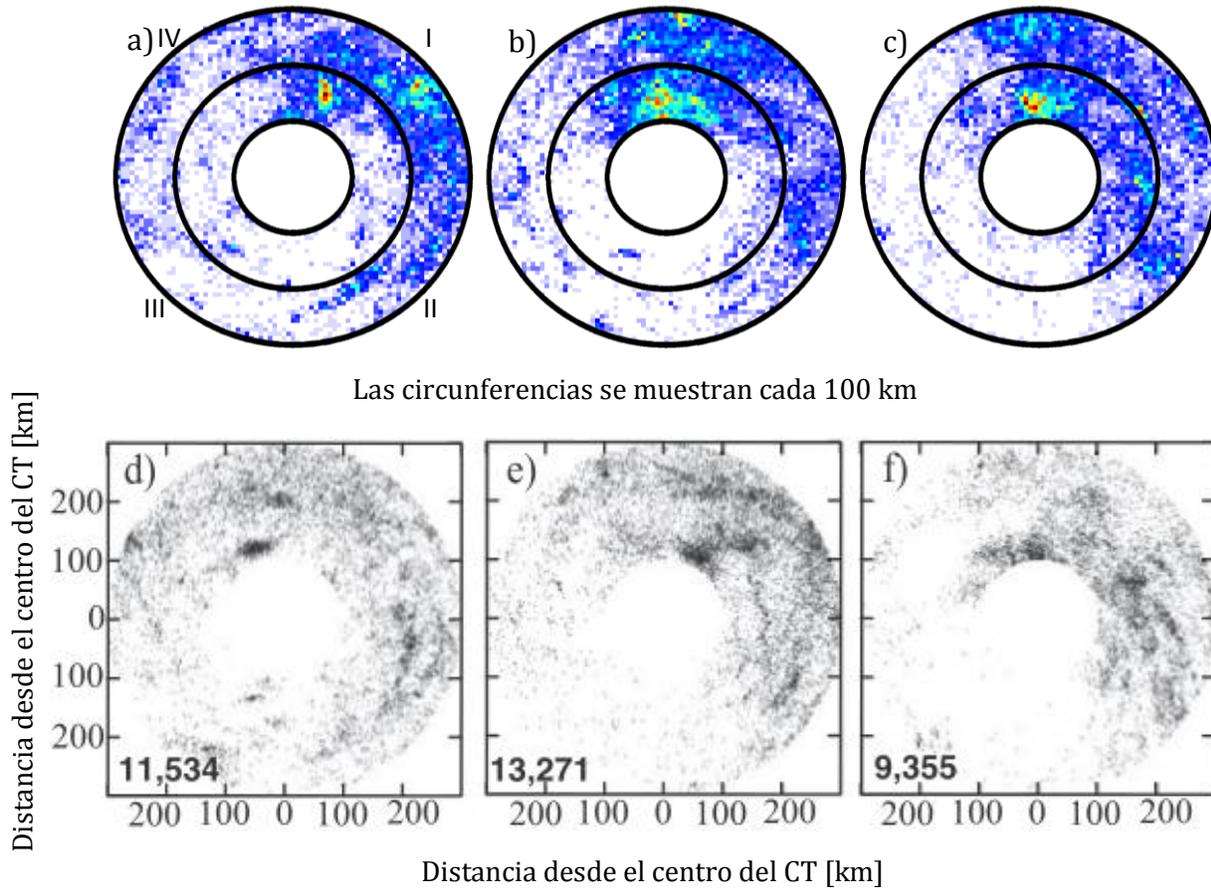
Finalmente se puede concluir que la forma de estimar cada componente del vector de movimiento y de la cortante resultan ser equivalentes a los resultados obtenidos por Abarca, 2011. Resultando que el valor de cada componente calculada con las ecuaciones de este trabajo oscila alrededor de los valores obtenidos por Abarca, 2011; esto es un resultado natural considerando que el NARR es independiente del reanálisis ECMWF, así como sus respectivas resoluciones tanto espaciales como temporales.

### **Comparación entre las distribuciones espaciales de los relámpagos con respecto a la cortante.**

Con la certeza de que la transformación de las posiciones individuales de relámpagos en una malla regular, la estimación del vector de movimiento y de la cortante sobre un CT son adecuadas, se ha evaluado la correcta implementación de la ecuación de una rotación sobre una superficie esférica, descrita por la ecuación (A.5.4).

Para evaluar la correcta implementación del código de rotación se ha calculado la distribución espacial de los relámpagos con respecto a la cortante en la región que va de los 100 a los 300

km de distancia del centro del conjunto de CTs mostrados en la Tabla 3-2 durante los intervalos de tiempo especificados en dicha tabla.



**Figura 3-5. a) a f) Posiciones de las descargas respecto a la cortante, misma que apunta hacia arriba, en las bandas exteriores, para intensidad (izquierda) débil ( $< 5 \text{ m s}^{-1}$ ), (centro) moderada ( $5 - 10 \text{ m s}^{-1}$ ) e (derecha) intensa ( $> 10 \text{ m s}^{-1}$ ) para los intervalos de tiempo de Tabla 3-2. Población muestra de CTs empleada por Abarca et al, 2011 con la que se comparará el azimut de la trayectoria y la cortante durante los intervalos de tiempo que se indican en la tabla,  $\Delta\alpha_z$  representa el error promedio del azimut calculado con la ecuación de arriba y la fuente confiable.**

Con el objeto de reproducir los resultados obtenidos por Abarca, 2011 y comparar las diferentes distribuciones espaciales se han hecho tres distribuciones espaciales de los relámpagos considerando la intensidad de la cortante (débil, media e intensa). En cada caso se han observado patrones espaciales semejantes entre las rotaciones elaboradas en este trabajo y las elaboradas por Abarca, 2011, mismas que se describen a continuación (Figura 3-5).

Cuando la intensidad de la cortante es débil ( $< 5 \text{ m s}^{-1}$ ) se observa que la mayoría de los relámpagos se presentan en los cuadrantes I y IV, con una preferencia por el cuadrante I (downshear right). En el cuadrante IV (downshear left), los relámpagos muestran una distribución uniforme. Finalmente se puede observar una banda que se encuentra en el cuadrante II (Figura 3-5 a) y en menor medida en la figura (Figura 3-5 d).

En el caso de que la cortante tenga una intensidad media ( $5 - 10 \text{ m s}^{-1}$ ), ocurre que la mayoría de los relámpagos se producen en el cuadrante I, también se observan relámpagos agrupados en una banda entre los 200 y 300 km en el cuadrante IV, (Figura 3-5 b), si bien estas bandas no se observan tan claramente en la (Figura 3-5 e se puede apreciar que hay más relámpagos en este cuadrante entre los 200 y 300 km en comparación con los que hay entre los 100 y 200 km. Tanto en la figura 3-5 b como en la figura 3-5 e se observa una fuerte disminución en la cantidad de relámpagos que va de la frontera entre el cuadrante I y IV hacia el interior del cuadrante IV.

Cuando es muy intensa la cortante ( $> 10 \text{ m s}^{-1}$ ) los relámpagos se encuentran concentrados alrededor de este vector siendo que los relámpagos producidos en la banda formada en el cuarto cuadrante se encuentran ahora dispersos a lo largo del cuadrante sin llegar a formar la banda característica de los casos anteriores. Es importante destacar que estos valores de la intensidad de la cortante el tercer cuadrante se encuentra prácticamente vacío, así como el segundo cuadrante exceptuando la región cercana al vector de la cortante (Figura 3-5 c y f).

Cabe destacar que al reproducir los resultados obtenidos por Abarca, 2011 empleando otra base de datos para estimar cortante NARR y ECMWF, así como emplear otras aproximaciones numéricas para estimar estas distribuciones, resulta que las figuras elaboradas por Abarca, (2011) no resulten idénticas a las elaboradas en este trabajo, como ejemplo de esta situación, se ha discutido el caso de Bonnie. Con esta consideración en mente es deseable que las características más evidentes se observen tanto en las figuras producidas por Abarca (2011) como las de este trabajo, mismas que se han discutido en los párrafos anteriores, haciendo esta consideración resulta aceptable suponer que el algoritmo de una rotación sobre la esfera se encuentra bien implementado.

## CAPÍTULO 4

### EL AMBIENTE CIRCUNDANTE EN LOS CICLONES TROPICALES.

El Pacífico Nororiental (PNO), mismo que abarca desde la costa noroccidental del continente americano hasta el meridiano 140° O (Figura 4-1) puede ser considerado como la unión de un conjunto de regiones disjuntas con ambientes muy característicos, en donde cada una de ellas predomina una variable atmosférica o termodinámica que rige el ambiente en esa región, como se ha discutido en las hipótesis generales de este trabajo.



**Figura 4-1. Pacífico Nororiental (en gris).**

De esta forma se ha considerado que en general, los CT en su fase madura se encuentran en una y solo una de estas regiones, por lo que se puede considerar que solamente la variable que predomina en esa región será la que mayor influencia tenga sobre la convección en el CT que se encuentren en esa región, aunque esto no signifique que otras variables no desaparezcan totalmente.

Se clasificaron subjetivamente las trayectorias de todos los CTs con nombre ocurridos durante las temporadas del 2006 al 2009 (62 casos) a partir de la forma de su trayectoria, la SST promedio en sus inmediaciones y la cercanía a tierra, principalmente.

En la Figura 4-2 se muestra la SST promedio durante el tiempo en el que ocurrieron los CTs de la muestra, separada por mes, así como las trayectorias de los CTs de la muestra, también separados por mes. De esta figura se puede apreciar cualitativamente lo siguiente:

- 1) Existe un primer conjunto de CTs los cuales se encuentran la mayor parte del tiempo en aguas donde las SST supera los 26°C y con un movimiento predominantemente hacia el oeste, estos ocurren a lo largo de toda la temporada;
- 2) un segundo conjunto de CTs con una trayectoria que cruza “ rápidamente muchas” isothermas, con un movimiento predominantemente hacia el noroeste, los cuales ocurren en julio y agosto;

- 3) un tercer conjunto de CTs que se mantiene en aguas muy cálidas, por encima de los 28°C y que gran parte de su vida se encuentran cerca de tierra, mismos que ocurren principalmente en los meses de agosto y septiembre;
- 4) un cuarto conjunto de CTs, los cuales tienen un cambio radical de dirección, al principio de su vida, se dirigen hacia el noroeste y luego cambian de dirección hacia el noreste (recurvan), los cuales suceden en septiembre y octubre;
- 5) y un quinto conjunto de CTs con trayectorias complejas, que ocurren a lo largo de toda la temporada.

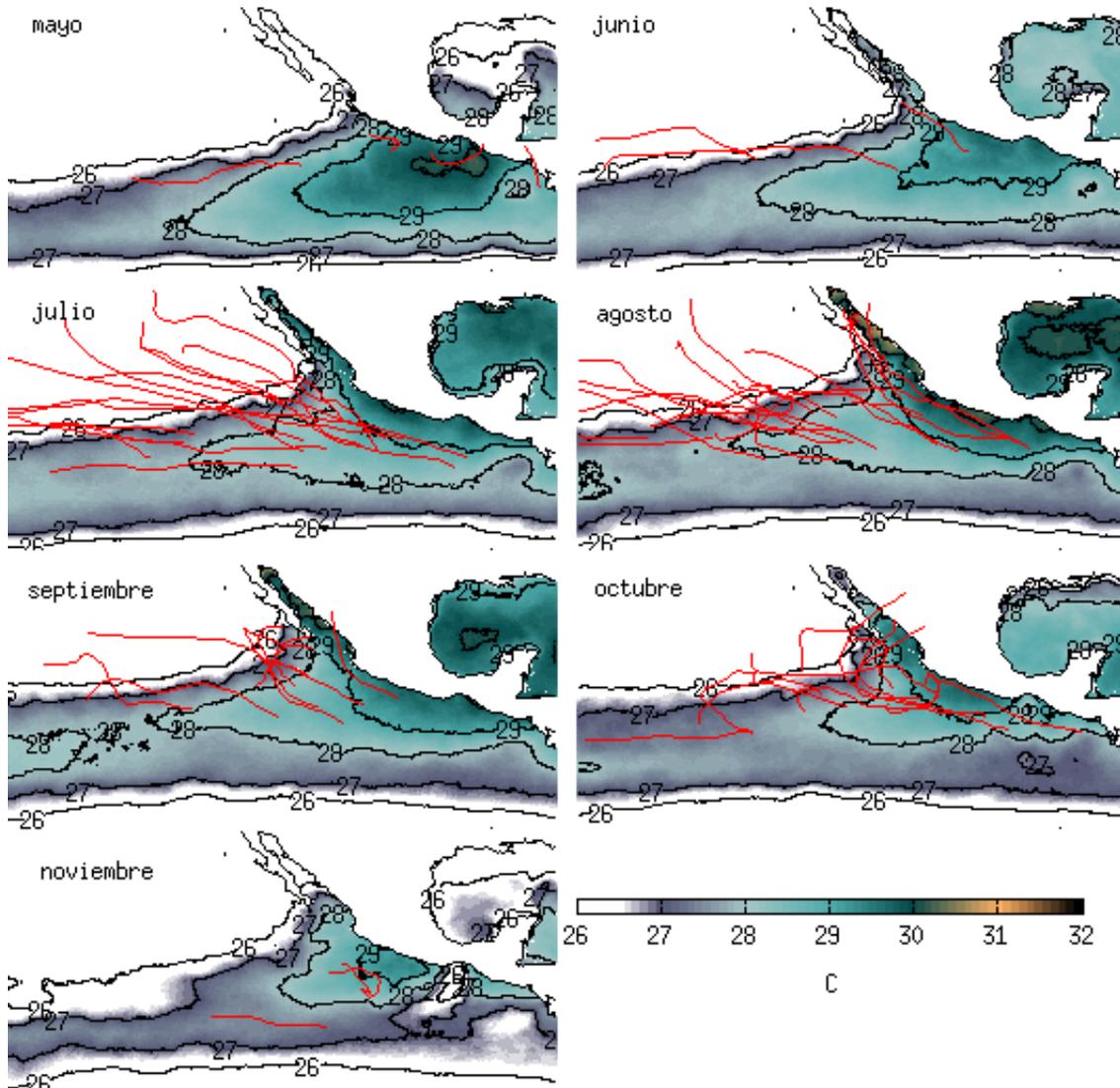


Figura 4-2. Valor promedio de la SST durante los meses de mayo a noviembre para los años 2006 al 2009, y trayectorias de los CT originados en cada mes de estos años. Se muestra únicamente la región del PNO tropical, algunos CT alcanzaron meridianos tan occidentales como 160°.

Del quinto conjunto se puede hacer una observación adicional, se pueden distinguir tres CT con una trayectoria general de oeste a este, análogos a los CTs con una trayectoria de este a oeste, mismos que comparten la región con SST mayores a 27°C.

Siguiendo estas observaciones cualitativas, a cada conjunto o clúster de CTs, se le realizarán diversas pruebas, que serán discutidas en la siguiente sección para verificar que cada CT de un clúster esté correctamente clasificado en el clúster adecuado de acuerdo a los criterios mencionados en los párrafos anteriores. En la Tabla 4-1 se muestran los nombres de los CTs que componen a cada clúster, así como sus respectivos nombres, y la Figura 4-2 muestra las trayectorias de los CTs de cada clúster.

Trayectoria	Clústeres							
	2006		2007		2008		2009	
Este-oeste (EO)	Bud Daniel Fabio Kristy	Carlotta	Alvin Erick Flossie Gil	Cosme	Boris Elida Hector Marie	Cristina Genevieve Iselle Polo	Carlos Hilda Marty	Felicia Linda Nora
Noroeste (NO)	Emilia Hector Rosa	Gilma	Dalila		Douglas Fausto Karina		Blanca Enrique Guillermo	Dolores Ignacio
Paralelos a la costa (PC)	Aletta Lane	John	Henriette		Julio Odile		Andres Jimena	Patricia
Recurvan (RE)	Paul		Ivo Juliette		Lowell Norbert		Rick	
Oeste-este (OE)	Norman Olivia		Barbara					
Complejas (CO)	Miriam Sergio		Kiko		Aletta		Kevin	Olaf

**Tabla 4-1.** Lista de CTs que conforman cada clúster (EO, NO, PC, RE, OE y CO) de acuerdo con la forma de su trayectoria, su cercanía a la costa y la SST que predomina en su ambiente.

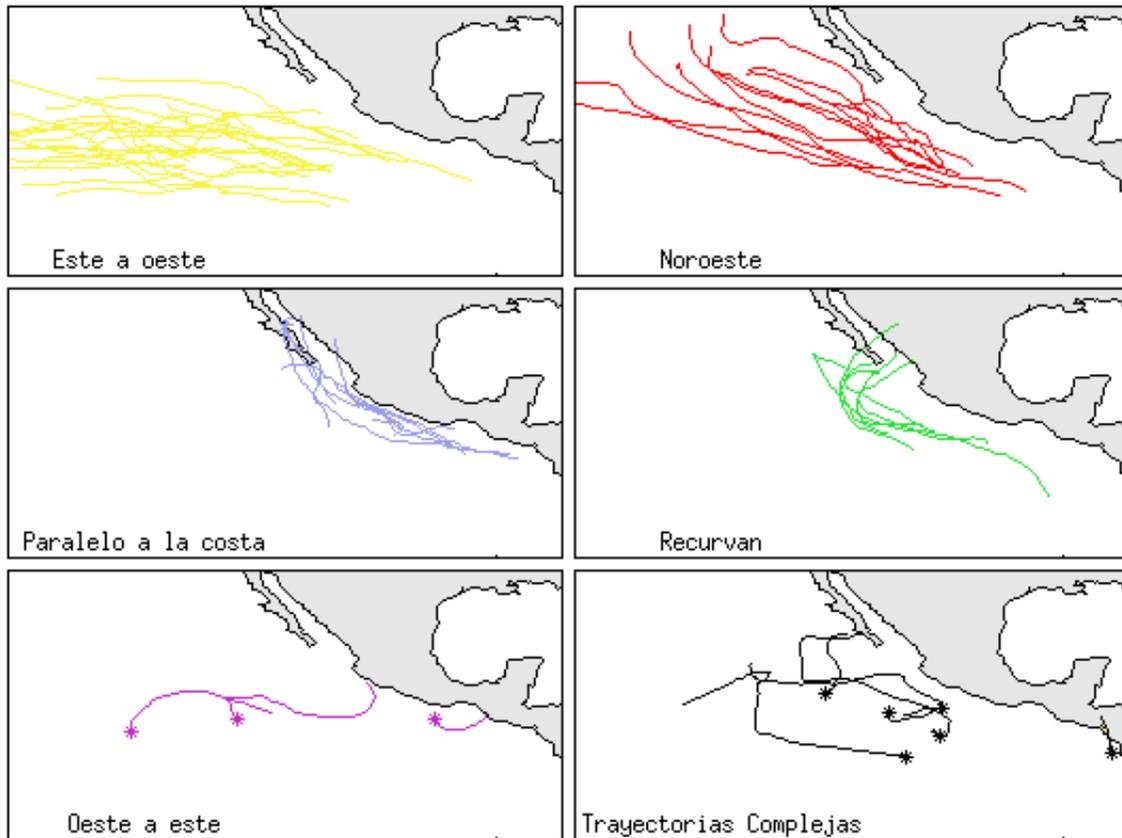
### Verificación de las propiedades de cada clúster.

Las pruebas de verificación para garantizar que cada CT se encuentre en el clúster que le corresponde de acuerdo a los criterios establecidos anteriormente son las siguientes:

1. Inspección visual de las trayectorias en cada clúster y verificación de los azimuts típicos en cada clúster.
2. Analizar la variación temporal de la SST en las inmediaciones de cada CT de cada clúster para determinar la razón de enfriamiento en cada CT.
3. Determinar la distancia entre la línea de costa y el centro de cada CT para determinar la influencia continental sobre la convección en los CTs de cada Clúster.

La inspección visual de las trayectorias de cada clúster (Figura 4-3) muestra que las trayectorias se pueden clasificar en una primera aproximación de acuerdo a su forma y definir seis clústeres los cuales son independientes de los valores de la SST en cada clúster, posteriormente se mostrará que la SST puede relacionarse con estos clústeres.

Una forma cuantitativa para determinar la dirección típica de los CTs de cada clúster es estimar el azimut de la dirección de los CTs en cada intervalo de tiempo (ecuación (A.2.6) y la Tabla A-1) y elaborar un histograma por clúster de esta variable en intervalos de diez grados.



**Figura 4-3. Clasificación de trayectorias de CTs de acuerdo a la forma de su trayectoria, cercanía a tierra y SST en sus inmediaciones. En el caso de los CTs con trayectorias complejas y con trayectoria de oeste a oeste se muestra el origen de cada CT (\*).**

#### **Azimut de los CTs de cada clúster**

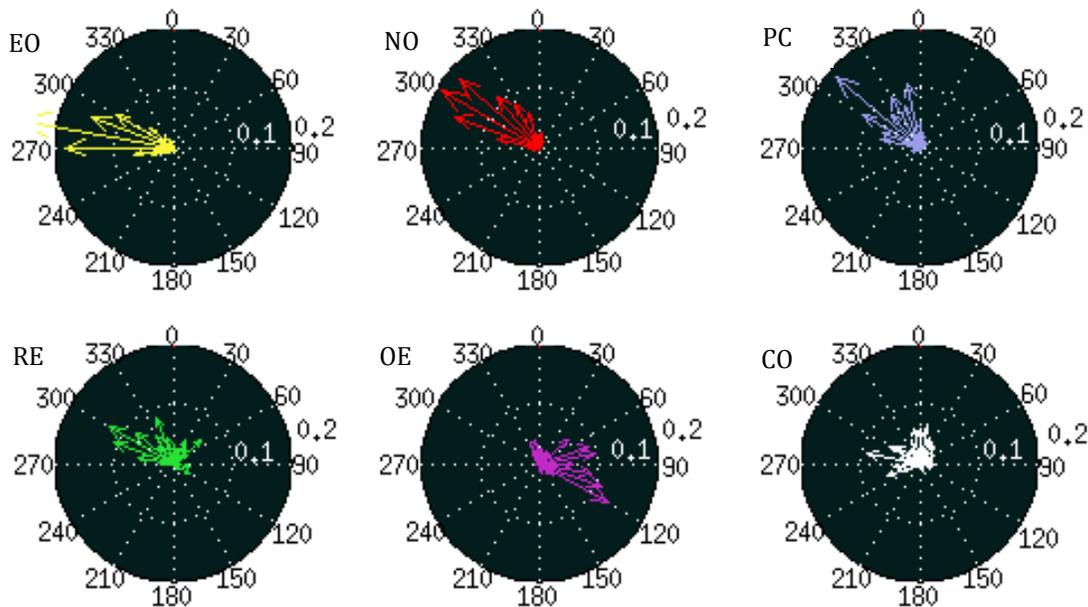
Los azimuts se han clasificado en 36 clases en intervalos de  $10^\circ$ , donde el valor central de cada clase es un múltiplo de  $10^\circ$  (incluyendo el cero) para realizar los histogramas polares de la frecuencia de esta variable. El histograma de cada clúster muestra lo siguiente (Figura 4-4):

- Clúster EO: el 60% de los azimuts se encuentran en  $280^\circ \pm 15^\circ$ , siendo el azimut más frecuente  $280^\circ$  (27% de los casos).
- Clúster NO: el 63% de los azimuts se encuentran en  $305^\circ \pm 20^\circ$ , este clúster muestra dos azimuts igual de frecuentes,  $300^\circ$  (19% de los casos) y  $310^\circ$  (18% de los casos), por lo que el azimut típico se puede considerar  $305^\circ$ .
- Clúster PC: el azimut más frecuente es  $310^\circ$  (19% de los casos), este clúster muestra una variación más amplia y va desde los  $275^\circ$  a  $355^\circ$  (80% de los casos), por lo que definir un azimut típico es complicado.
- Clúster RE: este clúster muestra una variación en los azimuts que va de los  $285^\circ$  a los  $55^\circ$  (69% de los casos), definir un azimut típico para este clúster no es posible, puesto

que la trayectoria de estos CTs está compuesta de dos movimientos, el primero con un azimut "típico" de  $300^{\circ} \pm 15^{\circ}$  (31% de los casos) y otro con un azimut variable que va de los  $355^{\circ}$  a los  $65^{\circ}$  (29% de los casos).

- Clúster OE: este clúster muestra que solamente el 15% de los azimuts se encuentran entre los  $270^{\circ}$  y  $355^{\circ}$ , pero tienen una componente zonal hacia el oeste, por lo que estos CTs generalmente tienen un azimut con una componente zonal hacia el este.
- Clúster CO: estos CTs tienen azimuts distribuidos uniformemente desde  $245^{\circ}$  a los  $95^{\circ}$  (90% de los casos), por lo que no es posible definir un azimut típico.

De esta forma se puede considerar que los clústeres EO y NO tienen azimuts típicos, mientras que los otros clústeres tienen una variación azimutal dentro de un rango bien definido, excepto el clúster CO.



**Figura 4-4. Histogramas polares normalizados azimutales de cada clúster separados en clases de  $10^{\circ}$ . Se muestran los radios del 10% (0.1) y 20% (0.2).**

Estas diferencias pueden ayudar a visualizar la posible influencia de la dirección del CT sobre la actividad convectiva, así como su relación con la cortante de viento, lo cual ha sido documentado por Abarca et al (2011)

#### **Cercanía a tierra de los CTs de cada clúster.**

La convección en cada CTs puede ser influenciada por los efectos continentales (aerosoles y orografía principalmente), por lo que resulta útil conocer la distancia desde el centro del CT hasta la costa. Una forma de estimar la distancia a la costa y que a la vez permita apreciar la región del CT que se encuentra sobre tierra es considerar el área del CT que se encuentra tierra adentro. Para realizar esto se harán las siguientes suposiciones:

1. Un disco de 400 km de radio aproxima la forma del CT;

2. Solamente los procesos (en este trabajo se discutirá la convección) que ocurren en el núcleo interno del CT (un disco de 100 km de radio) influyen en los procesos de intensificación del CT (DeMaria, DeMaria, Knaff, & Molenaar, 2011);
3. La influencia del continente sobre la convección en el núcleo interno solamente ocurre cuando el CT se encuentra lo suficientemente cerca del continente (consideraremos suficientemente cerca de la costa cuando el CT se encuentra a 400 km o menos de esta).

Con estas tres suposiciones se puede estimar la influencia continental sobre la convección en el núcleo interno de los CTs de cada clúster y se puede realizar un diagrama de dispersión que muestre el área relativa del CT que se encuentra sobre el continente, o bien sobre el océano para cada instante de tiempo.

La Figura 4-5 muestra las series de tiempo del porcentaje del área que se encuentra sobre el océano de cada CTs de cada clúster, el eje horizontal muestra el tiempo normalizado de vida de cada CT (mismo que va de  $t_0 = 0$  cuando el CT adquiere nombre a  $t_f = 1$  cuando el CT se disipa completamente); el eje vertical muestra la proporción del área del CT que se encuentra sobre el océano, donde 100% significa que todo el CT se encuentra a más de 400 km del continente y 0 cuando todo el CT se encuentra dentro del continente, así un valor de 50% significa que la mitad del CT se encuentra dentro del continente y dependiendo de la forma de la costa esto puede representar que el CT ha tocado tierra, un caso evidente donde el CT ha tocado tierra pero más 50% de su superficie se encuentra en el océano es cuando este ha tocado tierra en la península de Baja California. El área ocupada por el CT sobre el continente ha sido estimada empleando la máscara de tierra del producto MW + IR OI SST como el indicador de la superficie continental.

De esta forma, la Figura 4-5 muestra que el núcleo interno de los CTs de los clústeres EO, NO y OE generalmente se encuentran a más de 400 km de tierra. En el caso del clúster NO los CTs con valores menores a 100 fue debido a que su trayectoria pasó a menos de 400 km de la península de Baja California, en el caso del clúster EO esta misma situación ocurre en sus etapas tempranas, cuando los CTs se originan cerca del continente, mientras que en el caso de sus etapas posteriores esto es debido a su paso cerca del archipiélago hawaiano.

Los CTs del clúster PC siempre se encuentran a menos de 400 km del continente o sobre el continente, lo mismo ocurre con el clúster RE; es interesante observar en este clúster la rapidez con la que algunos CTs se acercan a tierra logrando que estos introduzcan hasta el 80% de su superficie sobre el continente.

El clúster OE, formado por tres CTs muestra que estos CTs se mantuvieron a más de 400 km de tierra, excepto en el caso de Barbara, 2007, el cual tocó tierra en la costa sur de Chiapas. Los CTs del clúster CO muestran una gran variación con respecto a la cercanía a tierra, resaltando el CT Alma, 2008, el cual fue el único que tocó tierra.

Estas diferencias pueden ayudar a mostrar la influencia continental sobre la convección y la actividad eléctrica en los CTs y así poder distinguir ambientes *oceánicos* de ambientes

continentales; esta variación en la actividad eléctrica ha sido documentada por Williams (2002).

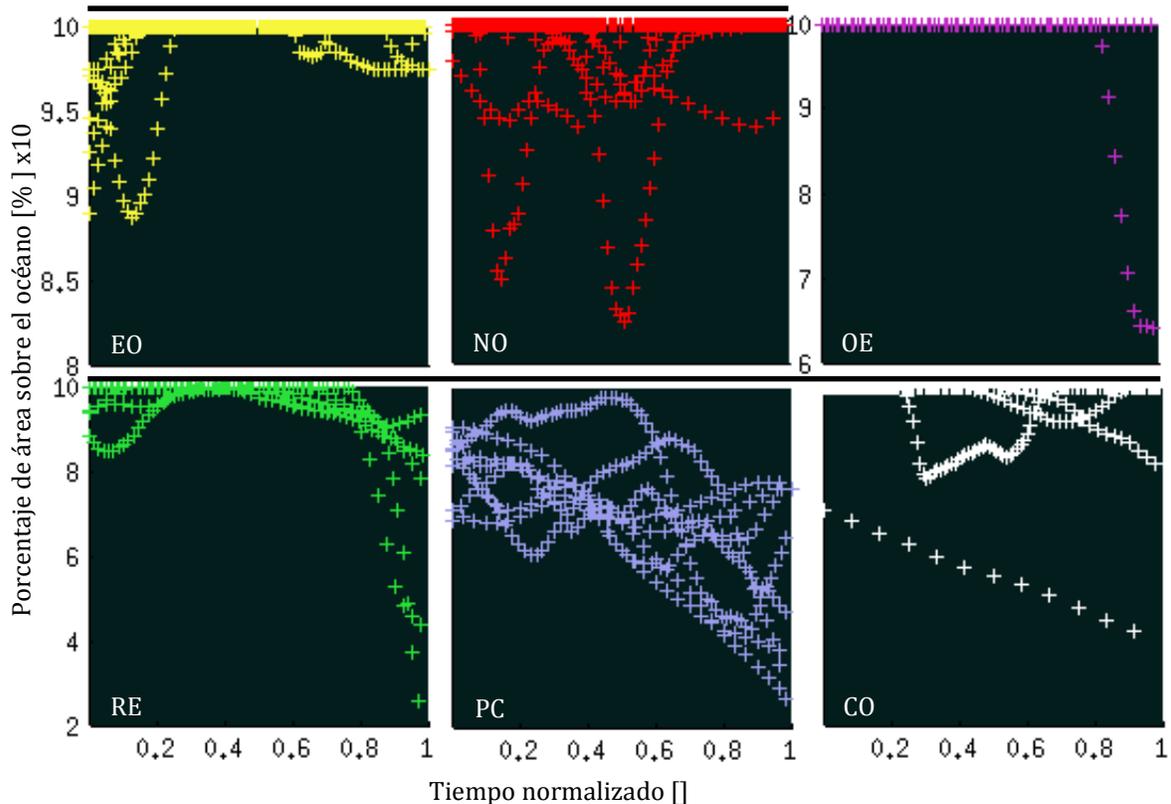


Figura 4-5. Series de tiempo normalizadas del porcentaje del área de cada CT sobre el océano para cada clúster. Las líneas horizontales sobre cada figura indican que figuras que comparten ejes verticales.

### SST sobre los CTs.

Otro factor que puede influir en la convección de los CTs es la SST, la cual sirve como “combustible” para mantener la circulación ciclónica, y se encuentra relacionada con la intensidad de los CTs.

Si bien, la Figura 4-2, sugiere que los CTs del clúster NO tienden a moverse sobre regiones con una baja SST (menores a 26°C), y que los clústeres EO y PC, parecen encontrarse en aguas con SST altas (mayores a 26°C) identificaremos en una forma cuantitativa este enfriamiento; tanto para estos tres clústeres como para los restantes, basándonos únicamente en el desplazamiento meridional de los CTs de cada clúster.

Una forma de estimar la SST en un intervalo de tiempo sobre un CT, es considerar la forma del CT como un disco, en forma análoga a como se hizo en la sección anterior para estimar el porcentaje del área del CT que se encuentra sobre tierra, solo que en esta situación se calculará el valor promedio de la SST sobre la región ocupada por el CT empleando la ecuación (A.4.4) sobre la región descrita por la región (A.4.5). Dada la diferencia en las resoluciones temporales de la posición del CT y de la SST, se supondrá que esta última casi no varía a lo largo del día, por lo que se podrá aproximar como una variable constante a lo largo de un día, esta simplificación impondrá una discontinuidad en el valor de la SST en un CT cada

que sean las 0000 UTC, pero la variación es en la SST se puede considerar mínima entre cada dos días.

Respecto a la variación zonal de la SST, esta se considerará mínima (basándose en una inspección visual de la Figura 4-2 y en la forma en como ha sido definido cada clúster), por lo que la variación de la SST será una función única de la latitud, en una primera aproximación.

En la Figura 4-6 se muestra el diagrama de dispersión entre la latitud y la SST promedio de un CT, mismo que muestra que el gradiente meridional en la SST de los CTs del clúster NO es el más intenso con respecto a los otros clústeres; con esta figura y con ayuda de la Tabla 4-2 se observa que el clúster PC, el cual, a pesar de alcanzar latitudes mayores el gradiente térmico es menor con respecto al clúster EO. El clúster EO muestra que existe una gran variabilidad en cuanto a las variaciones térmicas meridionales (véase la R<sup>2</sup> en la Tabla 4-2), lo mismo que los otros clústeres, pero aun así son menor que el del clúster EO.

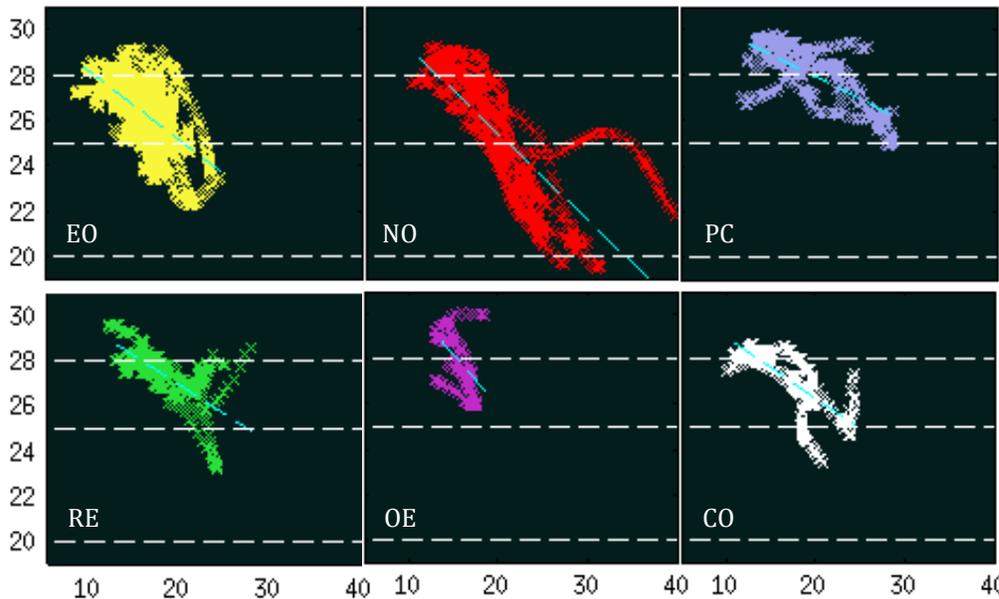


Figura 4-6. Variación meridional de la SST en cada clúster. Se muestra en una línea punteada, la isoterma de los 25°C. Se muestran las isotermas de 20, 25 y 28 °C, así como la recta que mejor ajusta la dispersión de los puntos.

Clústeres						
Clúster	Azimut [°]	Latitud [°N]	Fracción máxima sobre tierra [%]	$\frac{\Delta SST}{\Delta \varphi} \left[ \frac{^{\circ}C}{^{\circ}N} \right]$	R <sup>2</sup>	Población del clúster [%]
EO	270-300	8-25	90	-0.30	0.41	39.3
NO	290-310	10-30	80	-0.38	0.61	21.3
PC	300-350	11-26	20	-0.19	0.49	14.8
RE	290-310	12-25	20	-0.26	0.47	9.8
OE	80-120	13-18	50	-0.40	0.27	4.9
CO	N. A.	10-24	50	-0.27	0.55	9.8

Tabla 4-2. Rangos típicos de las variables que caracterizan a cada clúster.

Estas pruebas muestran que cada clúster posee características únicas con respecto a los demás, resumidas en la siguiente tabla, las cuales inducen una caracterización de los CTs de esta cuenca en distintos clústeres, donde dichos clústeres representan ambientes únicos donde se desarrollan los CTs, los cuales poseerán rasgos distintivos incluyendo la convección, la cual será modulada por estos factores evaluados.

## CAPÍTULO 5

### **DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE RELÁMPAGOS EN CICLONES TROPICALES**

Corbosiero (2002) y Abarca (2011) han observado y estudiado patrones espaciales en la convección en los CTs estimada a través de su actividad eléctrica, evaluando la influencia de la cortante vertical de viento así como la dirección del CT sobre esta. Ellos encontraron que en la mayoría de las ocasiones, los relámpagos se producen “downshear” (parte delantera del vector cortante) sobre toda la superficie ocupada por el CT, además se encontraron diferencias en distintas regiones del CT, de esta forma, en el núcleo interno se observó que los relámpagos tienen una ligera preferencia de formarse a la izquierda del “downshear”.

En este capítulo, se realizará un estudio de la distribución espacial de la cantidad de relámpagos (DECR) producidos en cada clúster, con el objeto de mostrar las diferencias y semejanzas en cada clúster siguiendo las ideas centrales de los trabajos de Corbosiero (2002) y Abarca (2011).

La resolución temporal tanto de los datos de la cortante (NARR) como de la posición del CT (HURSAT) es de 3 hrs, como se expone en los datos y metodología. En cada intervalo de tiempo y en cada posición del CT se asociará una DECR en un marco de referencia móvil con origen en el centro del CT, compuesto por los relámpagos ocurridos en un intervalo de tiempo de  $\mp 1.5$  hrs con respecto a la posición del CT. Cada DECR será particionada en una malla regular de  $0.07^\circ \times 0.07^\circ$ , con el propósito de estimar la densidad de relámpagos en cada punto de malla de cada intervalo de tiempo. Posteriormente se rotará cada DECR de acuerdo al azimut tanto del vector de movimiento como de la cortante, en donde sea posible determinar este valor (véase figura 3-3), por lo que cada intervalo de tiempo tendrá dos DECR, una asociada al vector de movimiento (DECRM) y otra asociada a la cortante (DECRC).

Se ha observado una gran variabilidad en la cantidad de relámpagos entre DECRs individuales, la cual va desde unos cuantos relámpagos hasta miles de relámpagos en las inmediaciones de un CT, por lo que el estudio individual de DECRs no revelaría la influencia en forma directa tanto de la cortante como del vector de movimiento.

Siguiendo la metodología de Corbosiero (2002) y Abarca (2011), se sumarán todas las DECRs (tanto DECRM y DECRC) resultantes de cada clúster y obtener las DECRM(C) acumuladas, de esta forma es posible analizar la influencia de la cortante y del movimiento sobre la distribución espacial de los relámpagos. Cada una de estas 12 DECRs (dos por cada clúster), será normalizada dividiendo la cantidad máxima de relámpagos en un punto de malla con el propósito de poder identificar fácilmente los máximos en cada DECR empleando una escala común a todas las DECRs.

La limitación que impone el dominio espacial del NARR y por el método de estimación de la cortante (véase el capítulo 3 y la Figura 3-3) en cada posición de los CTs impide que siempre sea posible determinar esta variable; por lo que se trabajará en el subdominio mostrado por la figura 3-3.

Bajo estas condiciones es conveniente establecer las siguientes definiciones:

- I. Intervalos totales ( $I_t$ ): Son todos los intervalos de la muestra en cada clúster y coincide con la cantidad de imágenes de satélite disponibles para cada CT de cada clúster.
- II. Intervalos efectivos ( $I_e$ ): Son todos los intervalos de la muestra de cada clúster en donde se puede estimar la cortante, es decir, la cantidad de imágenes de satélite cuyo centro se encuentra en el subdominio mostrado por la figura 3-3.
- III. Intervalos no nulos: son los intervalos en donde se produjo al menos un relámpago a menos de 400 km de distancia del centro de un CT ( $I_n$ ).

Además se puede considerar lo siguiente:

- IV. Intervalos totales no nulos ( $I_{tn}$ ): Es la cantidad total de intervalos no nulos.
- V. Intervalos efectivos no nulos ( $I_{en}$ ): Es la cantidad de intervalos efectivos no nulos

Para observar la influencia de la cortante sobre los relámpagos y el movimiento de los CTs es necesario considerar únicamente la cantidad de  $I_e$ , de esta forma se garantiza que tanto la DECRM y la DECRC representen el mismo periodo de tiempo, así también la misma cantidad de relámpagos. Posteriormente se comparará la DECRM restringida a los  $I_e$  con la DECRC sobre los  $I_t$ .

Conocer la proporción entre la cantidad de  $I_e$  e  $I_t$  permite conocer cuanto tiempo pasan los CTs fuera del subdominio NARR y además conocer cuantos intervalos no se están considerando; esta proporción varía de clúster en clúster, pero se puede observar que en todos los clústeres la cantidad de  $I_e$  es mayor o aproximadamente igual al 70.0% de los  $I_t$  (tabla 5-1).

Con estas cantidades se puede estimar la cantidad de intervalos en los cuales los CTs producen descargas, esta cantidad varía ampliamente entre los diversos clústeres, así por ejemplo, el clúster EO solamente produce relámpagos en el 43.8% de los intervalos, mientras que el clúster PC produce relámpagos el 88.5% de los intervalos, lo cual puede ser evidencia directa de la influencia continental sobre la convección, si se compara con los clústeres EO y

NO. Esto también es observado por alta fracción de  $I_{tn}$  con respecto a los  $I_t$  en el clúster RE, el cual se encuentra también cerca de tierra, en algunas ocasiones (véase Tabla 5-1).

También resulta interesante conocer si la fracción de  $I_{en}$  con respecto a la cantidad de  $I_e$  es semejante a la fracción de  $I_{tn}$  con respecto a la cantidad de  $I_t$ , con esto se puede estimar crudamente si la distribución de los intervalos no nulos en cada clúster es uniforme, es decir, comparar las cantidades  $I_{en}/I_e$  y  $I_{tn}/I_t$ . Este cociente muestra que en el clúster PC ocurre que  $I_{en}/I_e \cong I_{tn}/I_t$  lo cual sugiere que en este clúster los intervalos no nulos se encuentran uniformemente espaciados, lo mismo ocurre en el clúster RE y OE, donde la diferencia es menor al 10%, por el contrario, en los clústeres restantes estas cantidades difieren en más del 10.0%. Este análisis crudo hace suponer que en el caso de los CTs que se encuentran cerca de tierra los  $I_n$  tienden a estar uniformemente distribuidos, mientras que en el caso de los CTs que se encuentran lejos de tierra ocurre lo opuesto.

Una forma cruda de estimar si la concentración de la cantidad de relámpagos a lo largo del tiempo tiende a ser uniforme, es estimar la proporción de la cantidad de relámpagos que resulta al contar todos los relámpagos en los  $I_{en}$  con la cantidad de relámpagos que resultan al contar todos los relámpagos en los  $I_{tn}$ , de esta forma si la cantidad de relámpagos tiende a ser uniforme en cada intervalo se cumple la siguiente relación  $I_{en}/I_{tn} \cong R_e/R_t$ .

Clúster	Intervalos en cada DECR acumulada							
	Cantidad de intervalos			Cantidad de intervalos no nulos				
	Totales ( $I_t$ )	Efectivos ( $I_e$ )	$\frac{I_e}{I_t}$ [%]	Totales ( $I_{tn}$ )	$\frac{I_{tn}}{I_t}$ [%]	Efectivos ( $I_{en}$ )	$\frac{I_{en}}{I_e}$ [%]	$\frac{I_{en}}{I_{tn}}$ [%]
EO	1632	1139	69.8	714	43.8	377	33.1	52.8
NO	765	599	78.3	353	46.1	185	30.9	52.4
PC	416	344	82.7	368	88.5	296	86.0	80.4
RE	307	235	76.5	224	73.0	156	66.4	69.6
OE	126	89	70.6	84	66.7	53	59.6	63.1
CO	341	230	67.4	236	69.2	135	58.7	57.2

Tabla 5-1. Cantidad de los diferentes tipos de intervalos que conforman cada clúster.

Clúster	Cantidad de relámpagos para cada conjunto de intervalos			Relámpagos por intervalo	
	totales ( $R_t$ )	efectivos ( $R_e$ )	$\frac{R_e}{R_t}$ [%]	$\frac{R_t}{I_t}$	$\frac{R_e}{I_e}$
EO	63293	34866	55.1	39	31
NO	63393	29786	47.0	83	50
PC	170077	113732	66.9	409	331
RE	68052	24043	35.3	222	102
OE	12054	4101	34.0	95	46
CO	37729	12813	34.0	111	55

Tabla 5-2. Cantidad total de relámpagos en los clústeres considerando diferentes conjuntos de relámpagos.

Considerando esta estimación cruda resulta que los clústeres EO y NO tienden a tener una cantidad uniforme de relámpagos en cada intervalo de tiempo, puesto que la diferencia entre  $I_{en}/I_{tn}$  y  $R_e/R_t$  es aproximadamente el 5.0%. Resulta interesante destacar que estos clústeres están formados por los CTs que generalmente se encuentran lejos de tierra. Por el contrario los clústeres PC, RE OE y CO muestran grandes diferencias, las cuales van del 13.5% (PC) al 34% (RE), de acuerdo a la tablas 5-1 y 5-2.

Estos resultados crudos sugieren que en el caso de los CTs cerca de tierra (PC, RE y OE) los intervalos no nulos se encuentran uniformemente distribuidos, mientras que en el caso de los CTs que se encuentran lejos de tierra (EO y NO) los intervalos no nulos no se encuentran uniformemente distribuidos y tienen una preferencia a ubicarse fuera del subdominio NARR, puesto que al quitar estos intervalos, se perdió una gran cantidad de intervalos no nulos.

Por el contrario, la cantidad de relámpagos por intervalo se encuentra uniformemente distribuida en el caso de los CT que se encuentran lejos de tierra (EO y NO), mientras que en el caso de los CTs que se encuentran cerca de tierra (PC, RE y OE) existen grandes variaciones en la cantidad de relámpagos por intervalo.

En el caso del clúster OE los resultados previos pueden no ser significativos, dado que está conformado únicamente por tres CTs (Figura 4-3 y la Tabla 4-1, uno de ellos cerca de tierra y los otros dos lejos de tierra la mayor parte de su vida) además es el clúster con la menor cantidad de intervalos. Aun así resulta interesante observar estos resultados son aplicables al 85.2% de la muestra CTs.

Además, se puede estimar la cantidad promedio de descargas por intervalo en cada clúster observándose que los clústeres PC y RE son los que cuentan con una cantidad mayor de relámpagos por intervalo, independientemente del conjunto de intervalos que se emplee ( $I_t$  o  $I_e$ ), pero si varía sustancialmente el valor promedio dependiendo del conjunto de intervalos elegido, algo que se esperaba dado que en esto clústeres presentan una gran variabilidad en la cantidad de relámpagos en cada intervalo de tiempo.

En el caso del clúster EO, el cual produce la menor cantidad de relámpagos por intervalo, se puede observar que los valores promedio que resultan de escoger distintos conjuntos de intervalos son prácticamente iguales, lo cual corrobora la uniformidad de la cantidad de relámpagos por intervalo. Aunque esto no sucede para el caso del clúster NO, donde se esperaba que ocurriera una situación semejante.

Con estas consideraciones se pueden formar las DECR acumuladas, asociadas a la cortante y asociadas al movimiento para el conjunto de intervalos efectivos y determinar si en cada clúster se observan los mismos patrones que los observados por Corbosiero (2002) y Abarca (2011); además se puede comparar la DECRM con el conjunto de  $I_t$  con la DECRM restringida al conjunto de  $I_e$  para comparar si existe diferencia alguna entre las estructuras convectivas resultantes de diferentes conjuntos de intervalos. Mismo que se hace a continuación.

### Análisis de la DECRM acumulada.

Las 12 DECRM acumuladas muestran asimetrías tanto radiales como azimutales, mismas que serán discutidas a continuación (figura 5-1 y figura 5-2).

Es importante destacar que los CTs del clúster CO son aquellos que no pudieron ser clasificados en algún conjunto de condiciones particulares, por lo que algún análisis hecho sobre este clúster debe ser considerado con cuidado y no debe pensarse que estos CTs comparten características comunes.

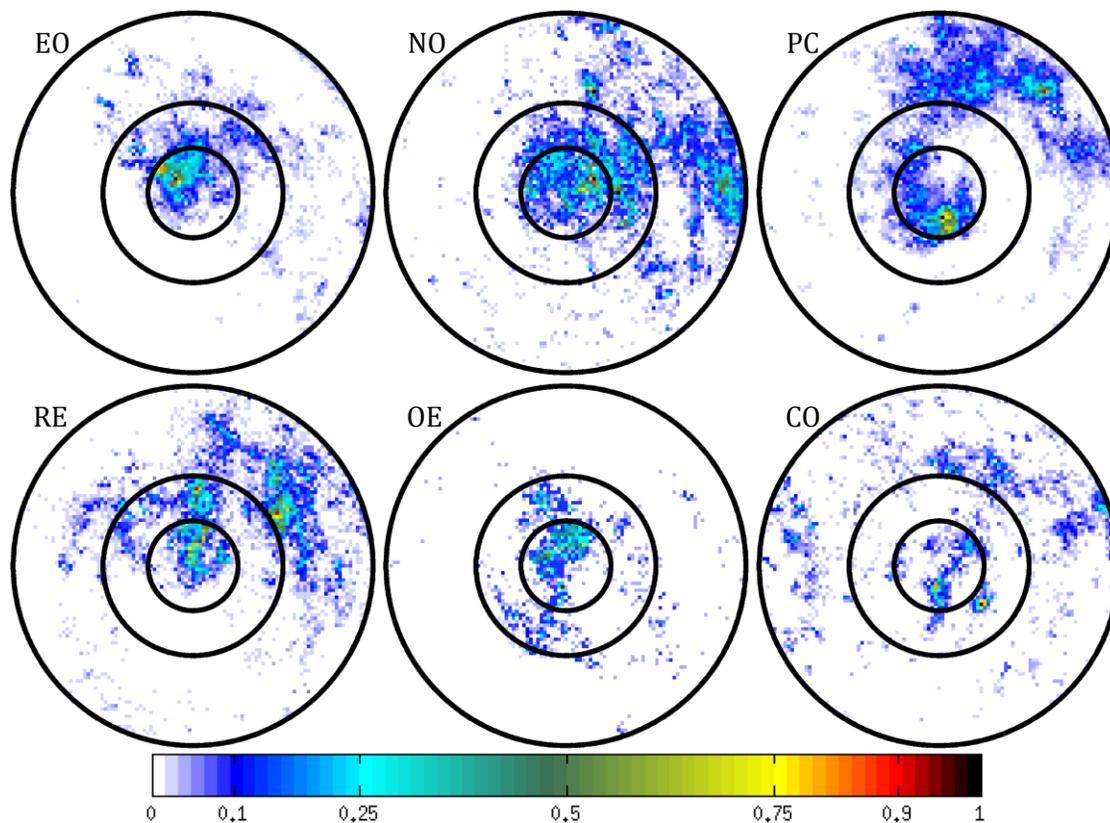


Figura 5-1. . DECRM acumulada para cada clúster. Se muestran circunferencias concéntricas centradas en el centro del CT a los 100, 200 y 400 km. El vector de movimiento apunta hacia arriba. La barra de colores indica la cantidad de relámpagos normalizada con respecto a la cantidad máxima de relámpagos en un punto de malla de cada DECRM acumulada.

### Asimetrías radiales.

Todos los clústeres muestran un máximo absoluto (puntos negros de cada DECRM de la figura 5-1) en el núcleo interno (disco que va de los 0 a los 100 km de radio desde el centro), sin embargo en el anillo interior que va de los 100 a los 200 km de radio y en el anillo exterior que va de los 200 a los 400 km se observan comportamientos diferentes, dependiendo del clúster en cuestión. Observándose que en el anillo interior de los clústeres PC, RE y CO muestran un mínimo en la cantidad de relámpagos y un segundo máximo relativo en el anillo exterior, este tipo de estructuras radiales ha sido observada por Molinari y otros (1994) y (1999), aunque los radios propuestos por el no coinciden con los de esta muestra, esto puede ser debido a que los CTs del PNO pueden tener un tamaño mayor en promedio.

Por el contrario los clústeres EO, CO y OE muestran un máximo en el núcleo interno y una disminución gradual hacia radios mayores, en el caso del clúster OE se aprecia un segundo máximo “aislado” en el anillo exterior.

#### **Asimetrías azimutales.**

En el anillo exterior de los clústeres EO, NO, y PC se observó que la mayor cantidad de relámpagos se encuentran en el primer cuadrante, también en una pequeña región en este anillo con un azimut de aproximadamente  $45^\circ$  (clúster EO, PC y RE) se observa un máximo en la cantidad de relámpagos, mientras que en el clúster NO se observa una distribución uniforme a lo largo de todos el primer cuadrante y en el clúster RE se observa que tanto el primero como el cuarto cuadrante presentan descargas, siendo que en el primer cuadrante se observa una mayor cantidad de descargas y un máximo bien definido, mientras que en el cuarto cuadrante se presente una distribución uniforme con una menor cantidad de relámpagos, esta “inversión” en la posición de los relámpagos podría deberse al proceso de recurvamiento.

En el anillo interior del clúster EO se muestra una preferencia en la posición de los relámpagos hacia el azimut  $0^\circ$ , mientras que en el clúster NO presenta el mismo patrón que el anillo exterior. El clúster PC muestra un mínimo relativo muy marcado en todo el anillo interior.

Resulta interesante observar que en el núcleo interno de los clústeres EO y NO, el máximo de relámpagos se encuentre en el cuarto cuadrante contrastando con la situación que ocurre en el primer cuadrante. Mientras que en el caso del clúster PC la mayor cantidad de relámpagos se forma entre los azimuts  $160^\circ$  y  $190^\circ$ , situación “opuesta” al clúster RE donde los relámpagos se encuentran concentrados en sobre el azimut  $0^\circ$  desde el origen.

Los clústeres restantes muestran asimetrías diferentes, el clúster CO presenta una distribución uniforme sobre “casi” todo el anillo exterior, excepto en la región comprendida por los azimuts  $150^\circ$  y  $210^\circ$ . Mientras que el clúster OE posee muy pocas descargas en los anillos exteriores.

El anillo interior del clúster CO se encuentran estructuras muy localizadas en los cuadrantes tres y cuatro; mientras que en el clúster OE se los relámpagos se encuentran alrededor del azimut  $0^\circ$ , en forma análoga al clúster EO.

En el núcleo del clúster OE los relámpagos se encuentran alrededor del azimut  $0^\circ$ , mientras que en el clúster CO los relámpagos se encuentran distribuidos a lo largo del segundo cuadrante.

Este análisis visual revela que cada clúster posee características únicas en la forma en la que el movimiento de los CTs influye en la distribución de los relámpagos, aunque es de notarse que en el anillo exterior los relámpagos se producen en la parte frontal del CT (clústeres EO, NO, PC y RE, 82.2% de los CTs) y principalmente en el primer cuadrante. En el núcleo interno la situación es la misma (clústeres EO, NO, RE y OC, 77.3% de la población) solo que el

máximo se encuentra en el cuarto cuadrante. Además se puede observar que la cercanía a tierra promueve la producción de relámpagos en los anillos exteriores (clúster PC y RE).

### **Análisis de la DECRC acumulada.**

Otro factor que influye en la producción de relámpagos es la cortante vertical, por lo que resulta interesante hacer un análisis visual de la DECRC acumulada de cada clúster, en este análisis se omitirá la discusión de las asimetrías radiales, puesto que la rotación es una transformación que preserva distancias entre puntos, por lo que las diferencias radiales serán iguales que las observadas en la DECRM acumulada.

### **Asimetrías azimutales.**

Una de las estructuras más interesantes se observa en el núcleo interno del clúster EO y en menor medida en el clúster NO, la cual consta de un “ojo” no centrado en el origen donde se observa un mínimo en la cantidad de relámpagos semejante a un ojo, resulta interesante notar que esta estructura que resulta de la superposición de las DECRC de aproximadamente el 40% de la muestra de CTs, es independientemente de la intensidad de CT en cuestión, recordando que las tormentas tropicales no suelen formar ojos, mientras que los huracanes intensos suelen formar ojos. Además la mayoría de relámpagos del núcleo interior se producen *downshear* a la izquierda en el clúster EO y coincidiendo con las observaciones de Corbosiero (2002).

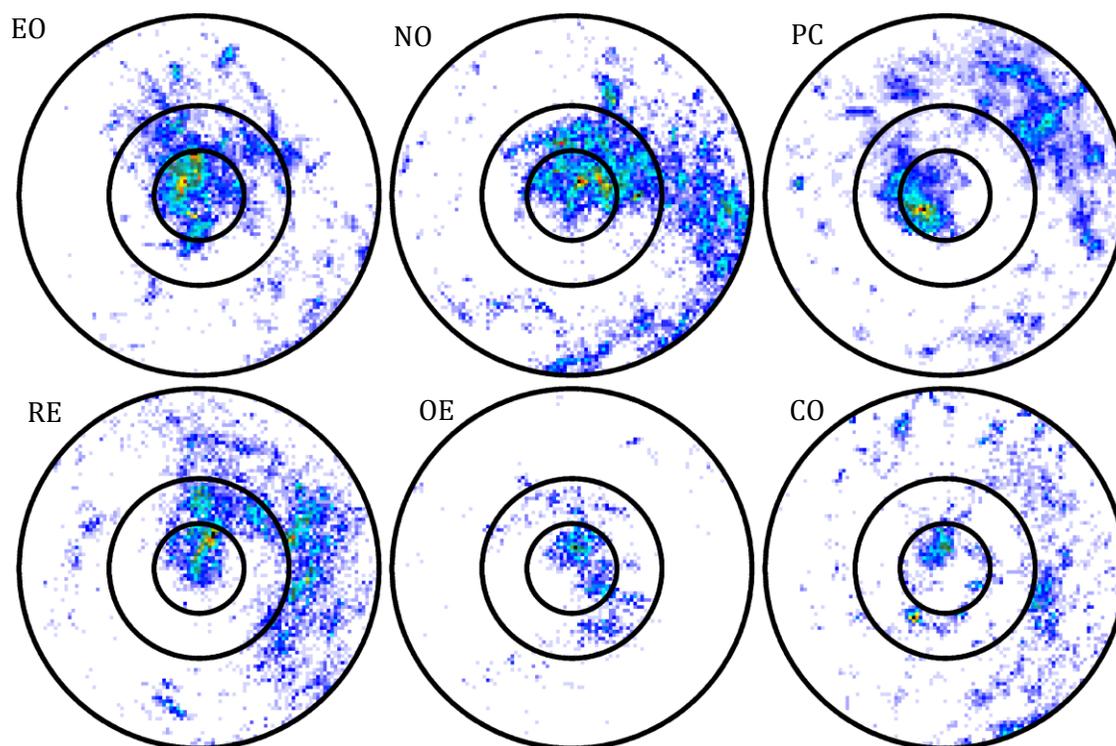


Figura 5-2. Igual que la figura 5-1, solo que para las DECRC acumuladas de cada clúster. La barra de colores es igual a la de la figura 5-1

Sin embargo, esta distribución en el núcleo interno no se observa en los clústeres NO, PC y RE, los cuales poseen estructuras únicas y diferentes entre sí, por ejemplo, el clúster NO muestra el máximo de relámpagos en el núcleo interno “downshear” derecha, mientras que el clúster PC muestra su máximo “upshear” izquierdo y el clúster RE muestra que los relámpagos se encuentran paralelos a la cortante.

Contrastando con las asimetrías observadas en el núcleo interno, en el anillo exterior de casi todos los clústeres (EO, NO, PC y RE, 85.2% de la población), se observa que la mayoría de los relámpagos se encuentran “downshear” a la derecha, corroborando las observaciones hechas por Corbosiero (2002).

Respecto al clúster OE se observa que los relámpagos del núcleo interno se forman “downshear” a la derecha, aunque la cantidad de intervalos donde se calculó la cortante fue de 89 intervalos, los cuales se pueden considerar muy pocos para estimar un comportamiento en este clúster. Finalmente el clúster CO también muestra que los relámpagos en el núcleo interno son producidos “downshear” izquierdo, coincidiendo con las observaciones de Corbosiero (2002).

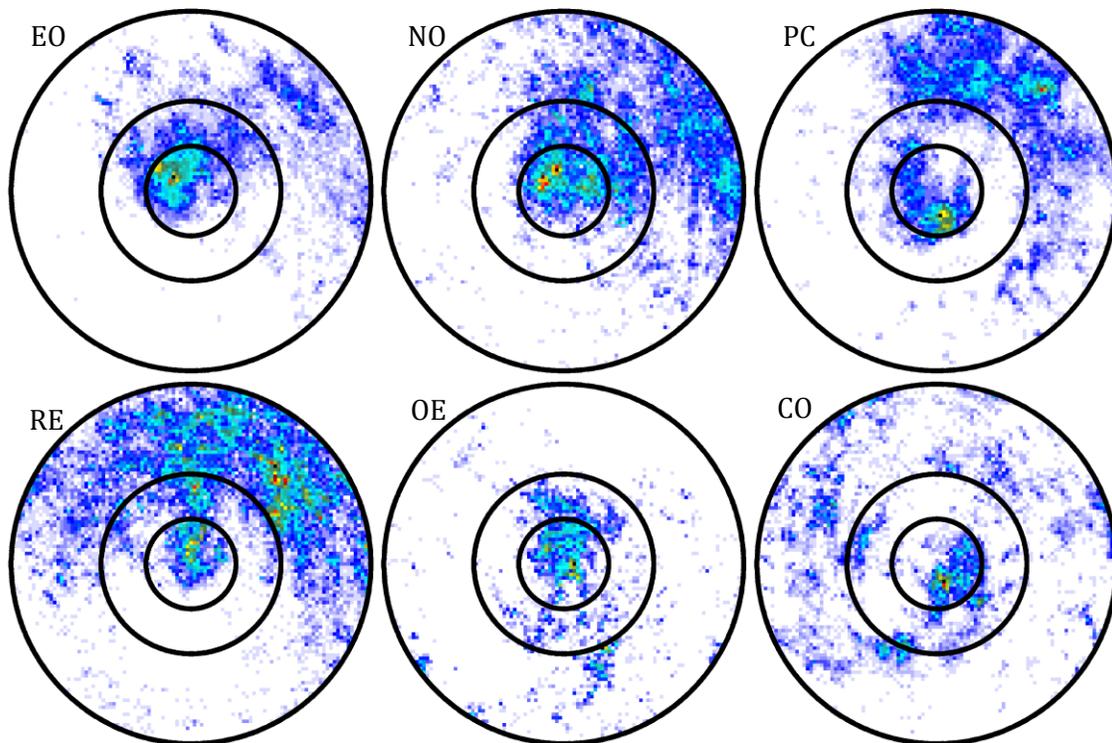


Figura 5-3. Igual que la figura 5-1, solo que para los intervalos totales. La barra de colores es igual que la de la figura 5-1

### Comparación entre las DECRM.

Resulta útil comparar las diferencias entre la DECRM acumulada restringida al conjunto  $I_e$  y la DECRM acumulada para el conjunto  $I_t$ , con el fin de determinar si el análisis visual hecho anteriormente es válido, en especial para los clústeres PC, RE OE, que son lo que mostraron que la cantidad de relámpagos varía mucho en cada intervalo de tiempo.

La comparación visual entre la figura 5-1 y la 5-3 muestra las mismas estructuras tanto radiales como azimutales, así como las regiones de máximos y mínimos relativos de la cantidad de relámpagos son semejantes con la única diferencia que en la figura 5-3 estas estructuras se encuentran “aumentadas”.

Aunque, solamente una estructura importante que no se mostraba en la figura 5-1 se observa ahora en la figura 5-3, la cual es la situada en el anillo exterior con un azimut de  $45^\circ$  en el clúster EO. Esta estructura es común a clústeres NO, PC y RE.

### **Análisis de la densidad de relámpagos en las DECR.**

Evaluar la influencia del movimiento o de la cortante sobre la posición de los relámpagos en un CT se puede realizar contando los puntos de malla en donde no hay descargas, esto permite conocer si alguna de estas variables “concentra” o “dispersa” los relámpagos. También se puede analizar la homogeneidad de las estructuras sobre todos los clústeres, es decir, determinar si existen estructuras comunes en todos los clústeres, esto mostraría que la variable en cuestión influye más en la convección que otras características ambientales asociadas a cada clúster.

La segunda forma en que se puede estimar la influencia de alguna variable en cuestión puede obtenerse con un análisis visual, como el realizado en la sección anterior, mientras que la primera requiere de un análisis matemático, mismo que se hará a continuación y requerirá establecer algunas definiciones alusivas a los puntos de malla de una DECR:

- I. Punto de malla no nulo ( $R_n$ ): decimos que un punto de malla es no nulo si y solo si en dicho punto la cantidad de relámpagos es mayor a cero.
- II. Punto de malla nulo ( $R_0$ ): decimos que un punto de malla es nulo si y solo si el punto de malla no es no nulo.
- III. Superficie de punto de malla: un punto de malla tiene una superficie de  $64 \text{ km}^2$ , la cual es el equivalente al área de un cuadro de  $8 \text{ km}$  de lado, esta superficie coincide con la resolución espacial de las imágenes HURSAT.
- IV. Punto de malla con fracción  $p$  ( $R_p$ ): es un punto de malla no nulo tal que la cantidad  $n > 0$  de relámpagos en ese punto satisface la ecuación  $p = n/m$ , donde  $m$  es la máxima cantidad de relámpagos que hay en un punto de malla de la DECR en cuestión.
- V. Superficie efectiva ( $Se$ ): es la superficie ocupada por todos los puntos de malla no nulos en cada intervalo.

Con estas definiciones se puede comparar la superficie ocupada por los  $R_n$  de la DECRC acumulada con la superficie ocupada por los  $R_n$  de la DECRM acumulada restringida a los  $I_e$  y observar que DECR acumulada minimiza la superficie ocupada por los  $R_n$ .

La tabla 5-4 muestra que la cortante dispersa a los relámpagos sobre un área mayor que el vector de movimiento (clústeres EO, PC, RE y CO), además la superficie ocupada por los  $R_n$ , ya sea  $R_{nM}$  o  $R_{nC}$  es mayor si el valor  $R_e/I_e$  es mayor (tabla 5-2), esto sugiere una correlación entre la cantidad de relámpagos y el área ocupada por estos, independientemente del clúster que sea.

Es destacable que la cortante, la cual produce estructuras semejantes en los anillos exteriores de todos los clústeres, dispersa más los relámpagos que el movimiento siendo esta diferencia máxima en el clúster PC. El único caso donde ocurre lo contrario es el clúster OE, pero la diferencia en la superficie es menor al 0.2%, además de que es el clúster con la menor cantidad de intervalos, el cual puede no tener una significancia estadística.

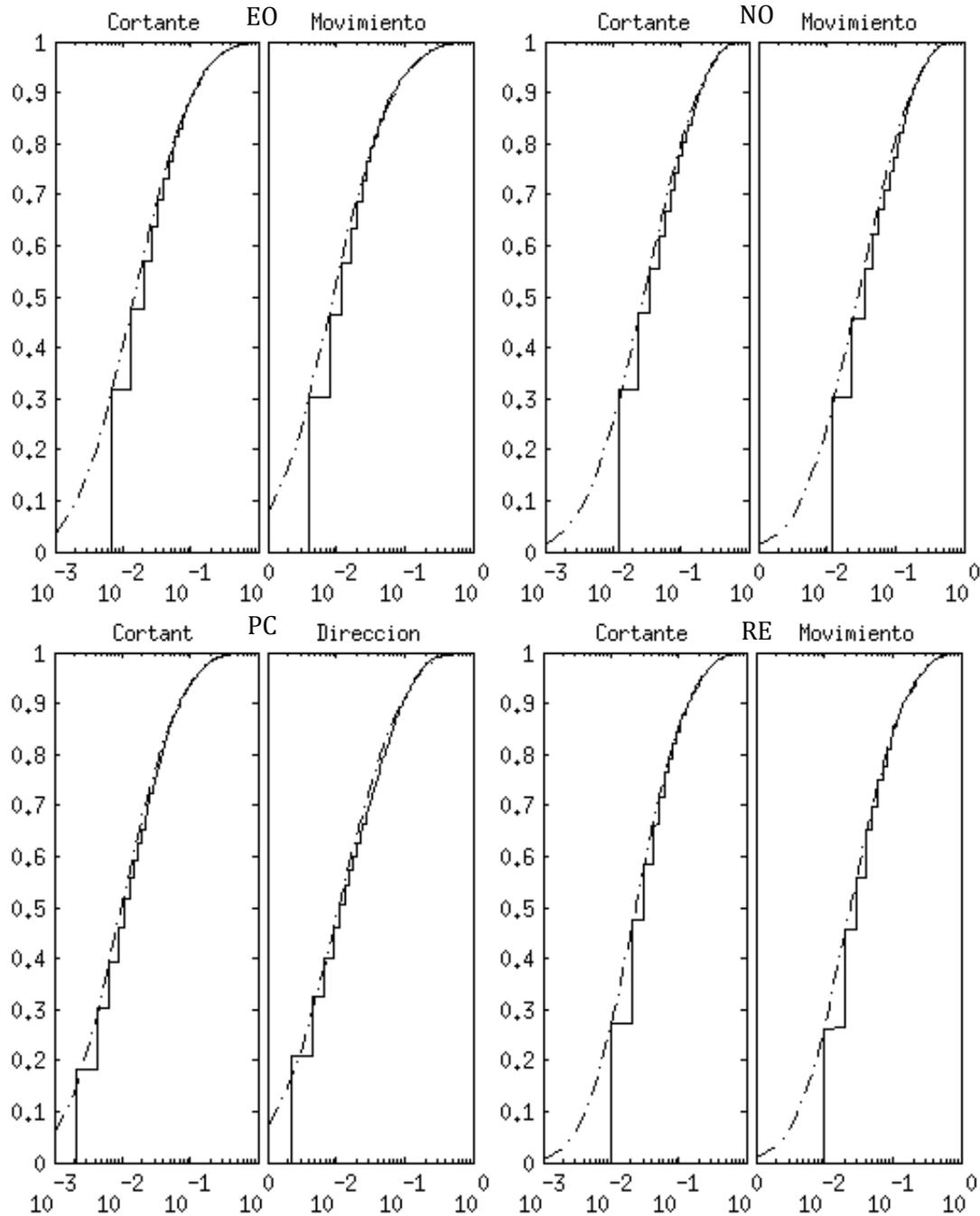
Clúster	Superficie efectiva			
	Movimiento ( $R_{nM}$ ) [km <sup>2</sup> ]	fracción de la superficie [%]	Cortante ( $R_{nC}$ ) [km <sup>2</sup> ]	fracción de la superficie [%]
EO	272,320	38.6	312,128	44.2
NO	300,800	42.6	302,720	42.9
PC	446,848	63.3	532,224	75.4
RE	253,056	35.9	264,640	37.7
OE	53,888	7.6	52,928	7.5
CO	234,880	33.3	235,392	33.3

**Tabla 5-4. Superficie ocupada por los puntos de malla no nulos, expresada en km<sup>2</sup> y como fracción de la superficie total de un CT.**

Si se considera que los  $R_p$  para una  $p$  dada y que los  $R_q$  con  $q < p$  son ruido, es decir, no aportan información que determine estructuras significativas en las DECR acumuladas se puede realizar el análisis anterior de nuevo sujeto a la restricción que solo se considerará la superficie ocupada por los  $R_{q'}$  con  $q' > p$ , de esta forma se puede volver a calcular que variable minimiza la superficie ocupada por los  $R_{q'}$ . Para lograr esto se calculó la función de densidad relativa acumulada, ecuación (D.1.1), para estimar la fracción de la Se ocupada por los  $R_{q'}$  para diferentes valores de  $q'$ .

Para estudiar esta función, consideremos que dada una DECR acumulada definimos la densidad relativa como la cantidad de relámpagos que hay en la superficie asociada a un punto de malla dividida por la cantidad máxima de relámpagos que hay en un punto de malla, en términos de los  $R_p$   $p$  es la densidad de relativa multiplicada por la superficie de un punto de malla, dado que la malla es regular entonces es posible interpretar a los  $R_p$  como puntos con densidad relativa  $p$ , de esta forma el conjunto  $R_1$  representa a los puntos con densidad relativa 1, los cuales son los puntos donde la cantidad de relámpagos es  $m$ , de acuerdo el conjunto IV, así  $R_{0.1}$  representa a los puntos con una densidad relativa de una décima parte de la cantidad máxima de descargas que puede haber en un punto.

Las figuras 5-4 y 5-5 muestran las funciones de densidad relativa acumulada para cada DECR (M y C) acumulada de cada clúster, la línea sólida muestra la fracción de la Se acumulada desde  $R_{1/\max}$  hasta  $R_p$ ,  $p$  siendo el valor en el eje horizontal, mientras que la línea punteada muestra un ajuste con una función  $\Phi$  continua con  $R^2 > 0.97$ , para todos las DECR y todos los clústeres. Con ayuda de estas figuras resulta fácil calcular la fracción de la Se, ocupada por los  $R_{q'}$ , para alguna  $q'$  arbitraria. La Se puede estimarse por el eje vertical, donde 1 sería toda la Se en una DECR acumulada, 0.5 la mitad de la Se en una DECR acumulada y así sucesivamente.



**Figura 5-4. Función de densidad relativa acumulada para los clústeres EO y NO para las DECRM y DECRC acumuladas. En el eje horizontal se muestra la densidad relativa y en el eje vertical se muestra la fracción de la Se acumulada.**

De esta forma se puede imponer un criterio para establecer el umbral de densidad relativa significativa para realizar un ejercicio exploratorio, este umbral se escogerá arbitrariamente como la densidad relativa 0.1 (solo se tomarán en cuenta los puntos de malla que tengan al menos el 10% del valor máximo de relámpagos en un punto de malla en una DECRC acumulada). De esta forma la Se restringida a los  $R_{q'} > 0.1$  para cada clúster y para cada DECRC

y DECRM muestra que en el caso de los clústeres con CTs cercanos a tierra (PC, RE y CO) se tiene que la cortante minimiza el área. Mientras que en el caso de los clústeres con CTs (EO, NO y CO) lejanos a tierra el movimiento minimiza el área, contrario a lo que ocurre con los clústeres con CTs cercanos a tierra.

Resulta interesante que al imponer un umbral en la densidad relativa de 0.1 resulta que los  $R_{p>0.1}$  ocupen a lo más un 30.8% (clúster OE, tabla 5-5) de la Se, esto puede ser un indicador de la naturaleza estocástica de la distribución espacial de los relámpagos en las regiones donde se acumulan los relámpagos, es decir, que a pesar de que los relámpagos se concentran en determinadas regiones, ya sea considerando la DECRM o la DECRC acumulada, dentro de cada una de estas los relámpagos muestran una distribución que obedece a las leyes de la probabilidad. Este resultado impactante o controversial, recibe sustento del ajuste de las funciones de densidad relativa acumuladas. Mismo que se discutirá adelante.

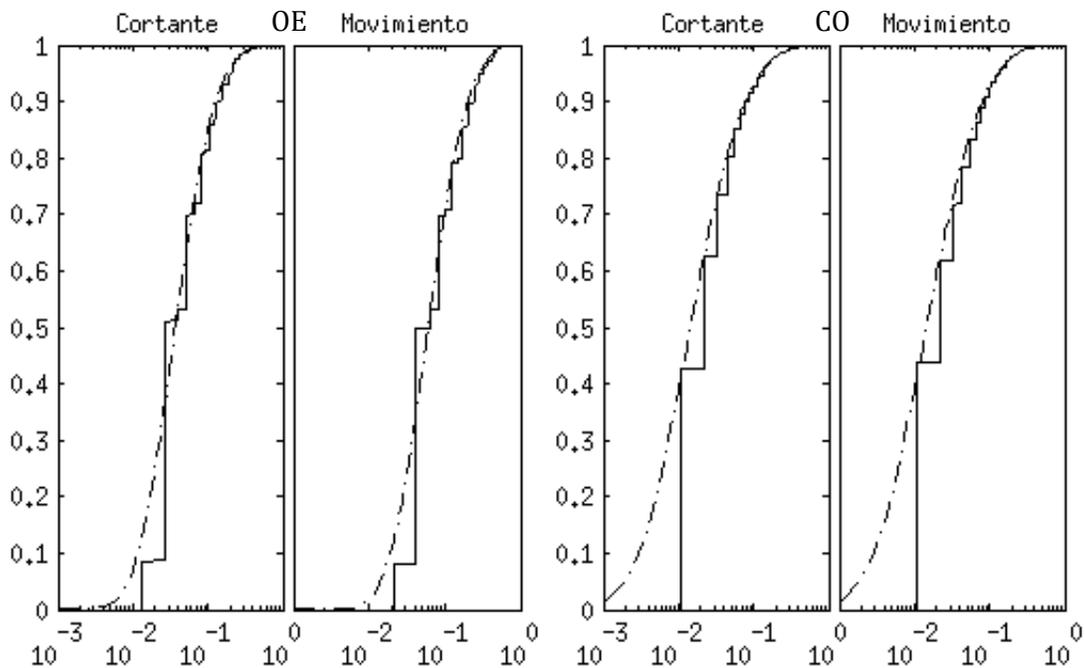


Figura 5-5. Igual que la figura 5-4, solo que para los clústeres OE y CO.

Todas las funciones de densidad relativa acumuladas (líneas punteadas de las figuras 5-4 y 5-5) para todos los clústeres fueron ajustados a la siguiente función, la cual tiene la siguiente forma funcional:

$$\Phi(x) = e^{-(a+b \ln(x)+c \ln^2(x))^2}, \text{ donde } x \text{ es la densidad relativa.}$$

Misma que puede reescribirse de la siguiente forma:

$$\Phi(x) = e^{-(A+C(\ln(x)-B)^2)^2}$$

$$\text{donde:} \quad A = a - \frac{b^2}{4c}, \quad B = \frac{b}{2c} \quad \text{y} \quad C = c$$

En el caso de las figuras 5-4 y 5-5  $x \in (10^{-3}, 1]$  y en general  $\ln(x) \in (-\infty, 0]$

La interpretación geométrica de los coeficientes  $A, B$  y  $C$  es la siguiente:

- $A$  es el valor máximo (mínimo) de la parábola  $A + C(\ln(x) - B)^2$ ;
- $B$  es el valor donde  $\ln(x)$  alcanza su valor máximo (mínimo) ;
- El signo de  $C$  determina la concavidad, es decir si la parábola apunta hacia arriba o abajo y
- $\ln(x_0) = -\frac{b}{2c} \pm \sqrt{\frac{b^2}{4c^2} - a}$ , o bien,  $\ln(x_0) = -B \pm \sqrt{B^2(1 - C) - A}$  son las raíces de la parábola (en caso de existir).

Si  $1 \gg C$  y  $B^2(1 - C) \gg A$ , entonces las raíces se aproximan a  $-2B, 0$  por lo que una raíz se encuentra en  $x_0 = 1$  y  $\Phi(x)$  alcanza su máximo  $e^{-(A)^2}$ , además si  $B < 0$  la otra raíz se encuentra fuera del dominio de  $x$ , bajo estas circunstancias la función  $\Phi(x)$  cumple con las características que debe tener una función de densidad acumulada (Apéndice D).

Estas aproximaciones permiten obtener la función de densidad de la densidad relativa, derivando la función  $\Phi(x)$  respecto a  $x$ .

Superficie total con densidad relativa mayor a 0.1				
Clúster	Movimiento ( $R_{NM}$ ) [km <sup>2</sup> ]	fracción de la Se [%]	Cortante ( $R_{NC}$ ) [km <sup>2</sup> ]	fracción de la Se [%]
EO	18,245	6.7	36,831	11.8
NO	68,582	22.8	68,112	22.5
PC	41,556	9.3	33,530	6.3
RE	42,260	16.7	41,283	15.6
OE	16,597	30.8	6,616	12.5
CO	18,085	7.7	20,008	8.5

**Tabla 5-5. Superficie ocupada por los puntos de malla con densidad relativa mayor o igual a 0.1, expresada en km<sup>2</sup> y como fracción de la superficie efectiva (Se).**

La interpretación geométrica de los coeficientes y la tabla 5-6 permite conocer la forma de la parábola de cada DECR, observándose que todos los coeficientes  $C$  son mayores a cero, lo que indica que las parábolas tienen un mínimo. Además el radical  $\sqrt{B^2(1 - C) - A}$  es parecido a  $B$  (con una diferencia de hasta al 15%) en los clústeres (EO, NO, PC, RE y OE), lo que implica que las raíces se encuentran cerca del cero, es decir,  $\Phi(x)$  alcanza su máximo cerca de  $x = 1$ , mientras que en el clúster CO se alcanzan las mayores diferencias entre el radical y el valor  $B$  (~33%).

De esta forma la función de densidad relativa acumulada  $\Phi(x)$  es válida excepto para los valores cercanos a la densidad relativa máxima.

El hecho que todas las DECR acumuladas se ajusten a una sola función es sorprendente, si se considera que tanto las DECRM y las DECRC acumuladas se formaron a partir de un conjunto de rotaciones diferentes, en CTS inmersos en distintos ambientes y con una variación muy amplia en la cantidad de  $I_e$  y en estos momentos no se cuenta con una explicación de porque de esta situación.

Se puede concluir lo siguiente de todos estos análisis:

1. Los intervalos efectivos de los CTS que se encuentran “lejos de tierra” (clúster EO y NO) presentan una cantidad uniforme de relámpagos, es decir cada intervalo efectivo posee “estadísticamente” la misma cantidad de relámpagos.
2. Por el contrario los CTS que se encuentran cerca de tierra (Clústeres PC y RE) muestran que los intervalos efectivos se encuentren uniformemente distribuidos a lo largo del conjunto total de intervalos, aunque cada uno de estos intervalos muestra una gran variación en la cantidad de relámpagos por intervalo.
3. La cortante del viento genera estructuras homogéneas en todos los clústeres mientras que el movimiento muestra mayor variabilidad en las estructuras espaciales de la distribución de los relámpagos.
4. La cortante “compacta” más los relámpagos que el movimiento si se consideran los puntos de malla con una densidad relativa mayor a 0.1.
5. Todas las distribuciones de densidad relativa acumulada de relámpagos de todos los clústeres tienen la misma forma funcional.

Coeficientes de los polinomios de la función $\Phi(x)$					
Clúster	A	B	C	$\sqrt{B^2(1-C)-A}$	
EO	-0.0197	-0.8386	0.0271	0.8389	DECRM
	-0.0948	-1.4741	0.0268	1.4865	DECRC
NO	-0.3533	-4.3979	0.0193	4.3956	
	-0.4029	-4.2248	0.0204	4.2294	
PC	-0.0312	-0.8542	0.0288	0.8601	
	-0.1471	-2.3535	0.0209	2.3601	
RE	-0.0819	-1.7129	0.0309	1.7103	
	-0.0469	-1.3157	0.0341	1.3111	
OE	0.0184	0.1425	0.0801	0.1672	
	0.0086	-0.4103	0.0791	0.3827	
CO	0.0124	-0.1596	0.0423	0.1095	
	0.0053	-0.2874	0.0403	0.2046	

Tabla 5-6. Coeficientes A, B y C de la función  $\Phi(x)$  para cada DECR acumulada en cada clúster.

## CAPÍTULO 6

### RELACIONES EMPÍRICAS DE LA CANTIDAD DE RELÁMPAGOS EN EL NÚCLEO INTERNO

Varios autores [ (Molinari, Moore, & Idone, 1999), (Price, Asfur, & Yair, 2009) y (DeMaria, DeMaria, Knaff, & Molenaar, 2011)] han llegado a la conclusión que la cantidad de relámpagos producidos por CTs tienen la capacidad de ser empleados como pronosticadores de la intensidad. Además, los mecanismos de intensificación de los CTs indican que la convección debería vigorizarse durante este proceso y, recordando que los procesos de intensificación se encuentran relacionados con la dinámica que ocurre en el núcleo interno, puede suponerse que la cantidad de relámpagos en el núcleo interno se encuentre vinculados a procesos de intensificación. Sin embargo, diagramas de dispersión simples entre la cantidad de relámpagos en el núcleo interno y la intensidad o la intensificación no muestran relación alguna, al menos en el PNO. Por lo que cabe plantearse la siguiente pregunta:

¿Es posible que la cantidad de relámpagos y otra variable puedan dar indicios de la relación entre relámpagos e intensificación?

Para tratar de responder a esta pregunta se estudiarán todos los intervalos de tiempo nulos de cada clúster con la siguiente información de cada intervalo:

- La cantidad total de relámpagos en cada  $I_n (R_I)$ .
- La cantidad máxima de relámpagos en un punto de malla (considerando una malla regular de  $8 \times 8 \text{ km}^2$ ) en cada  $I_n (R_{m\acute{a}x})$ .
- La Se restringida al núcleo interno ( $Se_N$ ).

Se han escogido estas variables por las siguientes razones:

Si bien, la cantidad total de relámpagos es un indicador indirecto de la intensidad de la convección, cabe preguntarse, si existe alguna relación entre  $R_I$  y  $Se_N$ , o en otras palabras, ¿puede ocurrir que en algunas circunstancias exista una gran cantidad de relámpagos diseminada sobre grandes superficies?, o bien, ¿puede ocurrir que en algunas circunstancias exista una gran cantidad de relámpagos concentrada sobre una pequeña superficie?

En caso de no encontrarse relación alguna se puede considerar que estas variables son independientes, implicando que ambas situaciones puedan ocurrir; bajo esta situación se puede considerar formar una tercera variable independiente, misma que se llamará densidad efectiva de relámpagos ( $\rho_e$ ), posee unidades de  $\text{Se}_N^{-1}$ , en este trabajo se tratará únicamente la que se encuentra restringida al núcleo, y tratar de correlacionarla con la intensidad o intensificación.

En caso de encontrarse una relación, esta podría ser empleada para inferir que tan dispersos o compactos se encuentran los relámpagos dada una cantidad de estos en un intervalo de tiempo.

Respecto a la cantidad máxima de relámpagos en un punto de malla se puede plantear la siguiente pregunta, ¿la cantidad máxima de relámpagos en un punto de malla se encuentra relacionada con la cantidad total de relámpagos en todo el núcleo?, responder a esta pregunta afirmativamente permite identificar la fracción máxima que un punto de malla puede alcanzar dada una cantidad de relámpagos en un intervalo de tiempo, así por ejemplo, una relación lineal revelaría que este punto de malla representa una fracción constante e independiente de la cantidad de relámpagos.

En el caso general, indicaría que el punto de malla con la máxima cantidad de relámpagos es una función de la cantidad total de relámpagos en un intervalo.

Para evaluar la relación entre estas variables se elaborarán diversos diagramas de dispersión entre cada par de variables y se buscarán relaciones potenciales entre estas tres variables.

### **Relación entre la cantidad de relámpagos por intervalo y la densidad efectiva ( $\rho_e$ ) en el núcleo interno ( $\text{Se}_N$ ).**

La Figura 6-1 muestra el diagrama de dispersión entre la cantidad de relámpagos y la  $\text{Se}_N$  para cada intervalo de tiempo no nulo en una escala log-log, el cual revela una relación potencial (véase Tabla 6-1) con la siguiente forma funcional:

$$A = \alpha R^\beta \quad (6.1)$$

Donde A es la  $\text{Se}_N$  expresada en términos de puntos de malla, en el caso de una malla regular, el área expresada en  $\text{km}^2$  es proporcional a la cantidad de puntos de malla;  $\alpha$  es un coeficiente real mayor a uno (Figura 6-1, excepto en el caso de Clúster OE), el cual depende de cada clúster,  $\beta$  es una potencia positiva menor a uno y R es la cantidad de relámpagos ocurridos en un intervalo.

Un análisis cualitativo de la potencia  $\beta$  permite estimar el valor promedio de la cantidad de relámpagos por punto de malla para un intervalo dado; así por ejemplo, en el caso de que  $\beta = 1$  ocurriría que el valor promedio de relámpagos por punto de malla resulta es constante e independiente de la cantidad de relámpagos, es decir sería cantidad conservada en todos los  $I_n$ , esto se puede representar a través de la siguiente expresión:

$$\rho_e = \frac{R}{A} = \frac{R}{\alpha R^\beta} = \frac{1}{\alpha} \text{ si } \beta = 1 \quad (6.2)$$

Donde  $\rho_e$  es la densidad efectiva de relámpagos.

En el caso extremo, si  $\beta \rightarrow 0$ , entonces  $\rho_e$  sería proporcional a la cantidad de relámpagos ocurridos en el intervalo, además la  $Se_N$  sería una variable constante e independiente de  $R_I$ , bajo el supuesto de que la ecuación (6.1) tenga un coeficiente de correlación alto, indicando que todos los relámpagos en cada  $I_n$  ocupan la misma  $Se_N$ .

Este análisis nos permite inferir que en el caso de que  $\beta = 0.71$  (Tabla 6-1), el valor  $A$  es una función creciente (ecuación (6.2)) de  $R_I$ , la cual crece más lentamente que la recta  $A = R$  (identidad, en la figura 6-1) como es de esperarse, puesto que esta recta límite indicaría que en cada punto de malla ocupado hay solamente un relámpago.

Es importante notar que la relación descrita por la ecuación (6.1) solamente tiene sentido físico cuando la cantidad de relámpagos es  $R_C \geq \alpha^{1/0.29}$ , este valor  $R_C$  resulta de igualar la recta identidad con la ecuación (6.1).

Ajuste de potencias entre la cantidad de relámpagos y Se en el núcleo interno		
Clúster	R <sup>2</sup>	Potencia
EO	0.9408	0.72
NO	0.9403	0.72
PC	0.9465	0.67
RE	0.9284	0.73
OE	0.9298	0.75
CO	0.9506	0.69
Promedio	0.9394	0.71±0.03

**Tabla 6-1. Ajuste de las relaciones de dispersión de la figura 6-1.**

Considerando el resultado previo y el hecho de que los relámpagos tienden a agruparse en una sola región en el núcleo interno (Corbosiero & Molinari, 2002) semejante a una onda con número de onda 1, se puede pensar que esta región de convección profunda se expande en forma proporcional a la potencia 0.71 de la cantidad de relámpagos por intervalo de tiempo, lo cual es un indicador de la superficie de convección profunda estimada a través de la cantidad de relámpagos, misma que es útil para estimar la superficie ocupada por la convección profunda, en especial cuando la cantidad de relámpagos en un intervalo sea alta.

Finalmente se puede observar que la potencia asociada a cada uno de los clústeres es prácticamente la misma para todos, por lo que se puede considerar que esta relación es intrínseca a todos los CTs independientemente del ambiente en el que se encuentren.

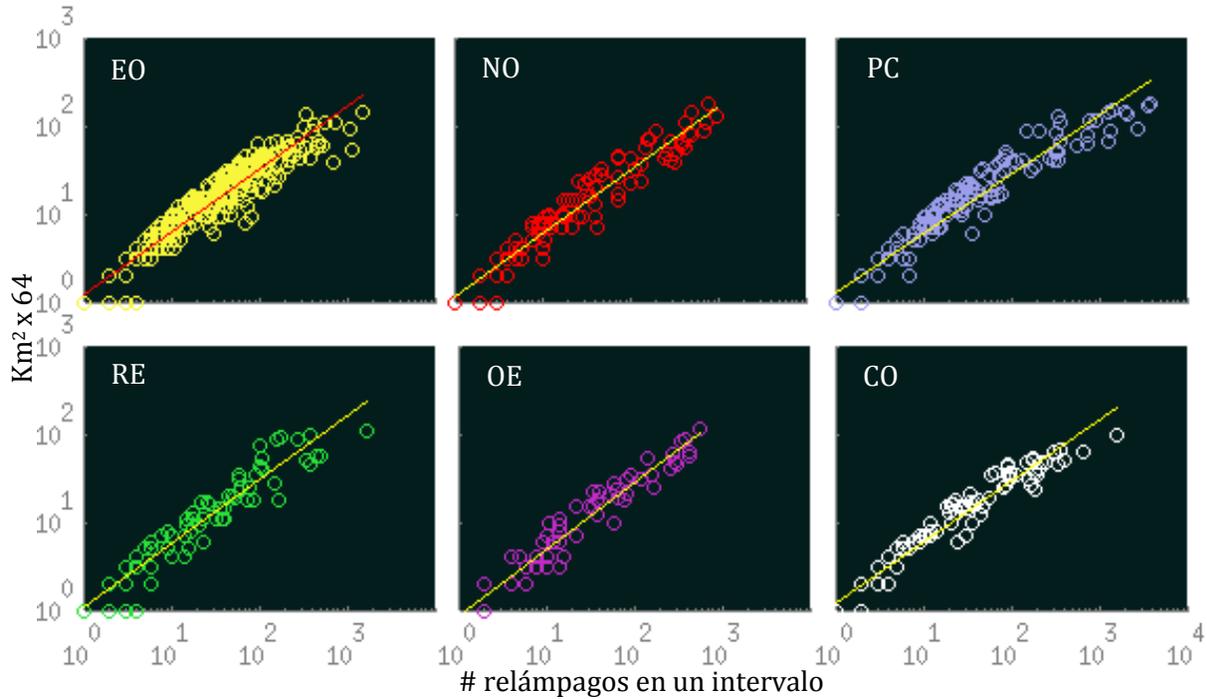


Figura 6-1. Diagrama de dispersión en escala log-log entre la cantidad de relámpagos en el núcleo interior en cada intervalo no nulo y el área ocupada por estos expresada en km<sup>2</sup> en cada clúster. Las líneas rectas muestran el ajuste lineal en esta escala.

### Relación entre la cantidad de relámpagos en cada intervalo y la cantidad de relámpagos máxima en un punto de malla.

Ahora se estudiará la  $R_{m\acute{a}x}$  y la cantidad de relámpagos en un intervalo para establecer alguna ley de potencias entre estas dos variables en forma análoga a la sección anterior.

La Figura 6-1 muestra una relación potencial entre estas dos variables, donde la potencia de esta relación es *casi* independiente del clúster en cuestión (véase Tabla 6-2):

$$R_{m\acute{a}x} = \alpha R^{\beta} \quad (6.3)$$

Esta relación es igual, al menos en su forma funcional que la ecuación (6.1), por lo que se puede analizar el comportamiento de  $F$  (como se define abajo) cuando  $\beta \in [0,1]$  en forma análoga a la sección anterior, lo cual permite conocer la fracción de relámpagos que aporta  $R_{m\acute{a}x}$  dada una cantidad de relámpagos  $R$  a través de la siguiente relación:

$$F = \frac{R_{m\acute{a}x}}{R} = \frac{\alpha R^{\beta}}{R}$$

Así cuando  $\beta = 1$  la fracción de relámpagos que aporta  $R_{m\acute{a}x}$  es constante e independiente de la cantidad de relámpagos en el intervalo y coincide con  $\alpha$ , mismo que es menor a 1, ver Figura 6-1.

Por el contrario, cuando  $\beta \rightarrow 0$ ,  $F$  es inversamente proporcional a  $R$ , lo cual muestra que a mayor cantidad de relámpagos  $R$ , el punto de malla con la menor cantidad de relámpagos

tiende a aportar una fracción cada vez menor del total relámpagos  $R$ , indicando como se difunden los relámpagos en las regiones de convección profunda entre mayor sea la cantidad de relámpagos.

Con ayuda de esta relación, dada una cantidad de relámpagos se puede inferir la intensidad máxima de la convección profunda en el núcleo interno de un CT estimada a partir de la cantidad máxima de relámpagos en un punto de malla, la cual es proporcional a la potencia 0.60 de la cantidad total de relámpagos por intervalo de tiempo. Al mismo tiempo se puede inferir la fracción máxima de relámpagos que puede contener un punto de malla con respecto a la cantidad total de relámpagos en un intervalo de tiempo.

Ajuste de potencias entre la cantidad de relámpagos y  $Se$  en el núcleo interno

Clúster	$R^2$	Potencia
EO	0.8587	0.60
NO	0.8628	0.60
PC	0.8986	0.62
RE	0.8544	0.56
OE	0.8578	0.60
CO	0.9064	0.63
Promedio	0.8731	$0.60 \pm 0.02$

Tabla 6-2. Ajuste de las relaciones de dispersión de la figura 6-2.

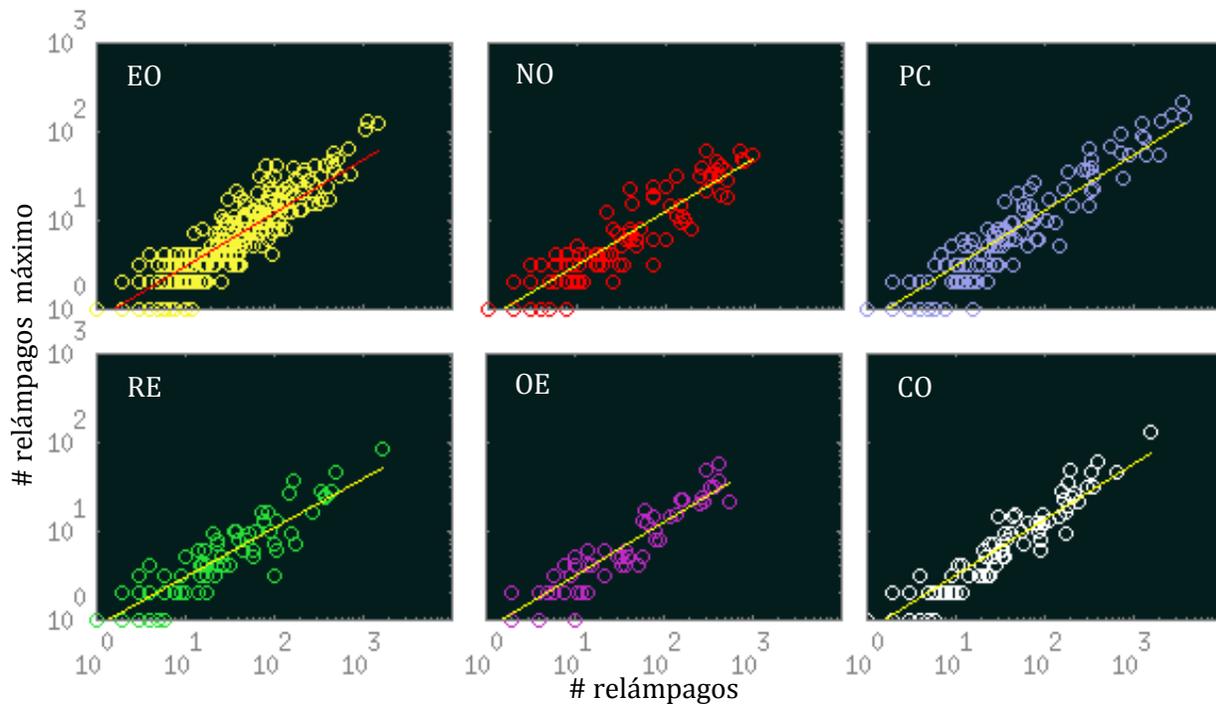


Figura 6-2. Diagrama de dispersión en escala log-log entre la cantidad de relámpagos en el núcleo interior por intervalo no nulo y la cantidad de relámpagos máxima asociada a un punto de malla.

### Utilidad de estas relaciones para determinar las posibles distribuciones de los relámpagos en cada intervalo de tiempo.

Dada una cantidad de relámpagos en el núcleo interior en un  $I_n$  cabe preguntarse como podrían distribuirse sobre dicha región bajo el supuesto que estos siguieran alguna ley probabilística, es decir, cuáles serían las combinaciones en las que se podrían acomodar  $R$  relámpagos sobre una malla de  $N$  puntos, la cual representa al núcleo interior, así por ejemplo si en un intervalo ocurren tres relámpagos, las combinaciones posibles serían las siguientes:

Tres relámpagos en un punto de malla.

Dos relámpagos en un punto de malla y uno en otro

Tres puntos de malla con solamente un relámpago.

A cada una de estas posibilidades se le llamará estado posible, mismo que puede representarse a través de un vector  $\bar{a} = (a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_R)$ , el cual satisface la siguiente relación:

$$R = \sum_{i=1}^R a_i i \quad (6.4)$$

Donde  $R$  es la cantidad de relámpagos que ocurren en un intervalo y  $a_i$  es la cantidad de puntos de malla con  $i$  relámpagos. Además se puede definir el conjunto  $E_R$  como el conjunto de vectores de estado  $\bar{a}$  tales que satisface la ecuación (6.4) para una  $R$  dada.

Se puede observar que para  $R$  grandes conocer y calcular todos los elementos del conjunto  $E_R$ , así como su cardinalidad puede resultar muy complicado. Sin embargo con ayuda de los resultados anteriores se puede disminuir la dimensión del vector de estado puesto que la cantidad máxima de relámpagos en un punto de malla, así como el área ocupada por ellos es una función única de la cantidad de relámpagos en un intervalo, por lo que reescribiendo la ecuación (6.4) considerando las ecuaciones (6.1) y (6.2) se obtiene:

$$\alpha R^{0.7} = \sum_{i=1}^{\beta R^{0.6}} a_i \quad (6.5)$$

$$R = \sum_{i=1}^{\beta R^{0.6}} a_i i \quad (6.6)$$

Donde  $\alpha R^{0.7}$  es el área ocupada por los relámpagos en función de  $R$  y  $\beta R^{0.6}$  es la cantidad máxima de relámpagos por pixel en función de  $R$ . Combinando (6.5) y (6.6) se obtiene:

$$R - \alpha R^{0.7} = \sum_{i=2}^{\beta R^{0.6}} a_i (i - 1) \quad (6.7)$$

Con estas nuevas consideraciones la dimensión del vector de estado se reduce drásticamente, acotando considerablemente los estados  $\bar{a}$  permitidos, es decir, aquellos que satisfacen la ecuación (6.6) para una  $R$  dada, y se puede establecer una región geométrica asociada al plano inducido en la ecuación (6.7) donde los valores  $a_i$  juegan el papel de variables independientes para  $i \geq 2$ , puesto que el valor  $a_1$  se puede calcular si se conocen los otros valores de  $a_i$ .

De esta forma se puede reescribir el conjunto  $E_R$  como sigue:

$$E_R = \{(a_1, \dots, a_i, \dots, a_{R_{max}}) \mid R - \alpha R^{0.7} = \sum_{i=2}^{R_{max}} a_i(i-1), \quad \alpha R^{0.7} = \sum_{i=1}^{R_{max}} a_i, \quad R_{max} = \alpha R^{0.6}\} \quad (6.8)$$

Vale la pena preguntarse si dentro del conjunto  $E_R$  existen estados preferenciales que ocurran con mayor frecuencia que otros. Responder esta pregunta permitiría conocer la aleatoriedad con que se distribuyen los relámpagos en el núcleo interno en cada  $I_n$  sujeta a las restricciones empíricas encontradas, o bien tal vez pueda ocurrir que ciertos estados puedan estar asociados a la intensificación, o a la disipación de un CT, por lo que el estudio de estos estados posibles. Sin embargo la respuesta a esta pregunta se encuentra fuera de los objetivos y alcances de este trabajo puesto que no se cuenta con una muestra lo suficiente grande de estados  $\bar{a}$  asociados a un valor dado de  $R$  y de esta forma intentar estudiar cuales son los estados  $\bar{a}$  más frecuentes.

Finalmente se puede concluir lo siguiente en el núcleo interno de cada CT:

- Para cada  $I_n$ , la cantidad máxima de relámpagos que puede haber en un punto de malla depende únicamente de la cantidad de relámpagos en el núcleo interno.
- Para cada  $I_n$ , la cantidad de puntos de malla con al menos un relámpago depende únicamente de la cantidad de relámpagos en el núcleo interno, en otras palabras  $\rho_e = \rho_e(R_I)$ .
- Estas dos relaciones permiten conocer un conjunto  $E_R$  de estados posibles de la distribución de los relámpagos el cual corresponde geométricamente a un plano en el espacio de estados  $\bar{a}$ .
- Estas relaciones empíricas son intrínsecas a los CTs y no dependen del ambiente en el que se encuentren estos.
- En estos momentos no es posible dar alguna explicación física del porqué de estas relaciones, o bien, afirmar si estas relaciones son productos artificiales resultantes de la elección del tamaño de la malla y de la eficiencia de detección de la WWLLN, por lo que se requiere hacer más estudios para verificar estas relaciones empíricas.

## CAPÍTULO 7

### **RELACIONES ENTRE LA CANTIDAD DE RELÁMPAGOS Y LA INTENSIDAD DE UN CICLÓN TROPICAL**

Dado el potencial de los relámpagos como pronosticadores de la intensidad (como se ha expuesto en el capítulo anterior) y el aparente fracaso para encontrar una nueva variable que permita relacionar esta nueva variable con la intensidad, como se trató en el capítulo anterior resulta necesario volver a estudiar la relación directa entre la cantidad de relámpagos en los intervalos no nulos y la intensidad, así como la intensificación de nuevas formas.

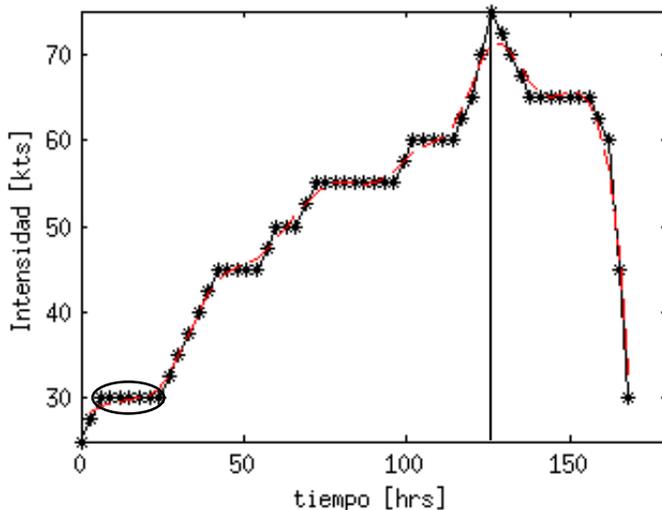
En este punto es necesario recordar que uno de los principales obstáculos para estudiar la relación entre estas dos variables es la incertidumbre asociada a la intensidad (Landsea & Franklin, 2013), la cual puede alcanzar valores de hasta el 50% del valor de la intensidad, incluso en la base de datos Best-Track, misma que se puede considerar como la mejor estimación de la intensidad de un CT. Esta incertidumbre así mismo se ve reflejada en el cambio de la intensidad en el tiempo (intensificación). Bajo estas circunstancias resulta complicado establecer una relación entre estas variables, por lo que los valores de la intensidad de esta base de datos deben ser interpretados cuidadosamente.

En este trabajo se propone interpretar los valores de la intensidad no como valores aislados y absolutos, sino como valores relacionados entre sí, los cuales representan la tendencia del CT a intensificarse, o bien a disiparse.

Esta interpretación de la intensidad puede ilustrarse con el caso de la serie de tiempo de Henriette (2007) en la Figura 7-1, donde los datos interpolados linealmente del Best-Track en intervalos de tres horas se muestran con asteriscos. Si se considera cada uno de estos puntos como datos reales, la región a la izquierda de la línea vertical de dicha serie de tiempo podría interpretarse como periodos largos de intensificación separados por periodos donde la intensidad no cambia en absoluto (como lo muestra el óvalo en la esquina inferior izquierda).

Considerando los valores de la intensidad del best-Track como absolutos la región encerrada en un óvalo de figura 7-1 sería interpretada como un periodo donde la intensidad de Henriette se mantuvo constante por largo tiempo. Sin embargo, cuando se considera la

incertidumbre asociada a cada punto de la serie resulta natural pensar que Henriette durante este tiempo no mantuvo su intensidad constante sino que sufrió un proceso en el cual el cambio en la intensidad, si bien no fue cero, fue pequeño, como la línea punteada roja sugiere al tener una pendiente pequeña, contemplando una primera aproximación subjetiva que incorpore la incertidumbre de la intensidad.



**Figura 7-1. Serie de tiempo de la intensidad de Henriette. Los asteriscos negros muestran los valores de la intensidad obtenidos del Best-Track. La línea roja punteada muestra la misma serie de tiempo pero suavizada. La línea vertical indica el tiempo en el Henriette comenzó a disiparse.**

De esta forma, la línea roja representa intuitivamente la serie de tiempo de la intensidad si hubiéramos considerado la incertidumbre de esta en el sentido de que los periodos largos donde la variación de la intensidad es constante, realmente representan periodos donde los cambios en la intensidad son pequeños.

Si bien, esbozar la línea roja que incorpora la incertidumbre de la intensidad, al menos en una forma cualitativa puede realizarse en forma manual resulta conveniente emplear un método numérico con el propósito de poder aplicarlo sobre todos los

CTs de cada clúster y poder hacer cálculos con los valores que incorporen la incertidumbre.

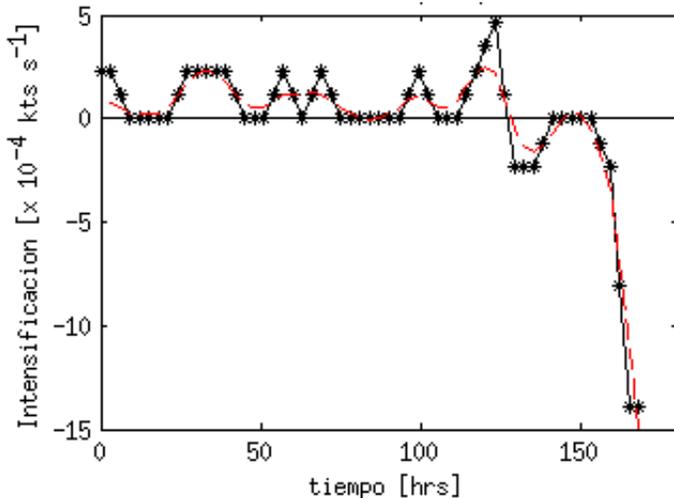
Con este propósito, se empleará el método Singular Spectrum Analysis (SSA), el cual, entre otros propósitos, resulta útil para identificar la tendencia en una serie de tiempo, separándola en diferentes componentes asociadas a tendencias o a ruido de fondo (Ghil, y otros, 2002). Desde el punto de vista de este método se puede considerar a la tendencia de la serie como los valores que mejor representan, en un sentido físico, la intensidad de un CT en cada intervalo, mientras que las componentes restantes pueden interpretarse como la incertidumbre de la intensidad.

De esta forma la técnica SSA permite concebir una aproximación cuantitativa de la idea intuitiva que resulta de incorporar la incertidumbre de los datos de intensidad del Best-Track a través de un análisis, si bien numérico, conlleva una componente cualitativa y subjetiva.

Este ajuste de la intensidad resultará particularmente útil cuando se requiera calcular la intensificación (derivada temporal de la intensidad), y de esta forma en situaciones análogas a las que ocurren en el óvalo de la Figura 7-1 se obtendrán periodos de baja intensificación, más no periodos donde la intensidad permanece constante, lo que ayuda a distinguir periodos de intensificación (región izquierda de la línea vertical en la figura 7-1) de periodos de disipación (región derecha de la línea vertical), puesto que la derivada de la intensidad solamente

cambiará de signo cuando el CT en cuestión sufra de algún proceso de disipación y resultará en una mejor distinción de los intervalos de intensificación de disipación.

En la Figura 7-2 se muestra la derivada numérica de la Figura 7-1 empleando un punto central y un paso hacia adelante y otro hacia atrás. La intensificación que resulta si no se considera la incertidumbre (línea negra con asteriscos) resulta muy picuda en comparación con la que resulta de incorporar la incertidumbre empleando el método SSA (línea punteada roja).



**Figura 7-2. Serie de tiempo de la intensificación de Henriette. Los asteriscos negros muestran la derivada empleando datos directos del Best-Track. La línea roja punteada muestra la intensificación suavizada.**

La nueva estimación de los datos de intensidad en todos los CTs es la que se empleará a lo largo de este trabajo y permitirá comprender mejor los resultados que arrojen los análisis que se harán a continuación.

Con este ejemplo se pretende mostrar un método que represente mejor la intensidad incorporando la incertidumbre asociada a esta y que represente en un mejor sentido físico los cambios asociados a la intensidad.

El primer análisis que permitirá estudiar la relación entre la actividad eléctrica y la intensificación es considerar la fracción de intervalos con una intensificación dada presentan actividad eléctrica, en otros términos, ¿dado el conjunto de intervalos con un valor de intensificación que fracción de estos intervalos son intervalos no nulos?

La respuesta a esta pregunta permite discernir si los intervalos no nulos se agrupan en diversos intervalos de intensificación (disipación o intensificación negativa) y evaluar la probabilidad que un intervalo con un valor de intensificación dado de ser un intervalo no nulo. Además, permite conocer la distribución de la intensificación (disipación) en los CTs para cada clúster.

De esta forma se elaborarán dos histograma por clúster, uno de la frecuencia de la intensificación (disipación) en todos los intervalos de todos los CTs del clúster y otro, de la frecuencia de la intensificación (disipación) restringida únicamente a los intervalos no nulos de todos los CTs del clúster, este histograma proporcionará información que permita identificar que fracción de intervalos presentan relámpagos para un valor de intensificación dado considerando la frecuencia de un valor de intensificación dado con respecto a todos los valores de intensificación.

Ambos histogramas comparten el mismo conjunto de clases, las cuales estarán centradas en múltiplos enteros de  $0.1 \times 10^{-3} \text{ kts s}^{-1}$  (incluyendo el cero) y tendrán un espesor de  $0.1 \times 10^{-3} \text{ kts s}^{-1}$ , los valores centrales estarán comprendidas en el intervalo  $[-0.8, 0.8] \times 10^{-3} \text{ kts s}^{-1}$  y los valores que se encuentren fuera de alguna clase serán consideradas como

elementos de las clases extremas. Finalmente se mostrará en un eje vertical secundario la fracción de intervalos no nulos de cada clase con el propósito de estimar la probabilidad de que se presenten relámpagos para los valores pertenecientes a una clase.

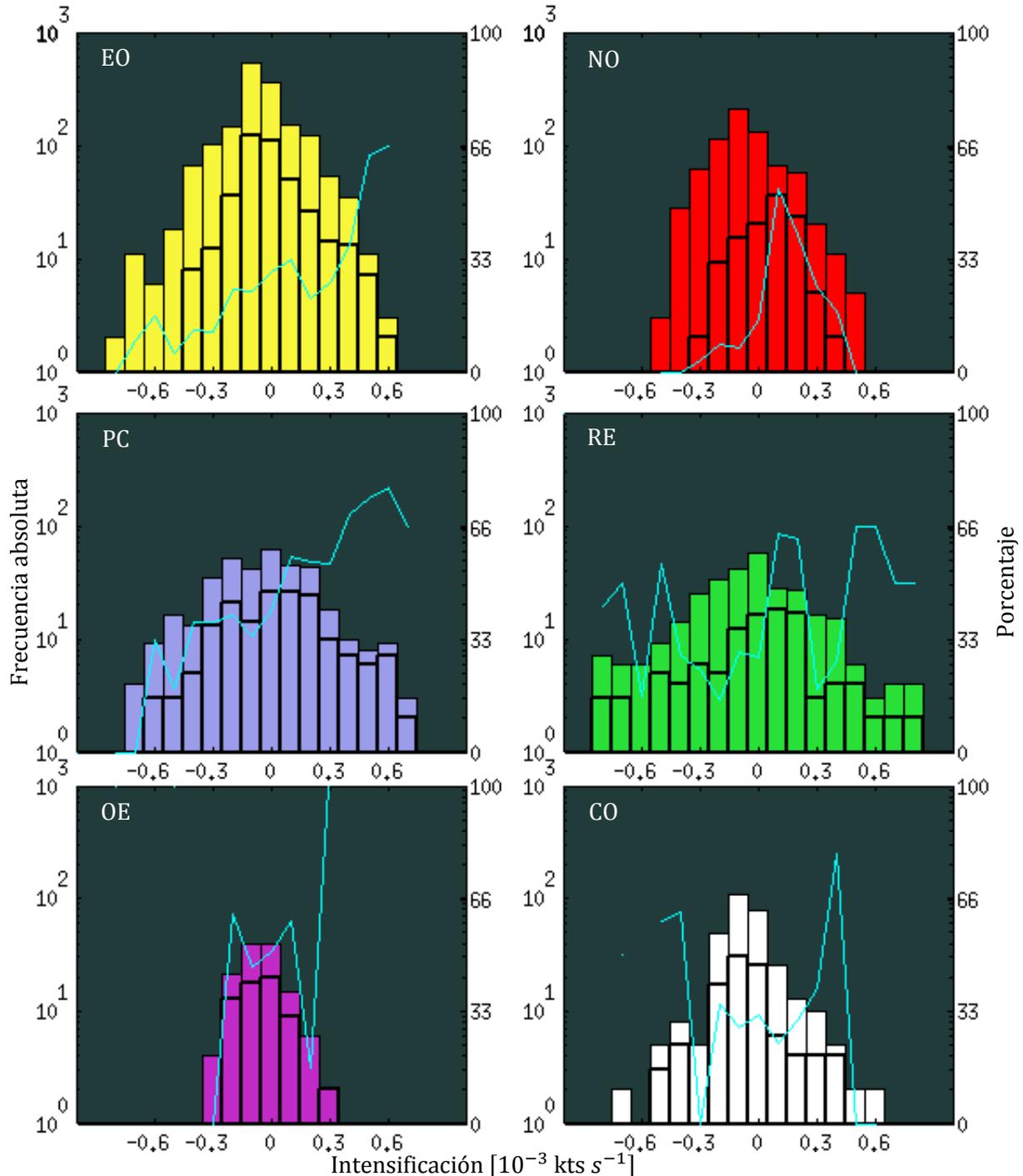


Figura 7-3. Histograma de intensificación para todos los intervalos en cada clúster e histograma de intensificación de intervalos no nulos (con borde más grueso, dentro del otro histograma), la escala vertical de los histogramas se encuentra a la izquierda. La línea cian muestra el porcentaje de intervalos no nulos con respecto a la cantidad de intervalos totales para cada clase, con escala vertical a la derecha. Las clases se encuentran centradas cada  $0.1 \times 10^{-3}$  kts  $s^{-1}$  en el intervalo  $[-0.8, 0.8]$  y tienen un espesor de  $0.1 \times 10^{-3}$  kts  $s^{-1}$ .

La figura 7-3 muestra los histogramas de intensificación de cada clúster, en estos se puede observar que los intervalos de intensificación (disipación) extrema ( $\geq |0.5 \times 10^{-3} \text{ kts s}^{-1}|$ ) representan una pequeña fracción del total de los intervalos en todos los clústeres en donde se presentan estos eventos (EO, PC, RE y CO), lo cual indica la baja probabilidad de estos eventos extremos tanto de intensificación como de disipación en una forma simétrica, entendiéndose por esto que los casos de intensificación extrema son aproximadamente igual de probables que los de disipación extrema en cada clúster.

Sin embargo, es interesante notar que en el caso de los clústeres EO y PC, mismos que en conjunto representan el 54.1% de los CTs de la muestra, el histograma de intensidades restringido a los intervalos no nulos muestra un comportamiento totalmente asimétrico mostrando que los eventos de disipación son menos propensos a estar acompañados de relámpagos en contraposición de los eventos de intensificación, observándose una tendencia que indica que a mayor intensificación, mayor es la probabilidad de que se formen relámpagos. En particular se puede distinguir a los eventos de intensificación extrema, los cuales, en el caso del clúster PC es muy probable que se encuentren acompañados de relámpagos, y en caso contrario para ambos clústeres los eventos de disipación extrema, tienden a no formar relámpagos.

En el caso del clúster RE, si bien se manifiesta esta tendencia, esta se exhibe en menor grado, esto puede deberse a que los CTs de este clúster cuando recurvan se aceleran generalmente disipándose y tocan tierra, incluso se podría decir que colisionan con la Sierra Madre Occidental, misma que alcanza alturas de varios kilómetros, forzando a las parcelas de los niveles inferiores a ascender pudiendo vigorizar la convección cuando tocan tierra.

Mientras que en el caso del clúster NO, el cual no presenta eventos extremos de intensificación, muestra un comportamiento semejante a los clústeres EO y PC en los eventos de intensificación o disipación baja ( $\leq |0.3 \times 10^{-3} \text{ kts s}^{-1}|$ ).

El clúster OE puede sugerir el mismo comportamiento observado en los clústeres EO y PC si se observan únicamente las clases extremas de los histogramas. Sin embargo, hay muy pocos intervalos en estos histogramas como para poder afirmar que ocurre este comportamiento. Por el contrario si se consideran únicamente los intervalos de intensificación (disipación) baja resulta que los intervalos no nulos se encuentran distribuidos uniformemente.

El clúster CO no muestra una tendencia evidente, pero si dos picos simétricos para eventos de intensificación igual a  $|0.4 \times 10^{-3} \text{ kts s}^{-1}|$ .

El hecho de que los intervalos de intensificación y disipación se distribuyan aproximadamente en forma simétrica en los clústeres EO, PC y RE, y que los intervalos de intensificación estén más frecuentemente acompañados de relámpagos que los intervalos de disipación robustece la afirmación de que los CTs tienden a producir relámpagos mientras estos se intensifican.

Si consideramos que los CTs del clúster EO representan el caso típico de un CT en el PNO y que la dinámica interna a estos CTs es tal que inhibe la producción de relámpagos mientras estos se disipan y la fomenta mientras estos se intensifican, se puede partir de esta situación

para explicar las diferencias de los histogramas de los otros clústeres con respecto al clúster EO, los cuales se pueden considerar como un estado base, donde los otros clústeres son perturbaciones de este estado base inducidas por el ambiente en el cual están inmersos.

Así, el caso de los CTs del clúster PC, la principal diferencia con los del clúster EO radica en su cercanía con tierra, se encuentran en aguas más cálidas y a un posible incremento en la cantidad de aerosoles en la atmósfera circundante. Estas diferencias, principalmente una alta SST permiten que los CTs se encuentren en un ambiente con mayor disponibilidad energética (disponible a través de la liberación del calor latente del vapor de agua cuando se condensa) y aunado a una mayor concentración de aerosoles, asumiendo válida la hipótesis de Khain (2010), pueden formar ambientes que propicien la convección profunda y la producción de relámpagos, estas diferencias pueden explicar el porqué de la forma casi lineal de la línea cian del clúster PC comparada con la curva cian semejante a una parábola del clúster EO mostrada en la figura 7-3.

Siguiendo este tipo de argumentos, se puede intentar explicar la diferencia del clúster RE con respecto al estado base del clúster EO, siendo la diferencia principal entre estos dos clústeres el proceso de recurvatura que sufren los CTs del clúster RE. Este proceso de recurvatura generalmente acelera a los CTs, hace que cambien de dirección abruptamente y comiencen a disiparse. Si uno compara las curvas cian de la figura 7-3 de estos dos clústeres se puede observar que la principal diferencia radica en la región de disipación extrema, donde el clúster RE muestra que los eventos de disipación extrema generalmente se encuentran acompañados de relámpagos, esto puede ser debido a la orografía de la región donde tocan tierra, como se discutió en párrafos anteriores.

Si se acepta este argumento como válido, surge la siguiente pregunta ¿Por qué los CTs del clúster PC no muestran este comportamiento en los intervalos de disipación, en especial los que tocan tierra? Una posible respuesta consiste en que la orografía de la península de Baja California es mucho menos elevada que en la Sierra Madre Oriental, alcanzando en promedio unos 600 msnm evitando que la convección profunda se fomente debido al forzamiento orográfico, además la Sierra Madre Occidental en Sonora se encuentra retirada de la costa, con respecto a la porción de la Sierra en Sinaloa y posee una pendiente más pequeña que esta.

Otra posible respuesta subyace en el mismo proceso de recurvamiento el cual va acompañado de la disminución en la intensidad, de los CTs del clúster RE, el cual consiste en la interacción entre el CT y sistemas de latitud media y posteriormente son advectados por estos sistemas de latitud media (Lugo, 2011). Al interactuar con estos sistemas es probable que se haya ingesta de humedad hacia el interior del núcleo tropical, sin embargo probar esta hipótesis de ingesta de humedad exterior requiere de análisis más detallados, los cuales se podrían realizar siguiendo el método empleado por Rutherford y Montgomery (2012).

Respecto al clúster NO, tratar de explicar la razón por la cual este clúster presenta el mismo comportamiento que los otros clústeres pero únicamente cuando para eventos de intensificación baja puede explicarse si se considera el gradiente en la SST más intenso que experimentan estos en comparación con los CTs del clúster EO, puesto que un enfriamiento

relativamente rápido de la atmósfera debido a la migración meridional de los CTs de este clúster puede saturar repentinamente el aire húmedo, vigorizando los procesos de convección profunda conllevando a la producción de relámpagos, o bien debido a la intrusión de aire seco de la región más meridional del PNO, la cual puede inhibir la convección.

Respecto a los clústeres OE y CO explicar la fracción de intervalos no nulos con respecto al total de intervalos por cada valor de intensificación resulta complicado por las siguientes razones:

- El clúster OE presenta muy pocos intervalos como para que puedan ser tratados estadísticamente,
- mientras que los CTs del clúster CO no tienen un ambiente bien definido como las otras categorías, sin embargo permite mostrar la variabilidad individual de diversos CTs.

Si bien, la figura 7-3 y su análisis muestra que en general (clústeres EO y PC y en menor medida NO y RE) los eventos de intensificación extrema van acompañados de actividad eléctrica (alrededor del 66% de los casos) en el núcleo interno no se ha discutido si existen condiciones asociadas a los relámpagos que permitan distinguir intervalos de intensificación o disipación, lo cual permitiría obtener un pronóstico de la intensidad en el corto plazo. Nótese que en caso de que no ocurran relámpagos en un intervalo no se puede inferir cambio alguno en la intensidad.

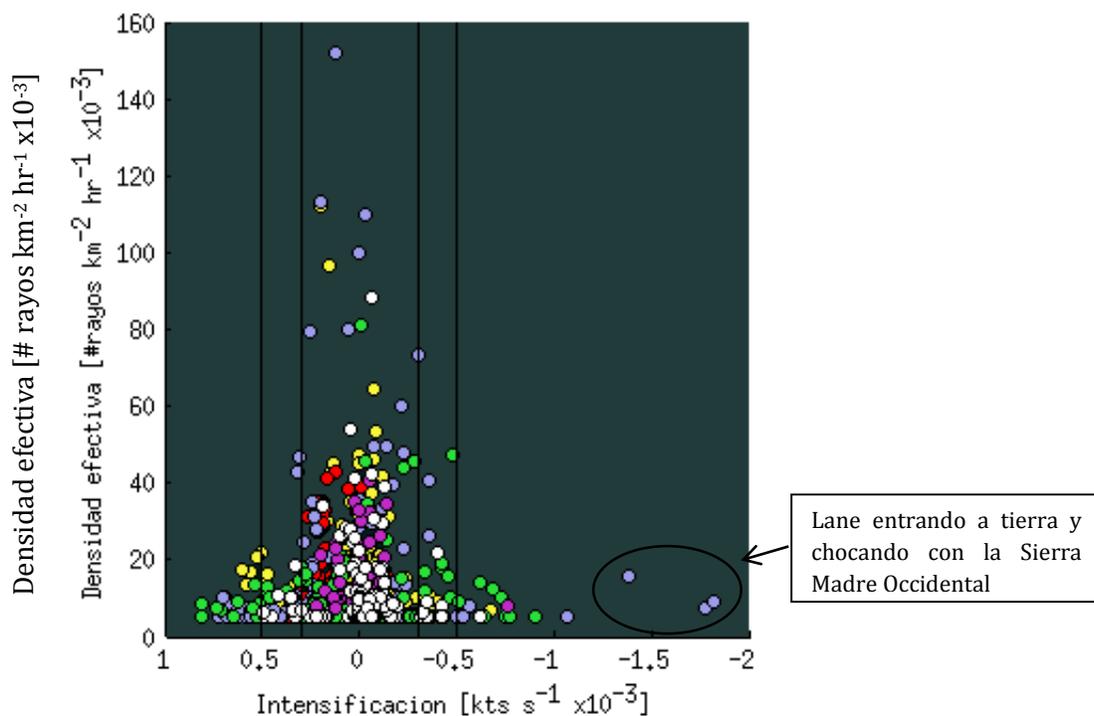


Figura 7-4. Diagrama de dispersión entre  $\rho_e$  y la intensificación para todos los clústeres, mismos que tienen el mismo código de colores que en la figura 7-3. Las líneas verticales se muestran a los  $[0.3]$  y  $[0.5]$   $\text{kts s}^{-1} \times 10^{-3}$  para marcar la región de extrema intensificación (disipación) y la región de baja intensificación (disipación).

La forma más sencilla de evaluar esta posible relación resulta un diagrama de dispersión entre la  $\rho_e$ , la cual puede considerarse como una función monótona creciente que depende únicamente de la cantidad de relámpagos en el núcleo interno, y la intensificación en cada intervalo de tiempo.

La figura 7-4 muestra un comportamiento general para todos los clústeres en el cual los valores altos de  $\rho_e$  se encuentran asociados a valores bajos de intensificación (disipación) con una ligera preferencia de valores altos de  $\rho_e$  hacia la intensificación. Por el contrario, para valores de intensificación (disipación) extrema los valores de  $\rho_e$  son bajos. Una primera inspección visual de la figura 7-4 sugiere que todos los clústeres se comportan de la misma forma indicando que este comportamiento es intrínseco a la dinámica de todos los CTs.

Considerando los puntos del clúster PC de la Figura 7-4, puede observarse que la proximidad a tierra juega un papel decisivo para la producción de relámpagos, puesto que los CTs del clúster PC alcanzan los valores de  $\rho_e$  más altos, por el contrario, la lejanía del CT con la costa tiende a inhibir la producción de relámpagos, mismo que se observa en los bajos valores de  $\rho_e$  en los clústeres EO y NO, para todos los valores de intensificación.

El hecho de que de los valores más altos de  $\rho_e$ , mismos que pueden considerarse equivalentes a la cantidad de relámpagos, se encuentre relacionada con eventos de baja intensificación muestra concordancia con las observaciones de diversos autores, los cuales indican que la cantidad máxima de relámpagos puede estar relacionada con los periodos de intensidad máxima en los CTs, la cual en términos de la intensificación corresponde a periodos de nula intensificación.

La dinámica de un CT se puede esbozar crudamente a través de la evolución temporal de su intensidad, la cual consiste esencialmente de dos fases, la primera fase es la intensificación del CT y la segunda fase es la disipación hasta la desaparición del sistema. Considerando a la intensificación como la derivada temporal es fácil notar que la intensidad máxima que alcanza un CT tiene una intensificación nula, de esta forma la figura 7-4 concuerda, al menos en el sentido estadístico, de que la cantidad máxima de relámpagos se encuentra asociada a periodos de máxima intensidad, aunque también a periodos donde la intensidad casi no varíe, como puntos de inflexión, los cuales si bien no son los intervalos de máxima intensidad son intervalos donde los cambios en la intensidad se minimizan.

Además, la figura 7-4 sugiere que las regiones de convección profunda tienden a ocupar una mayor área del núcleo interno, puesto que el área ocupada por los relámpagos depende exclusivamente de la cantidad de relámpagos en el núcleo interno, ecuación (6.1), siempre y cuando el CT tenga pocas variaciones en su intensidad (Figura 7-4), esto indica que los CTs que no se intensifican son ambientes propicios para formar grandes regiones de convección profunda en el núcleo interno.

Conjuntando la información que se puede extraer de las figuras 7-3 y 7-4 se puede decir lo siguiente:

- Si bien, es poco probable que los CTs produzcan relámpagos cuando estos no se intensifican, esta situación permite la posibilidad de expandir las regiones de convección profunda debido a que los CTs producen más relámpagos (el área de convección profunda se expande), lo cual se puede interpretar como una condición necesaria mas no suficiente para que se incremente la cantidad de relámpagos y como una desorganización de las celdas de convección profunda, las cuales pueden formarse en cualquier región del núcleo interno.
- Por el contrario cuando un CT se encuentra intensificando es probable que forme una pequeña región de convección profunda y entre más se intensifique las probabilidades de formar una pequeña región de convección profunda aumentan, posiblemente se deba a que la convección se organice de tal forma que siempre se generen regiones pequeñas de convección profunda, las cuales produzcan relámpagos.
- Sin embargo, si el CT comienza a disiparse, la convección profunda tiende a disminuir de tal forma que entre mayor sea la disipación la convección profunda tiende a minimizarse.
- Las condiciones ambientales juegan un papel fundamental, las cuales fomentan o inhiben la convección profunda, entre estas se encuentran, la cercanía a tierra y la orografía.

De estas observaciones se pueden obtener conclusiones útiles que permiten conocer cualitativamente la dinámica de la convección profunda en los CTs en términos de la intensificación, sin embargo vale la pena preguntarse si la intensidad en un intervalo de tiempo es un factor que influye en la producción de relámpagos. Esto permitirá conocer su influencia sobre la producción de relámpagos y distinguir posibles comportamientos asociados a intensidad e intensificación, así por ejemplo se podría distinguir a un CT categoría 5 de uno con categoría 1 que se estén intensificando, en un ambiente característico, es decir, asociado a un clúster.

Para evaluar esta relación se puede realizar un estudio semejante al que se hizo con la intensificación, consistiendo de los mismos histogramas y diagramas de dispersión, solo que en lugar de la intensificación la intensidad.

La Figura 7-5 muestra los histogramas de la intensidad en cada intervalo, así como de la intensidad restringida a los intervalos no nulos de cada clúster y muestran que la relación entre la intensidad y la presencia de relámpagos en el núcleo interno varía a lo largo de cada clúster.

Así, los clústeres que se encuentran lejos de tierra (EO y NO) no muestran una relación entre la presencia de relámpagos y su intensidad, esto se puede observar fácilmente en la línea cian, por lo que la intensidad de un CT perteneciente a estos clústeres no sirve para conocer algo acerca de la presencia de relámpagos. Sin embargo, los clústeres que se encuentran cerca de tierra (PC y RE principalmente) muestran que entre más intenso sea el CT es más probable encontrar relámpagos.

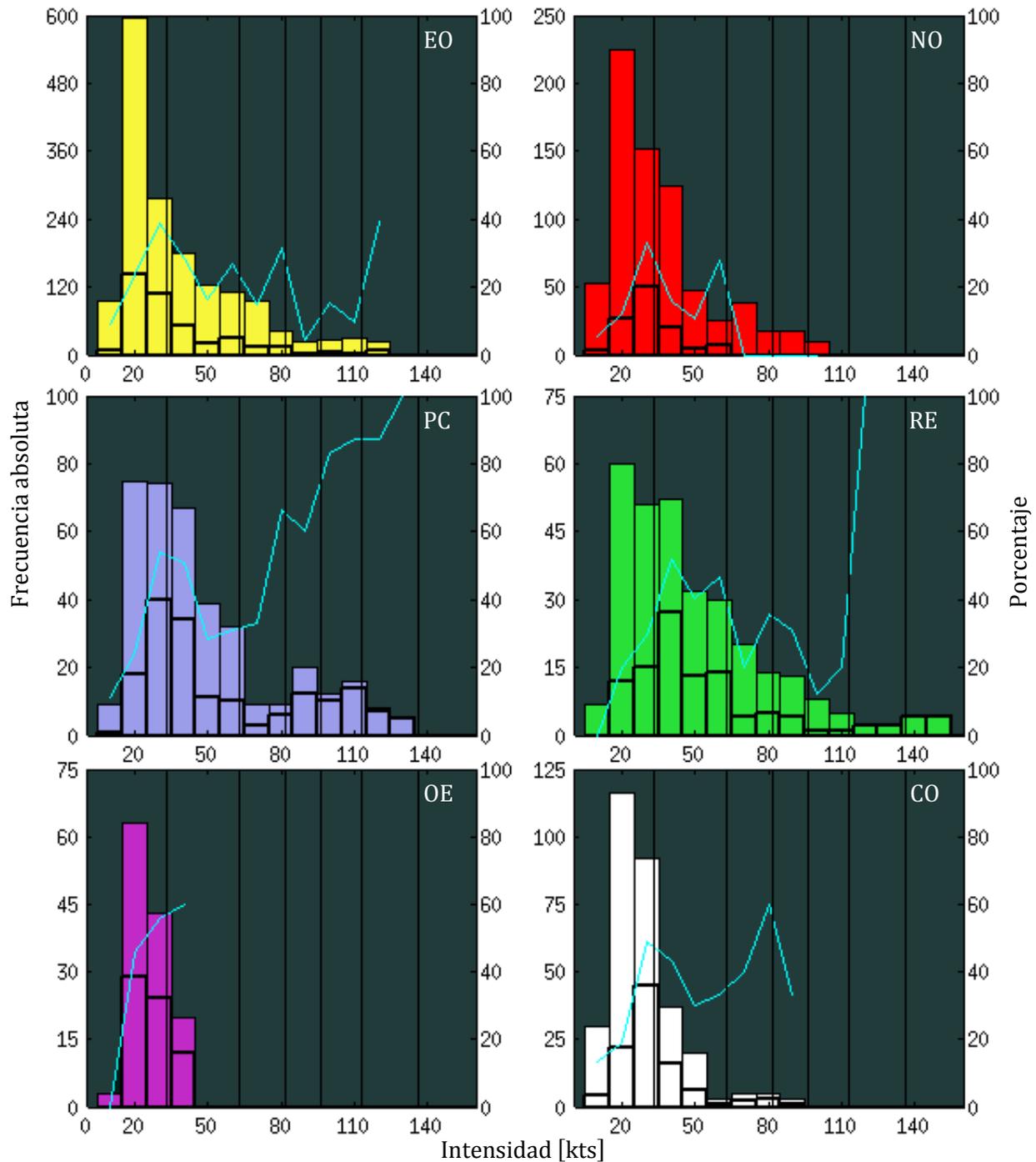


Figura 7-5. Histograma de la intensidad para todos los intervalos en cada clúster e histograma de intensificación de intervalos no nulos (con borde más grueso), la escala vertical de cada histograma se encuentra a la izquierda. La línea cian muestra el porcentaje de intervalos no nulos con respecto a la cantidad de intervalos totales para cada clase, con escala vertical a la derecha. Las clases se encuentran centradas cada 10 kts en el intervalo [0,160] kts y tienen un espesor de 10 kts. Las líneas verticales indican la categoría en la escala Saffir-Simpson de cada clase.

Es interesante notar que todos los intervalos de los clústeres RE y PC con intensidad mayor a 110 kts, correspondientes a Huracanes categoría 4 siempre se encuentran acompañados de

relámpagos, a pesar de que intervalos con esta intensidad sean muy escasos en comparación con intervalos con intensidades inferiores.

Respecto al clúster OE se observa un comportamiento similar a los clústeres PC y RE, sin embargo, este clúster contiene muy pocos intervalos con respecto a los otros, lo cual se puede interpretar como una poca variación de la relación entre la presencia de relámpagos y la intensidad en CTs individuales.

El clúster CO, al igual que el clúster EO no muestra una relación entre la intensidad y la presencia de relámpagos, sin embargo hay una pequeña diferencia entre la línea cian del clúster EO con la del CO, la cual consiste en que la línea cian del clúster EO se encuentra más abajo que la del clúster CO.

En general, las líneas cian (Figura 7-5) muestran que los clústeres cercanos a tierra tienen más probabilidades de desarrollar convección profunda, en especial cuando los CTs tienen una intensidad mayor a 110 kts, indicando que un CT con una intensidad mayor 110 kts y cercano a la costa (aproximadamente 400 km o menos) forma un ambiente propicio para desarrollar regiones de convección profunda y garantizar la producción de relámpagos, sin embargo los CTs lejos de la costa no disponen de los elementos externos como los aerosoles, los cuales fomentan la convección profunda en el CT.

En el otro extremo, cuando los CTs tienen intensidades bajas, aproximadamente de 30 kts, los clústeres EO, NO y RE, muestran que el cociente entre intervalos no nulos e intervalos totales es aproximadamente del 35%, mientras que el clúster PC tiene una relación del 56%, esta diferencia puede explicarse también empleando argumentos que dependan de la cercanía a tierra, puesto que los CTs del clúster PC siempre se encuentran a menos de 400 km de la costa y en agua cálidas, mientras que los CTs de los otros clústeres generalmente se encuentran a más de 400 km (Figura 4-5) y en aguas relativamente más frías con respecto al clúster PC.

Considerando válido este último razonamiento, y aunado a que los CTs del clúster RE se encuentran más lejos de la costa que los del clúster PC, pero no tanto como los del clúster EO, lo cual puede interpretarse como un encarecimiento gradual de la cantidad de aerosoles conforme uno se aleja de la costa, y que los CTs del clúster RE se encuentren en aguas relativamente más frías que los CTs del clúster PC, las figuras 4-6, 4-5 y 4-3 y la tabla 4-2 sustentan cualitativamente este razonamiento. Por lo que se deduce que entre más intenso sea un CT este tienda a formar un ambiente más propicio para la convección profunda, puesto que a pesar de la diferencia entre la SST y la diferencia de distancia a tierra entre los CTs de los clústeres PC y RE estos **siempre** producen relámpagos cuando alcanzan intensidades mayores a los 110 kts.

Como se ha observado, los intervalos con intensidades mayores a 110 kts de los clústeres PC y RE siempre se encuentran acompañados de relámpagos, pero no se ha discutido acerca de la relación entre la  $\rho_e$  y la intensidad. En este sentido la Figura 7-6 permite visualizar esta posible relación, la cual muestra que los intervalos más intensos tienen valores bajos de  $\rho_e$  independientemente del clúster que sea, también se puede observar que entre los 30 y 60 kts

la  $\rho_e$  alcanza su máximo, independientemente del clúster que sea, sin embargo los clústeres PC y RE (los cuales son los más cercanos a tierra) alcanzan máximos superiores que los otros clústeres.

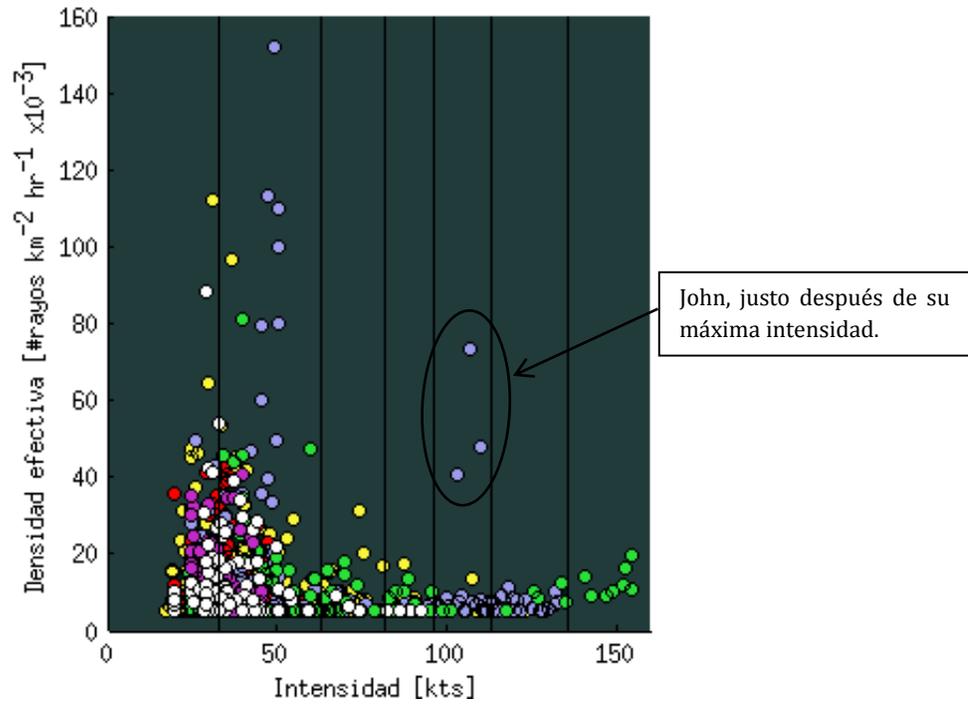


Figura 7-6. Diagrama de dispersión entre la  $\rho_e$  y la intensidad para todos los clústeres, mismos que tienen el mismo código de colores que en la figura 7-5. Las líneas verticales indican la categoría en la escala Saffir-Simpson.

Conjuntando la información obtenida de las figuras 7-3 a 7-6 se puede concluir lo siguiente:

Los procesos de intensificación extrema tienden a formar relámpagos en el núcleo interno, por el contrario los intervalos de disipación inhiben la producción de relámpagos, exceptuando las situaciones donde la orografía juega un papel importante en estos procesos.

Así también, gradientes negativos e intensos en la SST en conjunto con un proceso de intensificación puede incrementar las posibilidades de presencia de relámpagos, el cual es el caso del clúster NO. Además, los intervalos con intensidades mayores a 110 kts, de CTs que se encuentran lo *suficientemente cerca* de tierra siempre forman relámpagos.

En el caso de los CTs que se encuentran lo *suficientemente cerca* de tierra, la probabilidad de observar relámpagos en el núcleo interno es una función creciente tanto de la intensidad como del cambio de la intensidad con respecto al tiempo; por otro lado, la cantidad de relámpagos es una función que alcanza su máximo en intervalos de intensificación (disipación) baja, ligeramente sesgada hacia los intervalos de intensificación, disminuyendo hacia los intervalos de intensificación (disipación) extrema, también las posibilidades de alcanzar valores máximos en la  $\rho_e$  se incrementan cuando la intensidad en un intervalo tiene valores de entre 25 y 50 kts, misma que se decrece, al incrementarse la intensidad.

En el caso de los CTs que se encuentran lo *suficientemente lejos* de tierra, la probabilidad de observar relámpagos en el núcleo interno, es una función creciente del cambio de la intensidad con respecto al tiempo; por otro lado la  $\rho_e$  puede alcanzar su máximo en intervalos de intensificación (disipación) baja, y se encuentra ligeramente sesgada hacia los intervalos de intensificación, disminuyendo hacia los intervalos de intensificación (disipación) extrema, también es una función que depende de la intensidad y alcanza su máximo cuando la intensidad en un intervalo tiene valores de entre 25 y 50 kts.

Estas observaciones muestran en general, que al incrementar la intensidad un CT, este tiende a formar ambientes propicios para generar convección profunda muy localizada, en el sentido de que esta produce cantidades mínimas de relámpagos y aumentan la probabilidades de observar relámpagos, lo cual ocurre en el clúster PC y se observa que para intensidades altas los CTs del clúster RE se comportan en la misma forma que el clúster PC no observándose una tendencia para intensidades bajas.

Los procesos de intensificación minimizan la cantidad de relámpagos, pero incrementan las probabilidades de formar regiones localizadas de convección profunda. En contraste con la intensificación, la disipación tiende a inhibir la producción de relámpagos, sin embargo en todos los clústeres se observó que la  $\rho_e$  de relámpagos puede alcanzar valores máximos cuando el CT experimenta un proceso de intensificación baja.

Este conjunto de observaciones permite identificar que los CTs con categoría de tormenta tropical que se encuentran en un proceso de baja intensificación son los que pueden producir grandes cantidades de relámpagos. Mientras que los CTs más intensos y *cerca* de la costa *siempre* producen pocos relámpagos, independientemente de si se encuentren disipándose o intensificándose.

## CAPÍTULO 8

### INFLUENCIA DE FACTORES AMBIENTALES EN LOS RELÁMPAGOS PRODUCIDOS EN EL NÚCLEO INTERNO

En el capítulo anterior se discutieron las posibles relaciones directas entre la densidad efectiva de relámpagos en el núcleo con la intensidad y su derivada. En particular las figuras 7-4 y 7-6 muestran una gran variabilidad de  $\rho_e$  para cada valor de intensidad e intensificación, esta variabilidad puede atribuirse a diversos factores externos al CT, ya sean tanto ambientales como temporales, tales como la intensidad y dirección de la cortante, la rapidez y dirección del movimiento del CT, la hora local, la cantidad de CCN y la SST en las inmediaciones del CT. Cada uno de estos factores puede fomentar o inhibir la  $\rho_e$  en forma independiente, y las posibles combinaciones de estos factores pueden incrementar sustancialmente o inhibir totalmente la producción de relámpagos. Para evaluar la influencia individual de cada uno de estos factores se puede considerar la siguiente hipótesis:

Cada uno de los factores ambientales **es independiente** de los otros, de tal forma que ninguno de ellos influye sobre algún otro, o bien, la influencia de un factor sobre otro es despreciable.

Esta simplificación del problema permite comprender en una primera aproximación como influye individualmente cada factor sobre la producción de relámpagos en el núcleo interno de un CTs. Esta hipótesis se puede ejemplificar a través de diversas situaciones, así por ejemplo, la hora local del centro de un CT no depende de algún otro factor ambiental, aunque puede verse influida ligeramente por la velocidad del CT en cuestión, pero esta dependencia de la hora local de la velocidad del CT es despreciada.

Otra situación más evidente de la influencia de un factor sobre otro es la variación diurna de la SST en las inmediaciones de un CT, sin embargo, los impactos generales de esta variación diurna de la SST sobre la atmosfera se desconocen (Kawai & Wada, 2007), aunque se sabe que las condiciones meteorológicas si influyen sobre este ciclo diurno de la SST, requiriéndose de una atmósfera en calma para que esta variación sea perceptible (Kawai & Wada, 2007), lo cual posiblemente no ocurra en las inmediaciones de un CT. Además, la resolución temporal del MW+IR OISST es de 24 horas impidiendo observar esta posible variación.

Dejando de lado estas situaciones, se puede estudiar cada uno de estos factores ambientales por separado para distinguir tendencias fundamentales o comportamientos generales de cada una de estas variables. Cada sección de este capítulo se centrará en cada uno de los factores ambientales que puede modular la  $\rho_e$  y son los siguientes:

- La Hora local;
- la cortante vertical (intensidad y dirección);
- el movimiento del CT;
- la SST y
- la cantidad de aerosoles disponibles, aproximada a través del producto MOD08\_D3;

### Variación diurna de la densidad efectiva de relámpagos

Kossin (2002) observó, a través de la temperatura de cuerpo negro en el tope de nubes en CTs, una variación diurna de la cubierta cirromorfa empleando imágenes de satélite, sin embargo las regiones convectivas del núcleo interno, no mostraban esta variación, aunque en ocasiones estas regiones presentaban una variación semidiurna y en menor medida una variación diurna, la cual coincide con la marea atmosférica solar con periodo de doce horas ( $S_2$ ). Estas observaciones mostraron que la cubierta cirromorfa es modulada por un proceso físico diferente al ocurrido sobre las regiones convectivas.

La variación semidiurna, que coincide con  $S_2$ , es explicada, no a través de la variación directa de la presión atmosférica ocasionada por  $S_2$ , sino a través de una perturbación en el perfil vertical de la temperatura (independientemente de si la marea  $S_2$  tiene estructura vertical) inducida por la marea  $S_2$ . Esta perturbación en la temperatura es debido a que la densidad de la atmósfera varía con la altura, la cual presenta una variación semidiurna, coincidiendo con  $S_2$  (Harris, Finger, & Teweles, 1962), esta variación en la densidad influye finalmente en la razón de enfriamiento vertical exhibiendo una oscilación semidiurna mostrando desestabilizaciones atmosféricas máximas a las 0400 y a las 1600 tiempo local (Harris, Finger, & Teweles, 1962), mismas que coincide con las variaciones semidiurnas de la temperatura de tope de nubes hecha por Kossin (2002), aunque se desconocen con precisión los detalles de esta mecanismo.

Si bien, las regiones de convección exhiben una oscilación semidiurna, hasta la fecha no se ha estudiado si los relámpagos también muestran esta oscilación como el estudio de Kossin (2002) sugiere debería ocurrir. Continuando con esta línea de trabajo, se analizarán diversas series de tiempo de la densidad efectiva de relámpagos en el núcleo interno con el propósito de discernir si esta variable experimenta estas oscilaciones. Así como revelar en que momento las actividades eléctricas se maximizan.

Es importante hacer notar que el análisis de las series de tiempo se puede realizar en dos formas distintas:

1. Considerar las series de tiempo  $\mathcal{S}_{\rho_{em}} = \{\rho_{ei}\}_{i=1}^m$  donde  $\rho_{ei}$ , es la densidad efectiva de relámpagos en el intervalo  $i$ , donde  $i = 1$  corresponde al primer tiempo en la vida de

un CT e  $i = n$  corresponde al último tiempo de la vida de CT. Además se define a  $\rho_{ei} = 0 \Leftrightarrow R_i = 0$ .

2. Considerar series de tiempo  $\mathcal{S}_{\rho_{en}} = \{\rho_{ei}\}_{i=1}^n$  como las anteriores sujetas a la restricción:  $\rho_{ei} > 0 \forall i = 1, 2, \dots, n$ , donde  $i$  son intervalos de tiempo consecutivos en la vida de un solo CT.

La principal diferencia entre estos dos tipos de series de tiempo consiste en eliminar todos los intervalos nulos del análisis, en estos intervalos se puede considerar que el CT no se encuentra activo en el sentido convectivo, además en las series tipo  $\mathcal{S}_{\rho_{em}}$  frecuentemente ocurre que el tiempo entre dos  $\mathcal{S}_{\rho_{en}}$  y  $\mathcal{S}_{\rho_{em}}$  consecutivas es muy grande ( $\geq 9$  hrs) y que los intervalos nulos en ocasiones conforman gran parte de los puntos que forman a  $\mathcal{S}_{\rho_{em}}$ , dada esta lejanía en el tiempo se puede considerar que estas dos  $\mathcal{S}_{\rho_{en}}$  y  $\mathcal{S}_{\rho_{em}}$  consecutivas difícilmente se encuentran ligadas a un solo proceso de mayor escala temporal. Estas razones sugieren que es más conveniente estudiar series de tiempo tipo  $\mathcal{S}_{\rho_e}$  en lugar de tipo  $\mathcal{S}_{\rho_{em}}$ , en contraste con las series tipo  $\mathcal{S}_{\rho_{em}}$ , a costa de que las series tipo  $\mathcal{S}_{\rho_e}$  resultan muy cortas (siendo  $n \leq 20$  en todas las series estudiadas) dificultando realizar análisis típicos en series de tiempo, tales como el estudio del espectro de potencias o evaluar la función de autocorrelación.

Sin embargo, se pueden destacar ciertas ventajas, en particular la simple inspección visual de una serie muy corta puede revelar algún ciclo fundamental. En este sentido, es importante señalar que una serie debe al menos contener cinco puntos, que es la cantidad mínima de puntos necesarios para formar una onda sinusoidal. Esta consideración adicional requiere descartar las series  $\mathcal{S}_{\rho_{en} < 5}$ .

Es conveniente establecer algunas definiciones:

- Se denota como  $\mathcal{S}_{\rho_{en}}$  a la serie  $\mathcal{S}_{\rho_{en}}$  tal que  $|\mathcal{S}_{\rho_e}| = n$ .
- El conjunto de las  $\mathcal{S}_{\rho_{en}}$  asociado a un clúster  $C$  como  $\mathfrak{S}_n(C) = \{\mathcal{S}_{\rho_{en}} | \mathcal{S}_{\rho_{en}} \in C\}$ .
- Se definen los valores  $M_t \in \mathcal{S}_{\rho_{en}}$  tales que  $M_t$  es un máximo relativo al tiempo  $t$ .
- $t$  está expresada en la hora local de la posición del centro del CT.
- En forma análoga se definen  $m_t \in \mathcal{S}_{\rho_{en}}$  tales que  $m_t$  es un mínimo relativo.

El análisis para evaluar la influencia del ciclo diurno en la actividad eléctrica es el siguiente:

1. Para identificar en que horario se muestra la máxima (mínima) actividad eléctrica se elaborarán cuatro histogramas de cada conjunto  $\mathfrak{S}_{n \geq 5}(C)$ ; el primero (segundo) mostrará la frecuencia absoluta de todos valores  $M_t$  ( $m_t$ ) de cada clúster en clases horarias  $t = 3, 9, 15, 21$ ; el tercero (cuarto) será semejante al primero (segundo) pero con clases horarias  $t = 6$  (día) y  $t = 18$  (noche) representando.
2. Para visualizar la influencia directa del ciclo diurno y del semidiurno observado por Kossin (2002) se considerará cada elemento de los conjuntos  $\mathfrak{S}_{n \geq 8}(C)$  (33 series, Tabla 8-1), los cuales serán separados en dos "armónicos" empleando la técnica SSA con el propósito de encontrar armónicos totalmente sinusoidales con periodos de

oscilación de 12 y 24 horas con ayuda de la función de autocorrelación y una inspección visual. Resulta importante notar que oscilaciones con periodos menores a 12 horas pueden no tener significado físico, debido a que estas oscilaciones se encuentran muy cerca de la frecuencia de Nyquist, y puede presentarse aliasing en estas oscilaciones (Cushman-Roisin & Beckers, 2011), puesto que el tiempo entre dos intervalos consecutivos es de 3 horas.

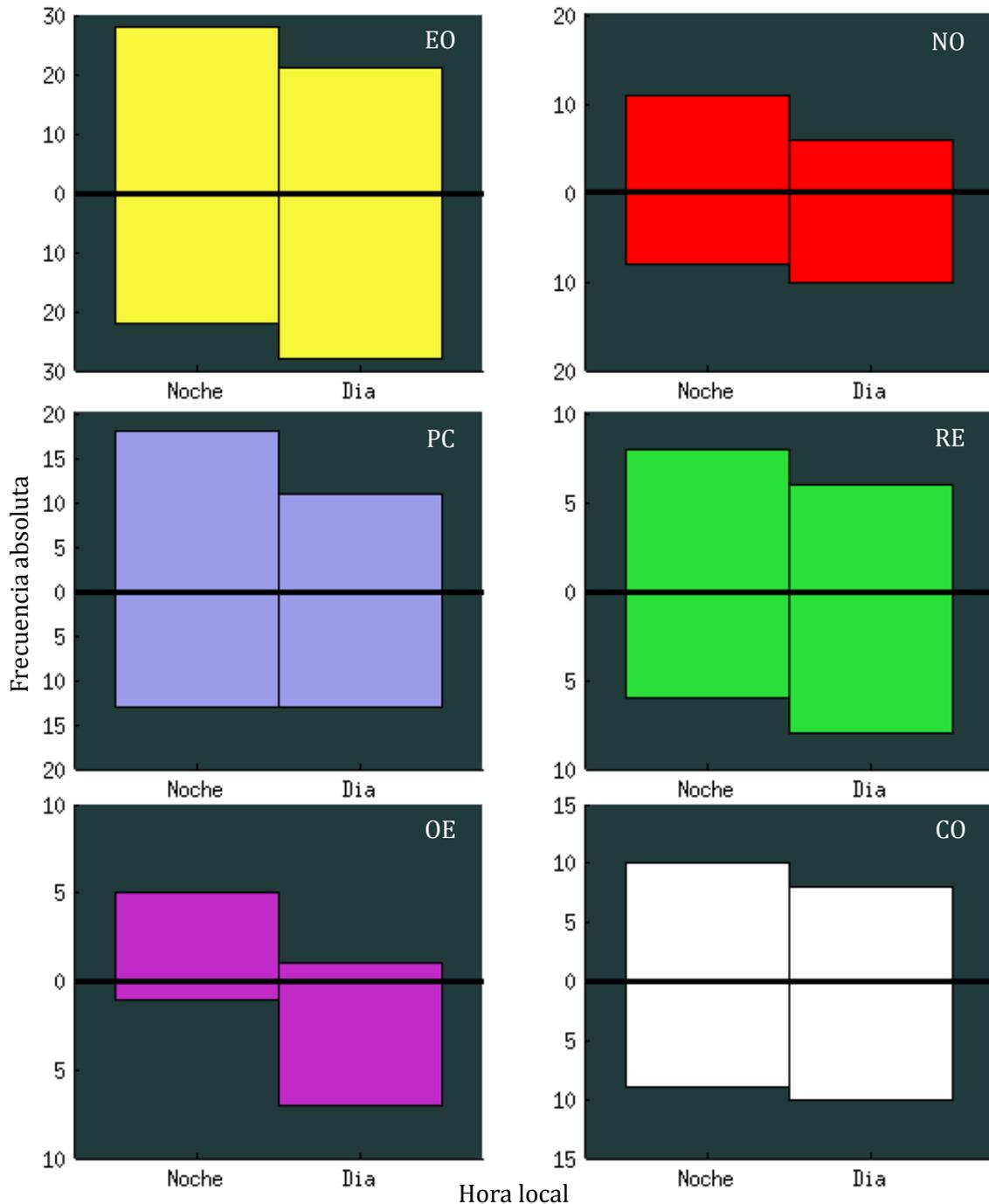


Figura 8-1. Histogramas de máximos (histograma superior de cada subfigura) y mínimos (histograma inferior de cada subfigura) relativos en cada clúster de acuerdo a su hora local.

Los histogramas tanto de máximos relativos como de mínimos relativos de cada clúster se muestran en las Figura 8-1 y Figura 8-2. La Figura 8-1 muestra que en todos los clústeres los valores  $M_t$  ocurren con mayor frecuencia durante la noche, mientras que los valores  $m_t$  son más frecuentes durante el día, con excepción del clúster PC, mostrando estadísticamente que la convección se profundiza durante la noche y disminuye durante el día, sin embargo la razón entre la cantidad máximos nocturnos en cada clúster ( $E_{M_n}(C)$ , donde  $C$  es un clúster) y la cantidad de máximos diurnos en cada clúster ( $E_{M_d}(C)$ ) varía enormemente entre cada clúster (Tabla 8-1), esto puede ser debido a la poca cantidad de elementos en cada conjunto  $\mathfrak{S}_{n \geq 5}(C)$  (Tabla 8-1), puesto que no se observa ningún patrón evidente que indique diferencia alguna característica de cada clúster.

La figura 8-1, muestra comportamientos diferenciados entre los clústeres, observándose que los clústeres que se encuentran lejos de tierra (EO y NO principalmente) presentan más eventos de máximos (mínimos) en los horarios asociados a la noche (día). Donde los clústeres EO y OE presentan claramente una diferencia de fase de 12 hrs entre la máxima cantidad de eventos máximos  $E_{M_3}(EO, OE)$ ,  $E_{M_{21}}(NO)$  y la cantidad de máxima de eventos mínimos  $E_{m_{15}}(EO, OE)$ ,  $E_{m_3}(NO)$ .

Por el contrario, los clústeres PC y RE presentan un comportamiento al resto de los clústeres donde existen dos máximos relativos de eventos  $M_t$  tanto en la mañana como en la noche asociados a cada uno de estos clústeres  $E_{M_9}(PC)$ ,  $E_{M_{21}}(PC)$  y  $E_{M_9}(RE)$ ,  $E_{M_9}(RE)$ , indicando que la convección se profundiza durante la noche y la mañana. Este comportamiento puede ser debido a 1) que los intervalos se encuentran muestreados cada tres horas en el horario UTC, mas no en la hora local, implicando que los intervalos en términos de la hora local no se encuentran muestreados uniformemente, sesgando los eventos que ocurren en las fronteras de cada clase, 2) los CTs que se encuentran cerca de tierra, profundizan la convección durante la mañana y la noche en lugar de mostrar un profundización únicamente durante la noche y madrugada, además, en términos de la figura 8-1, durante la noche son más frecuentes los  $M_t$  que durante el día, esto puede ser interpretado como la presencia de un ciclo semidiurno y uno diurno, semejante al que observó Kossin (2002) en la temperatura de tope de las nubes en el núcleo interno, al menos en un sentido estadístico o, 3) Roy y Balling (2013), observaron que en algunas regiones oceánicas el ciclo diurno no siempre es un factor fundamental que modula los procesos de electrificación, pudiendo ser más importante un ciclo semidiurno, esto ocurre particularmente en el Golfo de Tehuantepec y al sur de este, así como en las costas de Sonora, mientras que en otras regiones oceánicas la variación diurna es notable, como en el Golfo de México, lamentablemente este estudio no muestra resultados sobre el interior del Pacífico Nororiental, lo cual podría ayudar a dilucidar si esta tercera hipótesis es válida, aunque no se opone a la segunda.

Finalmente este sencillo estudio estadístico muestra que durante la noche (figura 8-1) se alcanzan máximos relativos en la densidad efectiva, y se puede dilucidar la presencia del ciclo diurno en la densidad efectiva en los clústeres EO, NO y OE (figura 8-1), mientras que en los clústeres PC y RE parece ocurrir una oscilación semidiurna desfasada 6 horas con respecto a la marea  $S_2$ .

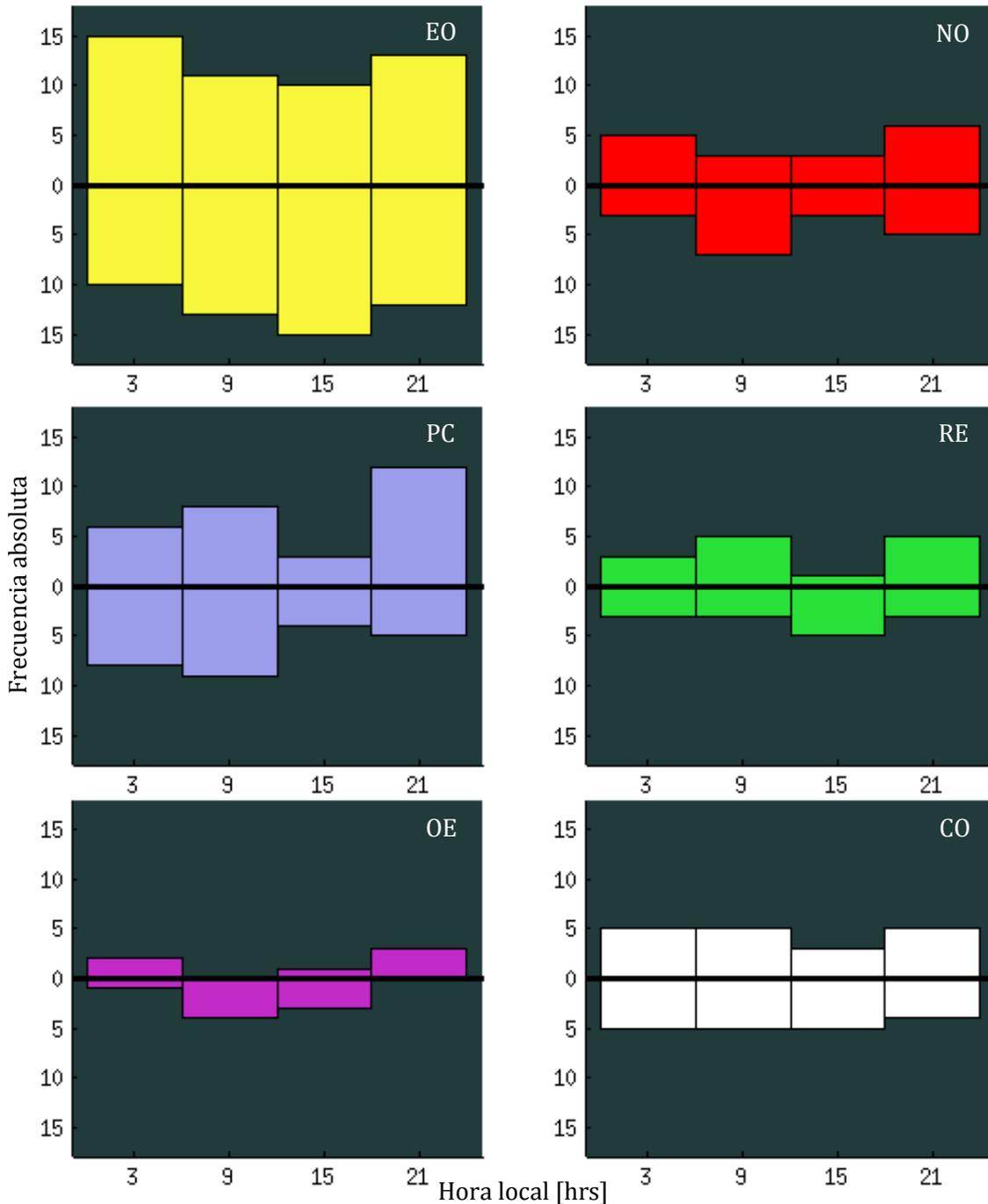


Figura 8-2. Histogramas de máximos (histograma superior de cada subfigura) y mínimos relativos (histograma inferior de cada subfigura) de cada clúster con respecto al día (clases de las 3 y 21 horas local) o la noche (clases de las 9 y 15 horas local).

Para observar en forma directa la influencia de los ciclos diurno y semidiurno es necesario estudiar series de tiempo individuales y determinar la importancia de estos en cada serie estudiada. Dado que la longitud máxima que puede tener una serie son 20 intervalos ( $\sim 3$  días), vasta una inspección visual de cada uno de los armónicos resultantes para distinguir los periodos asociados a cada modo.

Se han seleccionado algunas  $\mathfrak{S}_{n \geq 8}$  de cada clúster con el objeto de mostrar la forma de estas series, así como sus armónicos elementales y mostrar visualmente la influencia tanto del ciclo diurno como del ciclo semidiurno ( $\sim 12$  hrs) en las series resultantes. Sin embargo no se muestran todas las  $\mathfrak{S}_{\rho_e n \geq 8}$  (Tabla 8-1) debido a las limitaciones de espacio.

Clúster	Excedente de máximos (mínimos) en el día (noche) con respecto a los de la noche (día) y cantidad de $\mathfrak{S}_n$									
	$M_n / M_d$	$m_d / m_n$	$ \mathfrak{S}_{5 > n} $		$ \mathfrak{S}_{n \geq 5} $		$ \mathfrak{S}_{n \geq 8} $	$\mathfrak{S}_{\rho_e n \geq 8}$		
	[%]	[%]	$\frac{ \mathfrak{S}_{5 > n} }{ \mathfrak{S}_n }$	[%]	$\frac{ \mathfrak{S}_{n \geq 5} }{ \mathfrak{S}_n }$	[%]	$\frac{ \mathfrak{S}_{n \geq 7} }{ \mathfrak{S}_n }$	$T_S$	$T_{SD}$	
EO	33	27	85	72.0	33	28.0	11	9.3	6	3
NO	83	50	16	59.3	11	40.7	4	14.8	2	1
PC	63	100	17	54.8	14	45.2	7	22.6	3	4
RE	33	33	17	68.0	8	32.0	5	20.0	2	2
OE	500	700	8	61.6	5	37.4	3	23.1	1	0
CO	25	11	13	56.5	10	43.5	3	13.0	1	2

**Tabla 8-1. Porcentaje de valores excedentes de los máximos ocurridos en la noche con respecto a los ocurridos en el día. Así como la cardinalidad de cada conjunto mostrado en cada columna. Las últimas dos columnas muestran la cantidad de  $\mathfrak{S}_{\rho_e n \geq 8}$  tales que exhiben una oscilación con periodo  $T_D = 24$  hrs, así como  $T_{SD} = 12$  hrs.**

La Tabla 8-1 muestra la cardinalidad de cada conjunto  $\mathfrak{S}_{n < 5}(C)$ ,  $\mathfrak{S}_{n \geq 5}(C)$  y  $\mathfrak{S}_{n \geq 8}(C)$ , así como la fracción que representa cada uno de estos subconjuntos con respecto a la cardinalidad de  $\mathfrak{S}_n(C)$ , resulta interesante observar que los de  $|\mathfrak{S}_{n \geq 8}(C)|$  para los clústeres EO, NO y CO son una fracción más chica del total de  $|\mathfrak{S}_n(C)|$  comparado con el los valores de los clústeres PC, RE y OE esto puede deberse principalmente a la cercanía con tierra (considerando que hay que ser cuidadoso con el clúster OE, debido a la pocos CTs que contiene), estando el centro del CT a 400 km o menos de la costa en el caso del clúster PC, lo cual puede ayudar a fomentar la convección debido a forzamiento orográfico o bien a una mayor cantidad de aerosoles o incluso a una mayor SST en el caso del clúster PC.

De acuerdo con la tabla 8-1, aproximadamente la mitad de las series  $\mathfrak{S}_{\rho_e n \geq 8}$  de cada clúster muestra la influencia del ciclo diurno, esto es más notable en los clústeres EO y NO y menos frecuente observar algún ciclo semidiurno, mientras que en los clústeres PC y RE ocurre lo contrario, siendo la influencia del ciclo semidiurno es más o igual de frecuente que el ciclo diurno, este resultado concuerda con lo observado en la figura 8-2 referente a la presencia de la oscilación semidiurna en estos clústeres. Estos resultados se muestran consistentes con la literatura, en particular los trabajos de Kossin (2002) y de Roy y Balling (2013). Sin embargo estos resultados deben ser corroborados empleando muestras de CTs más grandes y/o empleando frecuencias de muestreo más altas en las  $\mathfrak{S}_{\rho_e n}$ , puesto que en este trabajo se encontraron muy pocos casos que se puedan estudiar.

Aún queda la interrogante acerca de que se puede decir de las series  $\mathfrak{S}_{\rho_e n < 8}$ , ¿qué tan frecuentes son? ¿siguen algún comportamiento particular? ¿se puede saber porque son tan cortas? Para tratar de responder a estas preguntas se estudiará la frecuencia con la que aparecen estas series en cada clúster, recordando que en el capítulo 5 se sugirió que tanto el

clúster PC como el RE los  $I_n$  parecían estar distribuidos uniformemente sobre los  $I_T$ , aunque esto se consideró basándose en una región de 400 km de radio, sin embargo valdría la pena preguntarse si esto es válido en el núcleo interno.

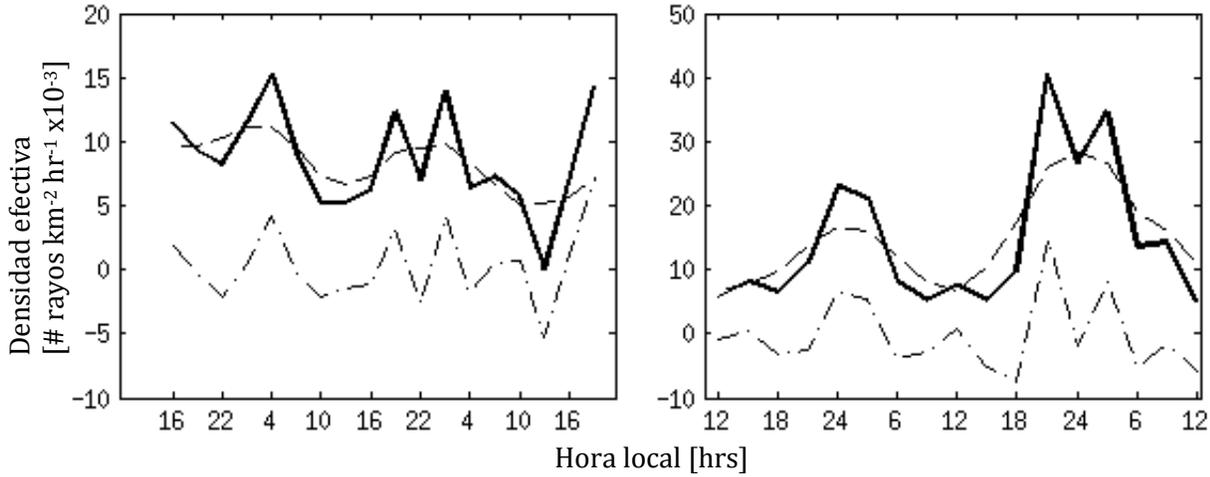


Figura 8-3. Algunas series tipo  $\mathcal{S}_{\rho_e n \geq 8}$  (línea negra) y sus respectivos “armónicos”. La línea con segmentos muestra el primer “armónico” y la línea con puntos y rayas muestra el segundo “armónico”, la suma en cada tiempo de los dos armónicos forman la serie  $\mathcal{S}_{\rho_e n \geq 8}$ . El tiempo se muestra en la hora local del centro del CT.

En caso de que los  $I_n$  del núcleo interno satisfagan esta propiedad, la respuesta a las preguntas planteadas en el párrafo anterior es que los intervalos no nulos siguen las leyes de la probabilidad y tienen una probabilidad  $p$  definida de ocurrir.

Para probar esta hipótesis se elaborará un histograma de la frecuencia con que aparecen las series  $\mathcal{S}_{\rho_e n < 8}$  y se definirá que en un tiempo  $t$ , un CT se encuentra inactivo en el sentido convectivo si este no muestra relámpagos en el núcleo interno, en caso contrario el CT se encuentra activo en el sentido convectivo.

Si la hipótesis es válida entonces la probabilidad  $p$  de que ocurran relámpagos en el núcleo interno se puede calcular como  $p = I_n / I_{NT}$  donde  $I_n$  es la cantidad de intervalos no nulos pertenecientes a alguna  $\mathcal{S}_{\rho_e n < 8}$  e  $I_T$  es la cantidad total de intervalos que no pertenecen alguna serie  $\mathcal{S}_{\rho_e n \geq 8}$  restringidos al núcleo de esta forma la probabilidad de que ocurran  $n$  intervalos no nulos consecutivos satisface la ecuación:

$$P(n) = p(1 - p)^{n-1} \quad (8.1)$$

Que es la ecuación de una distribución geométrica asociada a un histograma de frecuencias relativas de las series  $\mathcal{S}_{\rho_e n < 8}$ , así  $|\mathfrak{S}_{n < 8}(\text{EO})| = 107$ , mientras que  $|\mathfrak{S}_n(\text{NO})| = 27$ , los cuales son los clústeres candidatos a presentar esta uniformidad en los intervalos no nulos.

La ecuación (8.1) entonces puede ser interpretada como sigue: un CT se encuentra en uno de dos estados convectivos, activo (presenta relámpagos en el núcleo interno) o inactivo (no presenta relámpagos en el núcleo interno), cada uno con una probabilidad  $p$  y  $q$

respectivamente, donde  $p < q$ . Decimos que un intervalo es exitoso si el CT se encuentra inactivo y que un intervalo es fallido en caso contrario, entonces la probabilidad de  $n$  intervalos sucesivos fallidos satisface la ecuación (8.1).

Si un histograma de frecuencias relativas se ajusta a recta de la forma:

$$\text{Log}(P(n)) = a + nb, \text{ además } e^b = 1 - p, e^a = \frac{p}{1 - p} \text{ y } 0 < p < 1 \quad (8.2)$$

Entonces, dicho histograma satisface la distribución geométrica descrita por (8.1). La (Tabla 8-2) muestra los valores de  $p$  asociados a los histogramas de acuerdo con la ecuación (8.2) así como la probabilidad  $p$  que resulta al dividir todos los intervalos totales entre todos los intervalos no nulos en el núcleo interno ( $I_{tn}/I_t$ ), dado que existen muy pocas series en los conjuntos  $\mathfrak{S}_{n<8}(C)$  para todos los clústeres, excepto en el EO, se calculará únicamente el ajuste del histograma asociado al conjunto  $\mathfrak{S}_{n<8}(\text{EO})$ , y al  $\mathfrak{S}_{n<8}(C)$  donde  $C$  representa la unión de todos los clústeres.

Probabilidad $p$ de que ocurran intervalos no nulos				
Series	$p = \frac{I_{tn}}{I_t}$	$p_a = e^{b+a}$ calculada	$R^2$	$ p_a - p $
$\mathfrak{S}_{n<8}(\text{EO})$	0.26	0.30	0.95	0.04
$\mathfrak{S}_{n<8}(C)$	0.28	0.58	0.90	0.30

**Tabla 8-2. Ajuste de los histogramas de frecuencias a una curva exponencial y comparación entre la probabilidad  $p_a$  ajustada y la probabilidad  $p$  calculada con la cantidad de intervalos. Se muestra el valor del ajuste  $R^2$ .**

Como se puede observar en la tabla 8-2, las series del conjunto  $\mathfrak{S}_{n<8}(C)$  difícilmente se podrán modelar como eventos probabilísticos con probabilidad  $p$ , sin embargo existe la posibilidad de que las series del conjunto  $\mathfrak{S}_{n<8}(\text{EO})$  sigan esta ley probabilística aunque para confirmar esta hipótesis es necesario emplear una muestra de CTs más grande y corroborarla, por el momento se considera únicamente como una posibilidad. Aunque vale la pena mencionar que dichos histogramas se ajustan bien a una curva exponencial, pero no es posible asignarle una distribución de densidad de probabilidad con este tipo de ajuste.

### Cortante de viento

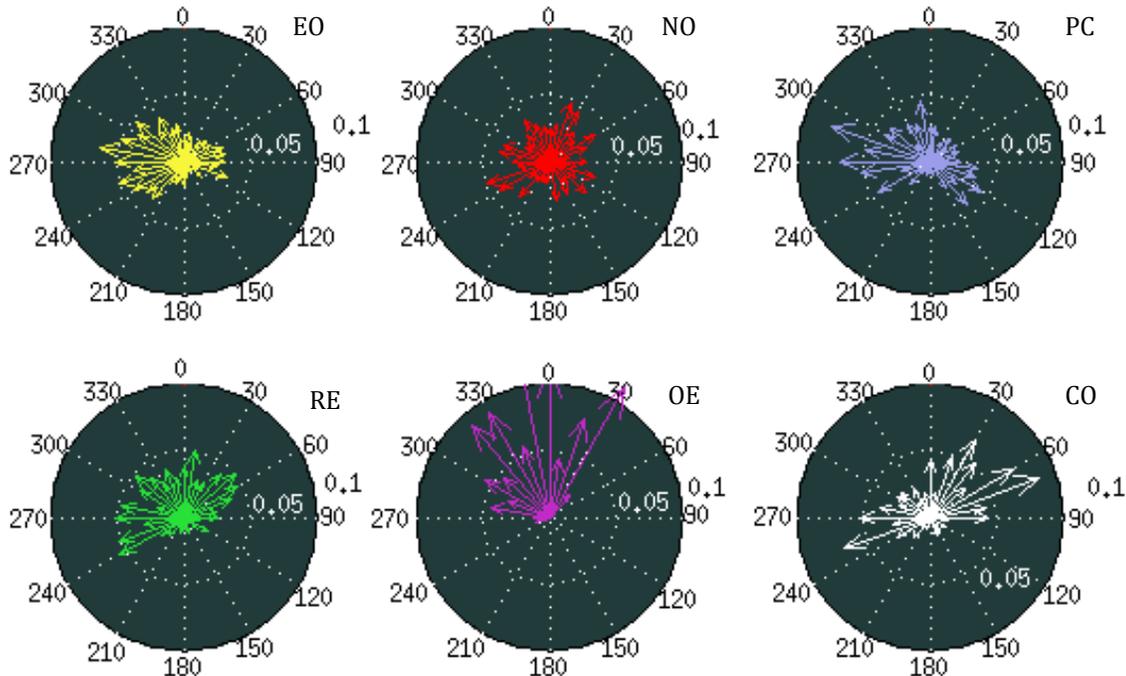
Uno de los factores más importantes que influyen sobre la convección profunda, el cual puede vigorizarla o disminuirla, es la cortante de viento (definida como la diferencia vectorial entre el viento horizontal a 850 hpa y 200 hpa). La cortante también se encuentra anticorrelacionada con la intensificación de los CTs en cualquier etapa de su vida. Aunque el mecanismo físico de esta acción es parcialmente desconocido, se han propuesto diversos mecanismos (Zhang, Rogers, Reasor, Uhlhorn, & Marks, 2013).

Alusivo a la convección en CTs, la cortante juega un papel importante en la formación de asimetrías azimutales en la distribución de los relámpagos (Corbosiero & Molinari, The Effects of Vertical Wind Shear on the Distribution of Convection in Tropical Cyclones, 2002) y

(Abarca, Corbosiero, & Vollaro, 2011), así como otras asimetrías en los vientos tangenciales y radiales (Zhang, Rogers, Reasor, Uhlhorn, & Marks, 2013) .

En esta sección se estudia la influencia de la cortante (dirección e intensidad) sobre la densidad en la convección en cada clúster en contraposición con las asimetrías azimutales estudiadas por (Corbosiero & Molinari, The Effects of Vertical Wind Shear on the Distribution of Convection in Tropical Cyclones, 2002), (Abarca, Corbosiero, & Vollaro, 2011) y lo discutido en el capítulo 5 de este trabajo con el objeto de conocer en que rango de intensidad de la cortante la densidad  $\rho_e$  se incrementa, así como observar si existen direcciones preferenciales de la cortante que incidan en la  $\rho_e$ .

Para lograr estos objetivos se realizará un histograma de frecuencias relativa del azimut de la cortante en cada clúster en sus respectivos  $I_e$  (intervalos efectivos), además se estudiará en que rango de intensidad de la cortante es más probable presenciar relámpagos en el núcleo interior y finalmente se realizará un diagrama de dispersión entre la  $\rho_e$  y la intensidad de la cortante, mismo que se analizará para definir posibles relaciones.



**Figura 8-4.** Histograma de frecuencias relativas del azimut de la cortante de viento en cada clúster. El azimut  $0^\circ$  indica que la cortante apunta hacia el norte,  $180^\circ$  hacia el sur y así sucesivamente. Se muestran las clases centradas cada  $30^\circ$ .

Las frecuencias relativas del azimut de la cortante se muestran en la figura 8-4, en contraste con la dirección de los CTs en cada clúster (figura 4-4) el histograma de la dirección de la cortante no muestra preferencia alguna en ningún clúster, salvo medianamente en el clúster EO, esto es un indicador de que la cortante del viento no se encuentra, al menos en el sentido estadístico, correlacionada con la dirección de movimiento del CT, además diagramas de dispersión entre el azimut de la cortante y  $\rho_e$  (no se muestran) no revelan en absoluto alguna relación por lo que se descarta la influencia de este factor sobre la  $\rho_e$ . Además, los estudios

realizados para detectar la influencia de la cortante sobre la convección se centran en la intensidad de esta, en lugar de su dirección debido a que la intensidad puede servir como un indicador de la deformación horizontal de las estructuras verticales en las celdas convectivas. En este sentido se estudiará la influencia de la intensidad de la cortante en forma análoga a la influencia de la intensidad en cada intervalo de cada CT en cada clúster

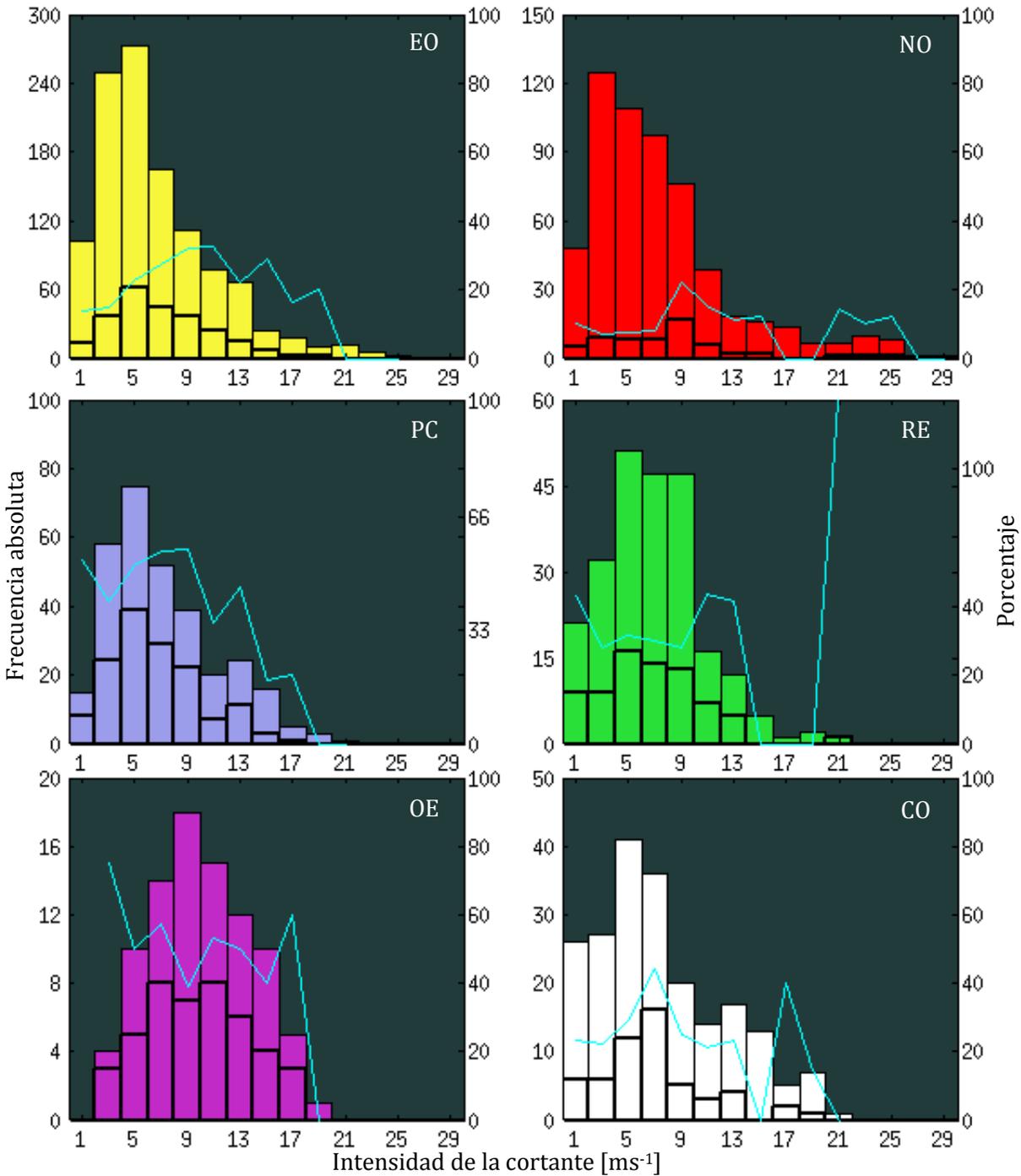


Figura 8-5. Igual que la figura 7-5 solo que para valores en la intensidad de la cortante. Nótese que el eje vertical izquierdo es diferente para cada clúster.

Los histogramas de frecuencias de la intensidad de la cortante y los histogramas de frecuencias de los  $I_e$  restringidos al núcleo interno se muestran en la figura 8-5, observándose que en general no existe alguna tendencia en las líneas cian de la figura 8-5 que muestre en que rangos la intensidad de la cortante fomenta la producción de relámpagos en el núcleo interno; excepto en el clúster PC, el cual muestra que entre mayor sea la intensidad de la cortante es menos probable presenciar relámpagos en el núcleo interno. A pesar de que no exista una tendencia evidente en todos los clústeres se puede apreciar un máximo relativo en línea cian de en las clases de 9 y 11  $\text{ms}^{-1}$ , omitiendo los clústeres CO y OE, el cual muestra su máximo relativo a los 7  $\text{ms}^{-1}$ .

La razón de que no se encuentre una tendencia general en todos los clústeres puede indicar dos posibles razones, 1) los relámpagos que se forman en el núcleo interno ocurren preferentemente fuera del dominio NARR perdiéndose intervalos no nulos en fuera de dicho dominio y 2) que no exista tal tendencia como se observa en los histogramas.

Para evaluar la factibilidad de la posibilidad se elaboró una tabla semejante a la 5-1 pero restringida al núcleo interno (tabla 8-5), dicha tabla permitirá conocer cuantos  $I_{en}$  (intervalos efectivos no nulos) quedaron dentro del dominio NARR (intervalos efectivos  $I_e$ ) y cuantos intervalos no nulos hay en total (intervalos totales no nulos,  $I_{tn}$ ), así como calcular la fracción de  $I_{tn}$  respecto a la cantidad total de intervalos ( $I_t$ ) y calcular la misma fracción de  $I_{en}$  con respecto a la cantidad de  $I_e$ .

De esta forma la tabla 8-5 muestra que en los clústeres EO, PC, RE y OE la fracción de  $I_{tn}$  es semejante a la fracción de  $I_{en}$  (columnas 6 y 8) mientras que en los clústeres restantes la diferencia entre estos valores es mayor al 5%. Esto indica que los intervalos que se encuentran dentro del dominio NARR son un muestra representativa del comportamiento global en estos clústeres, puesto que la fracción de los  $I_{en}$  es semejante a la fracción de los  $I_{tn}$ . De esta forma la razón 1) parece poco probable, excepto en los clústeres NO y CO, por lo que se puede considerar que la intensidad de la cortante difícilmente ayuda a formar celdas convectivas que formen relámpagos, excepto en el clúster PC, donde la cortante inhibe la convección profunda.

Clúster	Intervalos no nulos en el <b>núcleo interno</b>							
	Cantidad de intervalos			Cantidad de intervalos no nulos				
	Totales ( $I_t$ )	Efectivos ( $I_e$ )	$\frac{I_e}{I_t}$ [%]	Totales ( $I_{tn}$ )	$\frac{I_{tn}}{I_t}$ [%]	Efectivos ( $I_{en}$ )	$\frac{I_{en}}{I_e}$ [%]	$\frac{I_{en}}{I_{tn}}$ [%]
EO	1616	1118	69.2	403	26.0	246	22.0	61.0
NO	709	579	81.7	112	15.8	60	10.4	53.6
PC	375	308	82.1	171	45.6	144	46.8	84.2
RE	304	235	77.3	108	35.5	75	31.5	69.4
OE	129	89	69.1	65	50.4	44	49.4	67.7
CO	311	207	66.6	100	32.2	55	26.6	55.0

Tabla 8-3. Cantidad de intervalos totales con al menos un relámpago en el núcleo interno, así como cantidad total de intervalos efectivos con al menos un relámpago en el núcleo interno.

El análisis anterior indica que la intensidad de la cortante no ayuda a formar regiones convectivas. Sin embargo una celda convectiva puede vigorizarse o permanecer activa durante más tiempo gracias a la influencia de la cortante, bajo esta situación es posible considerar que para algunos valores de la intensidad de la cortante incrementan la  $\rho_e$ , al tiempo que la valores muy intensos deberían inhibirla, para estudiar esta situación se han elaborado diagramas boxplot de la distribución de la  $\rho_e$  para cada valor de la intensidad de la cortante (Figura 8-6).

La Figura 8-6 permite estudiar bajo diferentes perspectivas la influencia de la intensidad de la cortante sobre la  $\rho_e$ , por ejemplo, la observación más simple revela que todos los intervalos con  $\rho_e$  (28 intervalos en todos los clústeres o 4.5% de los intervalos no nulos) mayores a 40 rayos  $\text{km}^{-2} \text{hr}^{-1} \times 10^{-3}$  en todos los clústeres que tienen intervalos con estas densidades ocurre cuando la intensidad se encuentra entre 4 y 14  $\text{ms}^{-1}$ .

Otra observación que se puede realizar es que en los clústeres PC, RE y OE la mediana presenta un mínimo cuando la intensidad se encuentra entre los 5 o 7  $\text{ms}^{-1}$ , no así en los clústeres EO y NO; mientras que si se observan las líneas punteadas de los valores extremos de cada boxplot en los clústeres RE y CO se forma una especie de curva parabólica la cual alcanza su mínimo cuando la intensidad es de 5 o 7  $\text{ms}^{-1}$ , lo mismo pareciera ocurrir en menor medida en el clúster NO, mientras que en los clústeres EO, PC y CO no forman esta envolvente. Esto puede deberse más a una coincidencia estadística que a un proceso físico, puesto que puede observarse que estos clústeres son los que contienen la menor cantidad de  $I_{en}$  mientras que los clústeres EO y PC contienen una cantidad semejante de  $I_{en}$  (Tabla 8-3), a la par que para valores en la intensidad mayores a 11  $\text{ms}^{-1}$  los eventos que forman estos boxplots apenas cuentan con a lo más 5 ó 6 eventos.

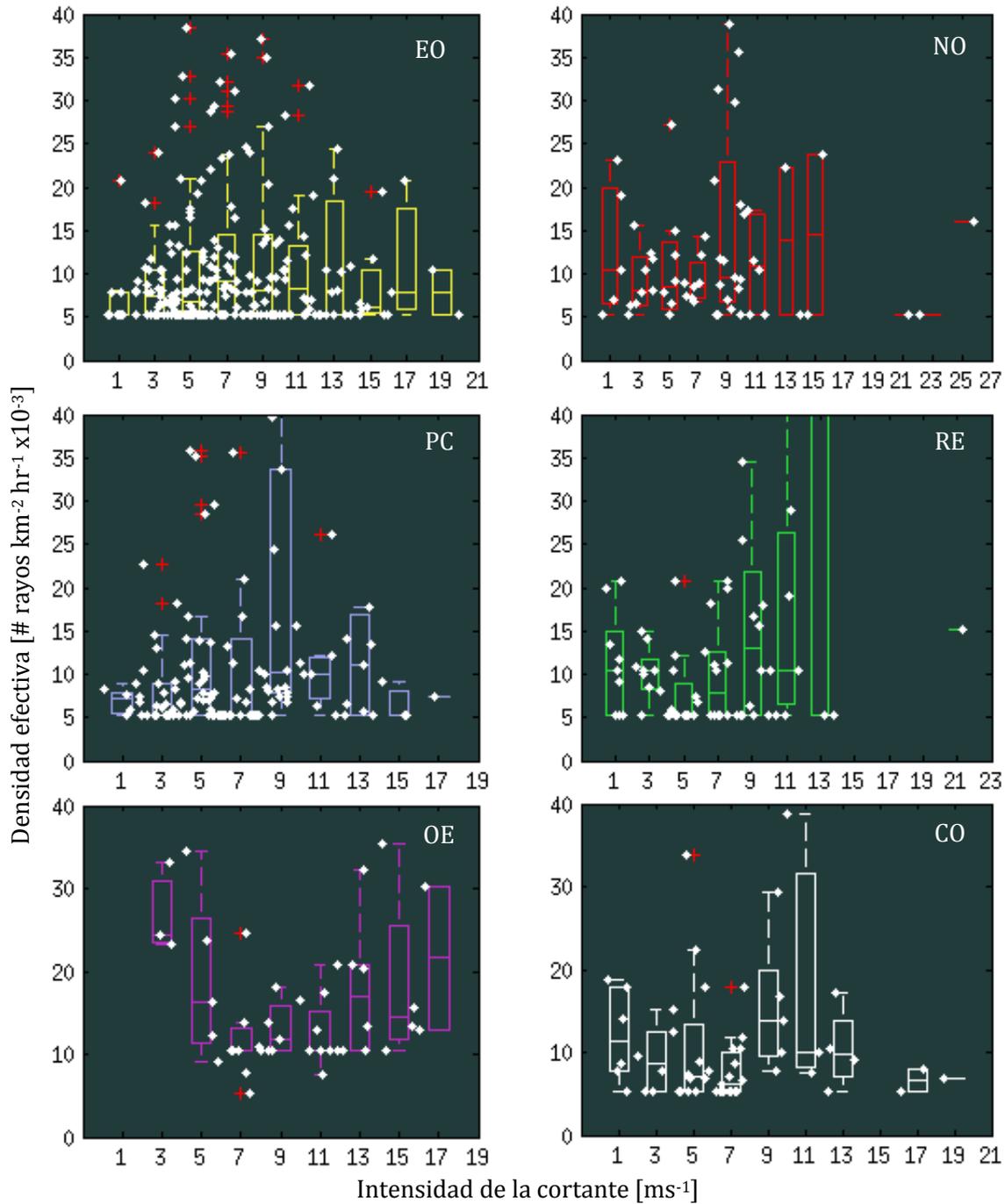
También se puede observar que la mediana de todos los boxplot en todos los clústeres no muestra una tendencia clara que permita inferir estadísticamente bajo que rango de intensidades de la cortante la  $\rho_e$  incrementa.

De estos análisis se puede concluir lo siguiente:

- Los  $I_e$  en cada clúster solamente son una fracción de los  $I_r$ , sin embargo los  $I_{en}$  representan bien a los  $I_n$ , de acuerdo a lo discutido acerca de la tabla 8-3.
- Los  $I_{en}$  ocurren con mayor frecuencia cuando la intensidad es de entre 5 o 7  $\text{ms}^{-1}$ , aunque no se observa tendencia alguna que muestre la cortante fomente la convección profunda de tal forma que esta genere relámpagos cuando se comparan los  $I_{en}$  con los  $I_n$  dada un intensidad de la cortante (líneas cian de la figura 8-6).
- La intensidad de la cortante difícilmente influye por si sola en un aumento de la  $\rho_e$  en el núcleo interno, puesto que los valores extremos de  $\rho_e$  ocurren sobre un amplio intervalo de valores de la cortante (entre 4 y 14  $\text{ms}^{-1}$ ).

Finalmente se puede concluir que la cortante no es un factor que influya directamente sobre la  $\rho_e$  en el **núcleo interno**, aunque esta si influye sobre la distribución espacial de la cortante

como ha sido estudiado en el capítulo 5 de esta tesis, así como en los trabajos de Abarca (2011) y Corbosiero (2002).



**Figura 8-6.** Diagramas boxplot de la distribución de la densidad efectiva para diferentes valores de la intensidad de la cortante para cada clúster. Nótese que el eje vertical es el mismo para todos los clústeres, aunque puede haber puntos que se encuentren por encima de este intervalo, mismos que representan al 4.5% de los  $I_{en}$ , aunque se puede deducir que estos puntos extremos son una minoría debido a que se encuentran más allá de los outliers. Los puntos blancos muestran los elementos que componen a cada boxplot y se muestran con el propósito de visualizar cuantos eventos forman cada boxplot.

## Movimiento del CT

En forma análoga a como se ha estudiado la influencia de la cortante sobre los relámpagos en el núcleo interno, se puede hacer lo mismo con la rapidez de traslación de un CT. Sin embargo, los estudios de la rapidez se centran en las asimetrías generadas por este vector sobre la distribución espacial de los relámpagos (Corbosiero & Molinari, 2003) y (Abarca, Corbosiero, & Vollaro, 2011), más que en su posible influencia sobre la cantidad de relámpagos en el núcleo interno o la  $\rho_e$ . En particular Corbosiero y Molinari (2003) observaron que el efecto de la cortante es mayor que el efecto del movimiento en la producción de los relámpagos y que cada uno de estos vectores forma una región en el núcleo interno donde se intensifica la convección (estimada a través de los relámpagos) semejante a una onda azimutal con número de onda 1. Además en su muestra de CTs observaron que el vector de movimiento se encuentra estadísticamente a la izquierda de la cortante. En este trabajo se busca encontrar estos mismos patrones, además se estudiará si las ondas azimutales asociadas a tal cada vector pueden considerarse como tales en un sentido que muestren interferencia constructiva o destructiva según el ángulo formado por estos vectores.

Para determinar si estas regiones convectivas asociadas a estos vectores se comportan como ondas se realizará un histograma de frecuencias en cada clúster del ángulo formado entre la cortante y el vector de movimiento medido en sentido contrario a las manecillas del reloj en cada  $I_e$ , así también se hará otro histograma de la misma variable, pero restringida a cada  $I_{en}$  con el objeto de estimar bajo que ángulos se es más probable que se produzcan relámpagos.

Una vez identificados los ángulos que inhiben la presencia de relámpagos, mismos que supondremos que son los que muestran interferencia destructiva, se analizará bajo que circunstancias de la intensidad de la cortante y de la rapidez de traslación estimada a través de la variable adimensional  $U^* = U_C/U_M$ , donde  $U_C$  es la intensidad de la cortante y  $U_M$  es la rapidez de traslación, que valores de  $\rho_e$  se encuentran asociados a los ángulos donde se presenta una interferencia destructiva, así como donde no hay interferencia destructiva.

Este análisis puede mostrar la interferencia destructiva ocasionada por las regiones de convección asociadas a cada uno de estos vectores, al tiempo que muestra la posible diversidad de situaciones que reflejan el ambiente asociado a cada clúster.

La figura 8-7 muestra los histogramas de frecuencias de los ángulos entre la cortante y el vector movimiento para cada CT (histogramas con borde delgado), los cuales muestran patrones semejantes a los observados por Abarca (2011), tanto cerca del continente como lejos del continente, y Corbosiero y Molinari (2003). De esta forma el clúster EO (NO), muestra una distribución bimodal (trimodal) con máximos centrados aproximadamente a los  $180^\circ$  y  $340^\circ$  ( $80^\circ$  y  $320^\circ$ ), por el contrario el clúster PC (RE) muestra una distribución bimodal con un máximo aproximado a los  $30^\circ$  ( $0^\circ$ ) y a los  $300^\circ$  ( $300^\circ$ ).

Para determinar cuando es más frecuente presenciar actividades eléctricas se realizó el histograma pero restringido a los intervalos  $I_{en}$  (histogramas con borde grueso) y en cada clase se estimó el porcentaje de intervalos que mostraron actividades eléctricas (línea cian).

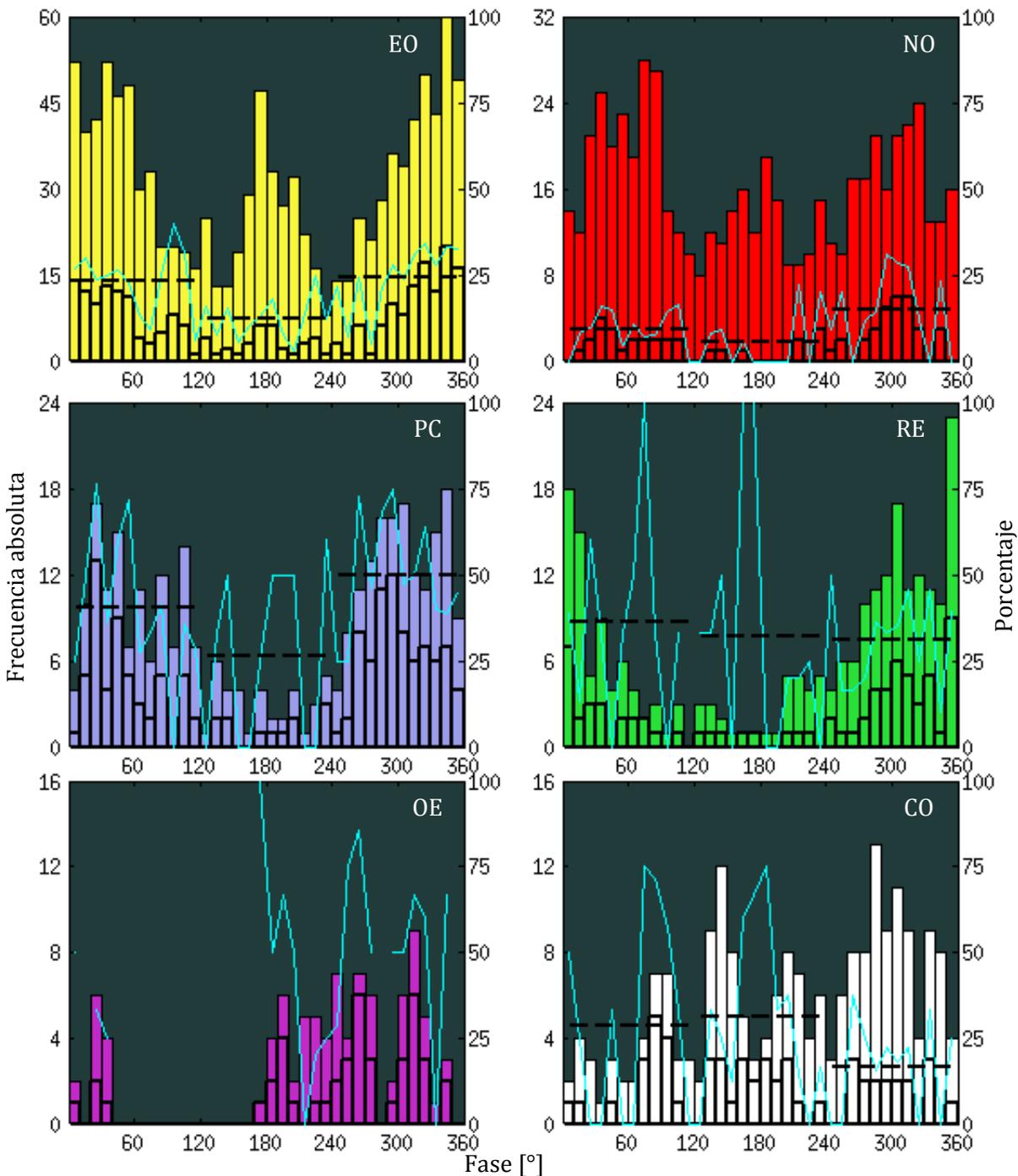


Figura 8-7. Histograma de frecuencias del ángulo entre la cortante y el vector de movimiento (barras con borde delgado) e histogramas de frecuencias del ángulo entre la cortante y el vector de movimiento restringido a los intervalos  $I_{en}$  (barras con borde grueso). Las líneas cian en cada clase muestran el porcentaje de  $I_{en}$  con respecto a los  $I_e$  de cada clase. Las líneas punteadas muestran el promedio de la línea cian cada  $120^\circ$ . Nótese que el clúster OE no tiene líneas negras puesto que no hay suficientes clases para calcularlas.

Las líneas cian revelan que en los clústeres EO, NO y PC (75% de los CTs de la muestra) las actividades convectivas tienden a ser menos frecuentes cuando la diferencia angular (fase) entre la cortante y el vector de movimiento se encuentra entre los  $120^\circ$  y los  $240^\circ$ , esta

situación se observa con ayuda de las líneas negras punteadas en los clústeres mencionados, las cuales representan el valor promedio de la línea cian cada  $120^\circ$  [ $0^\circ, 120^\circ$ ], [ $120^\circ, 240^\circ$ ] y [ $240^\circ, 360^\circ$ ], sin embargo en los clústeres restantes no se observa dicho comportamiento, esto puede ser debido a que hay pocos intervalos (clústeres RE y OE) para tener una muestra representativa del comportamiento, o bien, debido a una amplia variabilidad en el comportamiento de la fase en CTs individuales, así como en la variabilidad ambiental en la que se encuentran los CTs (clúster CO).

Con ayuda de las figuras 4-4 y 8-4 resulta fácil determinar el azimut de la cortante en cada clase de los diferentes histogramas de la figura 8-7, así como su relación con el movimiento de los CTs de cada clúster, de esta forma en el clúster EO es frecuente que la cortante provenga del este (en fase con el movimiento del CT) o del oeste (desfasado del movimiento del CT), mientras que en el caso del clúster NO la cortante proviene del sur y del noroeste, esta dirección puede ser debido a la región de alta presión localizada en el pacífico norte cuando los CTs migran hacia el norte.

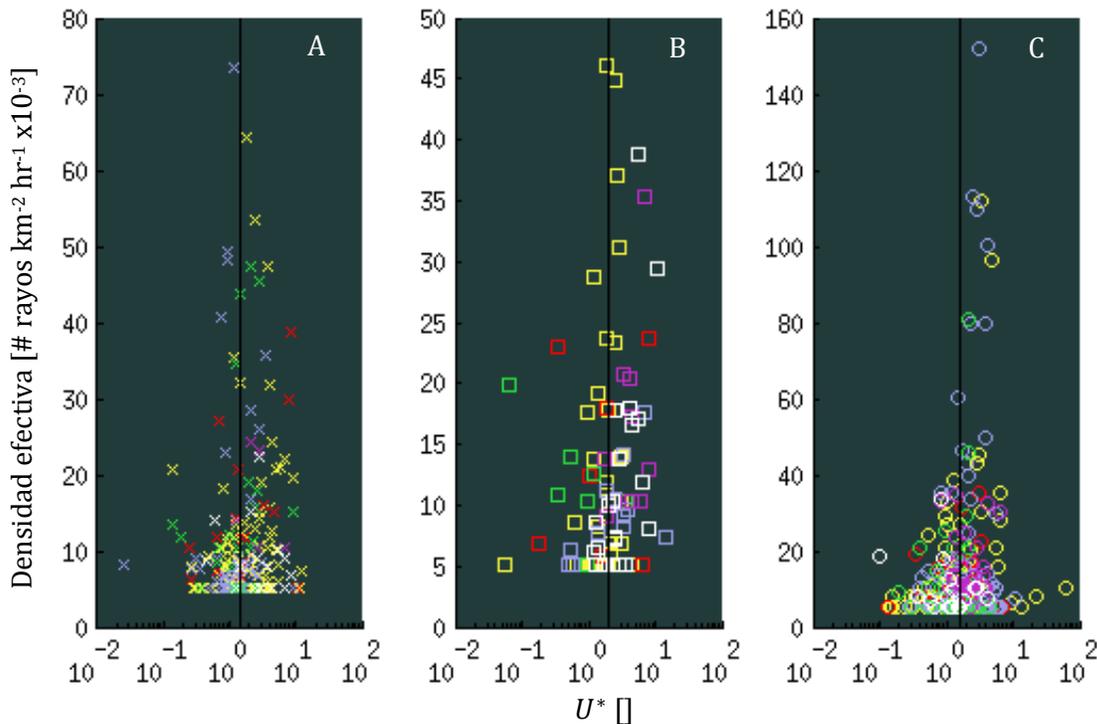
En el caso de los clústeres PC y RE, la cortante se encuentra en fase con el movimiento de los CTs, sin embargo Corbosiero y Molinari (2003) observaron que el vector de movimiento se encuentra sistemáticamente a la *izquierda* de la cortante en una muestra de CTs que se encontraban a menos de 400 km de la costa sobre el Atlántico Norte, en tanto que el clúster PC, el cual también consta de CTs que se encuentran a menos de 400 km de la costa, muestra sistemáticamente que el vector de movimiento está a la *derecha* de la cortante. Esto puede ser debido a que los CTs de este clúster, en sus etapas finales se mueven sobre la región noreste o este de una circulación anticiclónica (Lugo, 2011), lo que en conjunción con el efecto beta como discute Corbosiero y Molinari (2003) ocasiona que el movimiento ocurra a la *derecha* de la cortante.

Otra posible razón es que si la cortante advecta cada capa horizontal de aire en función de su altura de la parte ciclónica del CT hacia delante de la cortante, entonces se produce un movimiento a la *derecha* de la cortante (Dengler & Reeder, 1997) y (Jones, 1995). Aunque Corbosiero y Molinari (2003) comentan que hay pocas observaciones de este comportamiento como para confirmar o rechazar esta hipótesis, por lo que resulta necesario investigar la inclinación hacia delante de la cortante en estos ciclones.

Más allá de las posibles causas dinámicas que originan este comportamiento, para propósitos de este trabajo resulta más interesante conocer si existe alguna evidencia adicional que apoye la idea de que estos vectores influyan sobre la convección en forma destructiva, en particular cuando estos se encuentran fuera de fase, estudiando directamente la  $\rho_e$  de cada intervalo cuando estos vectores se encuentren fuera de fase, mismo que se considerará cuando esta tenga valores de entre  $120^\circ$  y  $240^\circ$ . Asimismo también se analizarán los intervalos cuando la fase se encuentra a la izquierda ( $0^\circ$  a  $120^\circ$ ) y a la derecha ( $240^\circ$  a  $360^\circ$ ).

La Figura 8-7 muestra la dispersión entre la variable adimensional  $U^*$  y la  $\rho_e$  cuando el movimiento del CT se encuentra a la izquierda (A), atrás (B) y a la derecha (C) revelando que en los intervalos en que la fase es aproximadamente  $180^\circ$  la  $\rho_e$  disminuye, bajo esta misma

situación es notable que cuando la intensidad de la cortante es semejante a la rapidez de traslación ( $U^* \approx 1$ ), la  $\rho_e$  disminuye drásticamente, esto fortalece la hipótesis de que la influencia sobre la convección tanto de la cortante como del movimiento se comportan como ondas, la cuales puede interferir destructivamente. Además hay que resaltar que la mediana de los valores de  $U^*$  cuando la fase es de  $180^\circ$  es aproximadamente 33% (línea negra vertical en la figura 8-8 B) mayor que cuando los vectores no se encuentran totalmente desfasados (líneas negras verticales de la Figura 8-8 A y C), indicando que la mitad de los  $I_{en}$  cuando la fase es de  $180^\circ$ , la cortante tiene que ser más intensa (con respecto a la rapidez de traslación) para generar convección profunda y esta a su vez que produzca™ relámpagos.



**Figura 8-8.** Diagrama de dispersión entre la densidad efectiva y la variable adimensional  $U^*$  cuando la fase se encuentra entre  $0^\circ$  y  $120^\circ$  (A),  $120^\circ$  y  $240^\circ$  (B) y  $240^\circ$  y  $360^\circ$  (C). Los colores muestran a que clúster pertenece cada intervalo. Nótese que en cada figura la escala vertical es diferente. Las líneas negras indica la mediana de los valores de  $U^*$  para cada fase con los siguientes valores 1.47, 2.05, 1.55 respectivamente. Los colores muestran a que clúster pertenece cada punto con el mismo código de colores que la Figura 8-7.

Finalmente vale la pena resaltar que existe una relación entre la variable  $U^*$  y la  $\rho_e$  como muestra la figura 8-8 donde, sin importar la fase,  $\rho_e$  crece sustancialmente cuando la intensidad de la cortante es aproximadamente igual a la rapidez de traslación, pero si estos vectores se encuentran desfasados  $180^\circ$  entonces la intensidad de la cortante tiene que ser mucho mayor que la rapidez para generar regiones de convección profunda. Estas observaciones apoyan la hipótesis que tanto el vector de movimiento como la cortante influyen sobre la convección en forma independiente, aunque sus efectos pueden vigorizarla o inhibirla dependiendo de la fase entre estos dos vectores, además el movimiento del CT es menos influyente sobre la convección que la cortante requiriéndose que para que sea posible alcanzar valores máximos de  $\rho_e$  es necesario la intensidad de la cortante sea mayor que la rapidez de traslación.

### **Temperatura de la superficie del mar.**

Una de las condiciones necesarias más frecuentes que se mencionan en la literatura para que pueda formarse o mantenerse un CT es que este se encuentre sobre aguas cálidas cuya SST sean mayores a 25 o 26°C, según la fuente que se consulte. Sin embargo, pocos estudios se han hecho para estudiar alguna posible relación directa entre la SST y (explícitamente) la convección en el núcleo interno de los CTs, solamente Corboisiero et al (2013) ha estudiado alguna posible relación directa entre la SST sobre la convección en el núcleo interno, por lo resulta difícil comparar con más trabajos lo que pueda resultar de esta sección.

Aunque en general se sabe que los sistemas convectivos profundos, que se desarrollan sobre los océanos tropicales ocurren principalmente cuando al océano es más cálido que la atmósfera puesto que bajo estas condiciones pueden generarse flujos de calor del océano a la atmósfera, siempre y cuando exista convergencia de aire en niveles inferiores, lo cual ocurre dentro del núcleo interno, al menos en un sentido puntual (no necesariamente ocurre que en todo el núcleo hay convección profunda al mismo tiempo).

Para evaluar la influencia de la SST sobre la  $\rho_e$  en el núcleo interno se estimará esta sobre cada intervalo de cada clúster empleando la ecuación (A.4.4) sobre una región descrita como en (A.4.5) empleando la malla del producto MW + IR OI SST.

En este punto hay que hacer notar que si bien, la SST varía a lo largo del día, esta experimenta cambios pequeños y casi imperceptibles en presencia de una cubierta nubosa y de oleaje (Kawai & Wada, 2007), como ocurre bajo sobre el área de influencia de un CT, de esta forma se puede considerar al único valor diario de la temperatura del producto MW + IR OI SST como un valor representativo de la SST a lo largo del día.

La SST asociada a cada intervalo en cada clúster será estudiada en forma semejante a las variables anteriores, es decir comparando el histograma de frecuencias de la SST sobre los  $I_t$  con el mismo pero restringido a los  $I_n$  en cada clúster y posteriormente se analizará un diagrama de dispersión entre la  $\rho_e$  y la SST en cada clúster.

La Figura 8-9 muestra los histogramas de frecuencias de la SST sobre los  $I_t$  (histograma con borde delgado) y restringido a los  $I_n$  (histograma con borde grueso), comparando la fracción de intervalos con al menos un relámpago en cada clase de los histogramas de todos los clústeres la Figura 8-9 revela una tendencia (a partir de los 25°C) en la cual la probabilidad de formar relámpagos se incrementa al incrementarse la SST al menos hasta un valor crítico de SST, después del cual ocurren diferentes comportamientos, por ejemplo en el caso de los clústeres EO y NO (RE) las probabilidades de que se formen relámpagos en el núcleo interno se incrementan conforme la SST aumenta hasta 28.5°C (29.5°C), sin embargo para SST mayores este umbral la probabilidad disminuye drásticamente. El clúster CO muestra un comportamiento similar (cuando la SST es superior a 24°C) solo que el umbral de SST donde las probabilidades decrecen drásticamente es aproximadamente 28°C. Estos resultados concuerdan con lo reportado en la literatura, donde la convección sobre los océanos tropicales se incrementa cuando la SST se encuentra entre los 26 y 29°C, ocurriendo que para SST mayores esta disminuye drásticamente (Sabin, 2013).

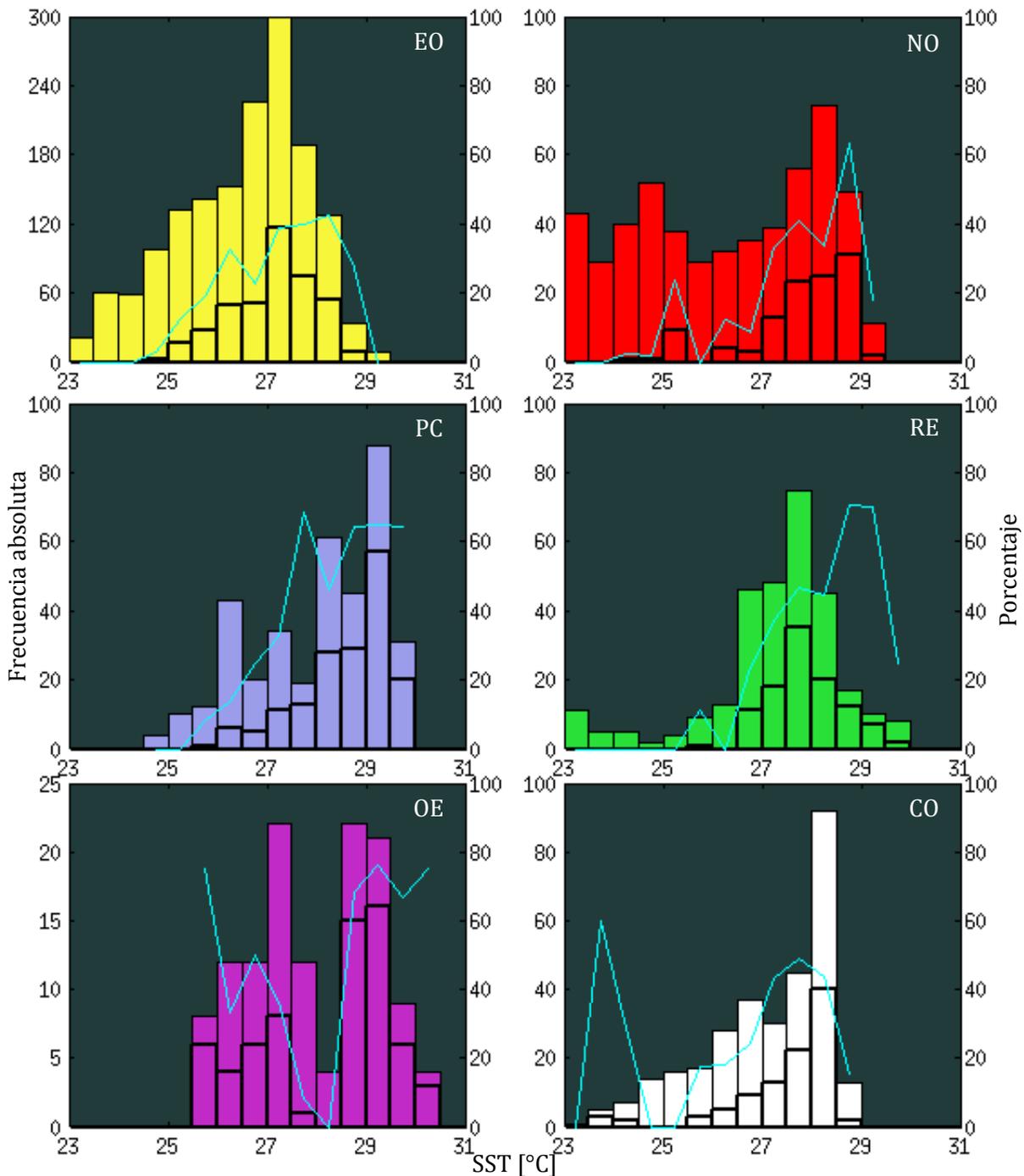


Figura 8-9. Igual que la Figura 7-5 solo que para valores de la SST en intervalos de 0.5°C. Nótese que el eje vertical izquierdo es diferente para cada clúster.

Por el contrario el clúster PC, tiene un comportamiento diferente cuando la SST alcanza valores mayores a 28.5°C, en este caso la probabilidad se mantiene constante, contrario a lo que ocurre en los clústeres descritos en el párrafo anterior. Finalmente el clúster OE muestra tendencia alguna, sin embargo este clúster exhibe la gran variabilidad de comportamientos que pueden ocurrir en CTs individuales y se puede rescatar el hecho que

comparte con los otros clústeres que las probabilidades de que se formen relámpagos se incrementan cuando la SST tiene valores aproximados de 29°C.

De esta forma, se puede notar que la influencia de la SST sobre la convección profunda no depende del clúster en cuestión, hasta un valor crítico donde posiblemente otros factores que si varíen a lo largo de cada clúster jueguen un papel decisivo y, de acuerdo a lo observado en el clúster OE resulta natural suponer que en casos individuales esta influencia puede no ser apreciable y que no sea consistente con las tendencias estadísticas.

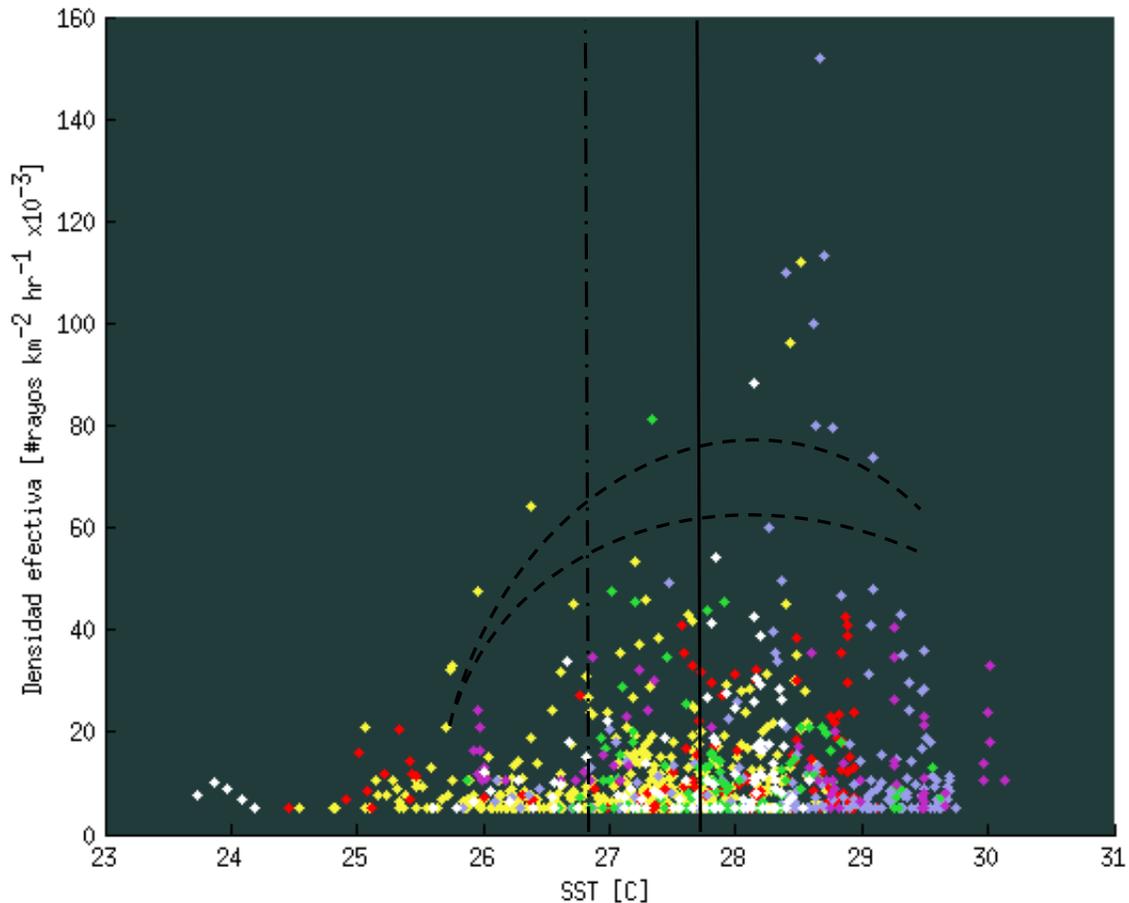


Figura 8-10. Dispersión entre la SST y la densidad efectiva para todos los clústeres. El código de colores es el mismo que el de la Figura 8-8. La línea vertical continua muestra la mediana de la SST para los intervalos con al menos un relámpago en el ojo, la línea vertical con puntos y barras muestra la mediana de la SST de todos los intervalos, las líneas curvas separan la gran mayoría de los puntos (eventos típicos) de los puntos anómalos (eventos extremos) y muestra una región donde no hay eventos.

En forma muy general se puede esbozar la influencia de la SST sobre la convección profunda de la siguiente forma *a mayor SST la probabilidad de presenciar relámpagos en el núcleo interno se incrementa hasta un valor crítico de SST*. Análogamente como se ha estudiado la influencia de varias variables sobre la  $\rho_e$ , se ha hecho un diagrama de dispersión, mostrado en la Figura 8-10, entre la  $\rho_e$  y la SST.

Lo primero que muestra este diagrama es una región donde hay muy pocos puntos, mostrada esquemáticamente entre las líneas punteadas, esta región separa la mayoría de los puntos de los puntos extremos. Esta separación permite estudiar los puntos por debajo de la región, los cuales pueden resultar más significativos en términos estadísticos que los valores extremos.

Considerando únicamente los puntos que se encuentran por debajo de las líneas punteadas como eventos típicos se observa que no existe una tendencia entre la  $\rho_e$  y la SST, sin embargo el diagrama revela que los eventos típicos tienen el potencial de alcanzar valores más intensos a ser más frecuentes y a ser pueden alcanzar valores más altos en la  $\rho_e$  cuando la SST se incrementa, en particular para valores de SST mayores a 26°C, independientemente del clúster que sea, lo cual indica que esta influencia sobre la convección es una característica independiente de la región geográfica sobre la que se encuentre algún CT.

Comparando la mediana de la SST (26.9°C) de todos los intervalos (línea vertical punteada, que coincide con el percentil 22 de la SST restringida a los  $I_n$ ) con la mediana de la SST (22.8°C) con al menos un relámpago en el núcleo interno (línea vertical sólida) se puede observar que la mitad de los  $I_n$  se encuentran aproximadamente 1°C más alto que la mitad de los  $I_t$  siendo esto un indicador de que la convección se vigoriza enormemente (ocupando una mayor superficie) cuando el CT se encuentra en aguas con SST mayores a 26.9°C considerando que entre los 26.9 y 27.9°C se encuentra aproximadamente el 30% de los  $I_n$  y para valores menores a 26.9°C solamente se encuentra aproximadamente el 20% de los  $I_n$ .

Finalmente se puede concluir que a mayor SST mayor posibilidad de presenciar relámpagos en el núcleo interno (independientemente del clúster que sea), al tiempo que para valores de SST mayores a 26.9°C la  $\rho_e$  puede incrementarse (como se observa en los puntos que se encuentran por debajo de las líneas punteadas), lo que puede ser interpretado como una condición necesaria para que la  $\rho_e$  se incremente, sin embargo otros elementos pueden jugar un papel importante para incrementar la  $\rho_e$  en el núcleo interno.

### **Influencia de la cantidad de CCN y cercanía de la costa sobre la $\rho_e$ .**

La influencia continental es un factor que permite incrementar sustancialmente la cantidad de relámpagos como lo muestra la figura 5-1, o bien la  $\rho_e$  restringida al núcleo interior como se puede observar en los diferentes diagramas de dispersión entre la  $\rho_e$  y diversos factores a lo largo de este trabajo; en este sentido cabe preguntarse si los CCN juegan un papel decisivo en la convección en el interior de CTs, como lo muestra el trabajo de Kucieńska (2013) donde los CCN influyen sobre la producción de relámpagos en tormentas originadas en el Golfo de Tehuantepec.

Para estudiar la influencia de los aerosoles sobre la convección en el núcleo interno y estimar la cantidad de aerosoles disponible en las inmediaciones de un CT se ha considerado que la cantidad de aerosoles disponibles en una región puede ser aproximada a través del AOD obtenido del producto diario de nivel 3 MOD08\_D3MODIS (MOD08) del satélite Terra (como se describe en Orígenes de datos). De esta forma es posible determinar la cantidad promedio de dicho producto sobre un disco de 400 km de radio con centro en la posición del CT en cada

intervalo empleando la ecuación (A.4.4) y analizar la posible relación entre el producto MOD08 y la  $\rho_e$ , así como la posible relación entre el producto MOD08 y la cercanía a la costa.

Al respecto del producto MOD08 cabe mencionar las siguientes consideraciones:

- La estimación del producto MOD08 se encuentra fuertemente limitada por la cubierta nubosa, lo cual puede ocasionar que en celdas convectivas el valor del AOD se vea disminuido hasta un 40% (Kocha, C., et al, 2013), sin embargo, consideraremos que esta subestimación sobre el AOD no varía mucho sobre todos los CTs.
- La cantidad de aerosoles presente no es una condición suficiente que influya sobre la convección, también se debe considerar como interacciona cada especie de aerosol con el vapor de agua.
- Los aerosoles pueden experimentar una variación diurna (Kocha, C., et al, 2013), la cual depende fuertemente de las condiciones atmosféricas que los advectan. En México no se han hecho estudios que permitan estudiar esta variación diurna, pero es aceptable asumir que esta ocurra aunque se desconoce la importancia de esta en la región costera. Sin embargo, consideraremos que las estimaciones del satélite hechas al mediodía local son representativas de un intervalo más amplio de tiempo (6 horas antes y 6 después del paso del satélite, con el propósito de abarcar un intervalo de tiempo antes y uno después del paso del satélite), en forma análoga a las estimaciones de Kucieńska et. al (2012) esta influencia sobre los relámpagos, puesto que los máximos relativos de actividad convectiva tienden a ocurrir durante la mañana.

Respecto a la influencia continental sobre la convección es útil recordar que una posible relación entre ambas variables, si bien debe ser significativa esta no tiene por qué resultar sencilla, puesto que la orografía varía a lo largo de esta, siendo una de las principales características que pueden modular sobre la convección, forzándola y actuando como frontera del viento, y en menor medida, se espera que la cantidad de CCN (considerando las regiones continentales como fuentes de CCN las cuales varían a lo largo del tiempo y el espacio) influya en la convección, vigorizándola, (aunque no siempre ocurra esto en cada intervalo).

La influencia de la costa sobre la convección ha sido evidenciada a lo largo de este trabajo (principalmente en los diagramas de dispersión donde se observa que los  $I_n$  del clúster PC alcanzan valores más altos de  $\rho_e$ ), sin embargo resultaría interesante conocer con mayor detalle si existe una relación cuando la distancia entre el centro del CT y la costa es menor a 400km, lo cual es la situación de los CTs del clúster PC.

Para estudiar la existencia de estas posibles relaciones se elaborarán diagramas de dispersión entre la distancia del centro del CT a la costa con la  $\rho_e$  en el núcleo interno (únicamente del clúster PC). La distancia del CT a la costa será aproximada como la fracción de la superficie de un disco de 400 km de radio centrada en el centro del CT que se encuentra sobre el continente (véase el capítulo 4, sección Cercanía a tierra de los CTs de cada clúster), de esta forma más que la distancia se puede evaluar la influencia del continente cuando una porción de la superficie de un CT se encuentra sobre el continente. Este diagrama espera mostrar que entre

más cerca se encuentre un CT de la costa este tendrá mayor posibilidades de producir relámpagos.

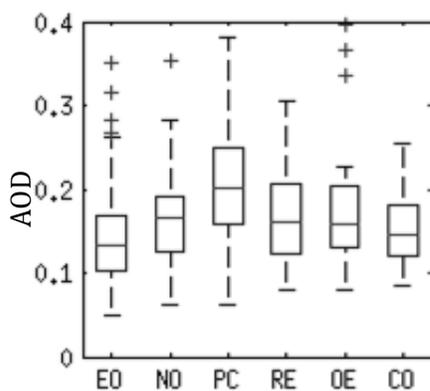
Para evaluar la influencia de los CCN, aproximada a través del AOD, sobre la convección en el núcleo interno de los CTs estableceremos las siguientes hipótesis, las cuales deberán comprobarse para considerar factible la influencia de los CCN sobre la convección en CTs:

1. Los continentes son fuentes de CCN, por lo que los valores máximos de AOD en cada intervalo deben corresponder a intervalos cerca de la costa y
2. los CCN (AOD) vigorizan la convección en los CTs.

Para comprobar la validez de la primera suposición debe ocurrir que entre más lejano se encuentre un CT de la costa, la cantidad de CCN en sus inmediaciones debería disminuir, este comportamiento debe observarse en los valores de AOD asociados a los intervalos de cada clúster, de esta forma el clúster EO debe mostrar en general valores más pequeños de AOD que el clúster PC. Esta relación se muestra crudamente en un diagrama boxplot (figura 8-11) de cada clúster del valor del AOD en cada intervalo con estimación de AOD, nótese que los valores del AOD solamente se encuentran disponibles una vez al día por lo que los intervalos con registros de AOD ( $I_{AOD}$ ) son menores que los intervalos totales ( $I_t$ ).

La segunda hipótesis debe revelar que en presencia de un ambiente con un valor mayor de AOD la convección se debe incrementar, por lo que una tendencia positiva debería observarse en un diagrama de dispersión entre estas variables.

La figura 8-11 muestra el diagrama boxplot de los  $I_{AOD}$  en cada clúster, donde claramente se observa que una tendencia entre los clústeres EO NO y PC, la cual muestra que, entre más cerca del continente los valores de AOD se incrementan, aunque existe una gran variabilidad de estos valores en todos los clústeres, esta figura confirma la hipótesis 1 expuesta párrafos arriba.



**Figura 8-11.** Diagramas boxplot de los intervalos con estimaciones de AOD ( $I_{AOD}$ ) en cada clúster.

Respecto a los clústeres RE, OE y CO se observa que su mediana es ligeramente menor que la mediana del clúster NO. Excluyendo los valores extremos del clúster OE, la variabilidad del AOD en el clúster RE es la mayor de estos tres clústeres, respecto a esta situación, hay que recordar que los CTs de este clúster en ocasiones se encuentran cerca de la costa y en ocasiones lejos de ella (figura 4-3 y 4-5) por lo que pueden compartir intervalos que bien podrían tener características del clúster PC o del EO. En particular los valores extremos del clúster OE corresponden con el CT Bárbara (2007), el cuál se formó en las costas Chiapas y se mantuvo cercano a tierra, por lo que estos valores son representativos de  $I_{AOD}$  cercanos a la costa apoyando la hipótesis de que el AOD es una

buena aproximación de los CCN, corroborándose la primera hipótesis que debería cumplir una buena aproximación de los CCN.

Para evaluar la segunda hipótesis se realizó un diagrama de dispersión entre el valor de AOD y la  $\rho_e$  en cada  $I_{AOD}$  de cada clúster, mostrado en la figura 8-12, esta figura muestra que para valores típicos de  $\rho_e$  (figura derecha) en ningún clúster existe una relación que indique que los valores más altos de AOD la convección tienda a vigorizarse, por el contrario, la figura muestra que los valores más bajos de AOD tienen mayores posibilidades de formar más relámpagos, incluso los valores atípicos de la  $\rho_e$  (figura izquierda) ocurren cuando el valor de AOD es mínimo, incluso se podría decir la relación entre el AOD y la  $\rho_e$  es opuesta a lo propuesto en la segunda hipótesis. A continuación se discuten tres posibles causas de este resultado contrario a lo esperado.

1) Si bien el AOD, de acuerdo a la figura 8-11, resulta una buena primera aproximación para estimar los CCN en las inmediaciones del CT, las estimaciones hechas por el satélite TERRA se ven afectadas por la presencia de cubiertas nubosas, impidiendo obtener valores adecuados de AOD en comparación con los estimados en situaciones cuando no se presenta una cobertura nubosa; esta posibilidad resulta poco probable puesto que el diagrama de dispersión entre AOD y  $\rho_e$  es semejante en todos los clústeres (figura 8-11).

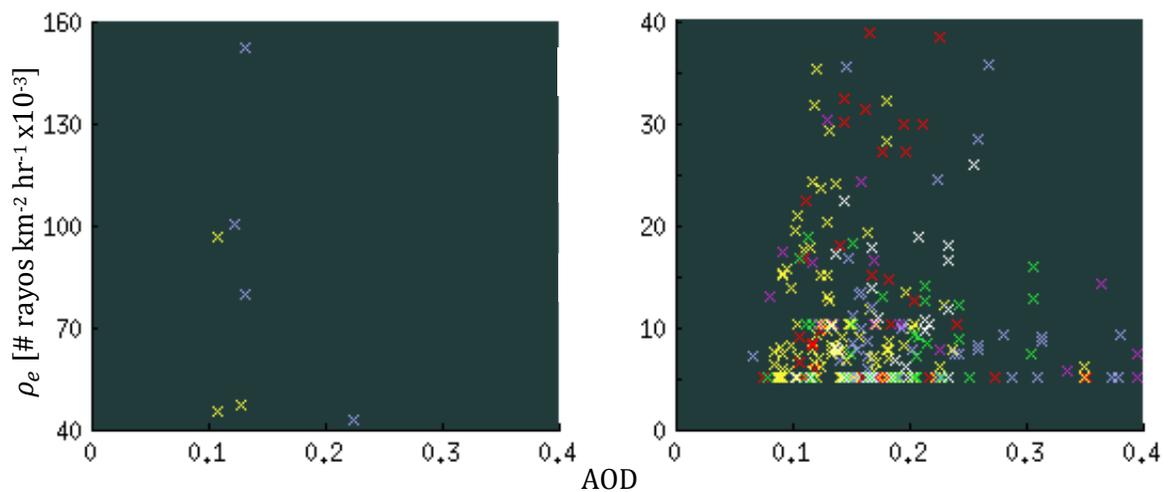


Figura 8-12. Diagrama de dispersión para todos los clústeres entre la  $\rho_e$  y el AOD. En la izquierda se muestran los valores de la  $\rho_e$  atípicos, semejante a lo discutido en la sección anterior, y en la derecha se muestran los valores típicos de  $\rho_e$ . El código de colores para distinguir a cada clúster es el mismo que en la figura 8-9.

2) No existe relación alguna en intervalos individuales entre el AOD y la  $\rho_e$ ; rechazar o aceptar esta posibilidad requiere de investigaciones adicionales; sin embargo el trabajo de Rosenfeld et al (2008) y de Kucieńska et al (2011) y (2012) consideran que la influencia de los aerosoles sobre la producción de relámpagos es importante, aunque estos estudios se centran en intervalos de tiempo y espacio mucho mayores que un disco de 400 km de radio y mucho mayores a tres horas, por lo que deben hacerse estudios más detallados de aerosoles en CTs.

3) Respecto a estos estudios. Empleando modelos numéricos con *toda la física* Khain et al (2010) observaron que la intrusión de aerosoles en las inmediaciones del CT inhiben la

convección en el núcleo interno de estos, y plantearon un mecanismo para explicar esta situación, la cual consiste en que las bandas de lluvia disponen de una fuente de aerosoles fomentando la convección en estas, en contraste con el núcleo interno, el cual dispone de una cantidad limitada de aerosoles implicando que las celdas convectivas del núcleo tiendan a disiparse; estos resultados numéricos concuerdan con lo observado en la figura 8-12; a pesar de esta concordancia no es posible excluir la posibilidad 2) o incluso la 1), aunque se esperaría que ocurriera en menor medida que la 2).

Estas tres posibles explicaciones indican que la influencia directa de los aerosoles sobre la producción de relámpagos en CTs debe ser estudiada con mayor detalle.

La influencia continental a cortas distancias sobre la  $\rho_e$  solamente puede ser evaluada únicamente en el clúster PC (los  $I_t$  de este clúster siempre se encuentran a menos de 400 km de la costa, en los otros clústeres los intervalos a menos de 400 km de la costa son esporádicos). En este sentido la costa occidental del México se encuentra delimitada por la Sierra Madre Occidental actuando como una frontera rígida del viento, de esta forma si se considera que las parcelas del CT conservan su momento angular, al interactuar con la frontera vertical rígida (la Sierra Madre Occidental) las parcelas aumentarían su vertical tangencial, y aquellas que se encuentren lo suficientemente cerca del centro del CT ascenderían lo cual podría vigorizar la convección y se podría incrementar la producción de relámpagos.

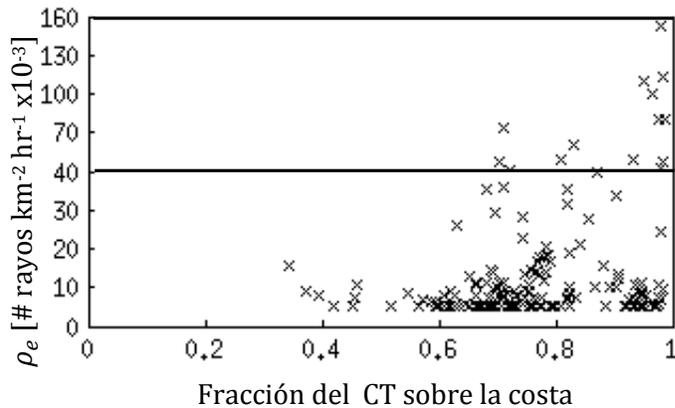


Figura 8-13. Diagrama de dispersión entre la fracción del CT sobre el océano y la densidad efectiva  $\rho_e$  para los  $I_n$  del clúster PC. Nótese el cambio de escala en el eje vertical.

Sin embargo el mecanismo propuesto en el párrafo anterior no parece explicar lo que muestra la Figura 8-13, donde la  $\rho_e$  disminuye conforme el CT ocupe mayor espacio sobre el continente indicando un comportamiento opuesto a lo que se planteó en el párrafo anterior. De esta forma se propone otro mecanismo el cual pretende explicar lo observado en la Figura 8-13, y consiste en suponer que fricción entre las parcelas y la Sierra Madre, esto ocasionaría que el

momento angular no se conserve, ralentizando las parcelas lo suficientemente cerca de la superficie, lo cual se puede traducir en la disipación del CT.

Además, dada la compleja orografía de la Sierra, la interacción entre las parcelas y la frontera pudiera ser más complicada pudiendo ocurrir movimientos turbulentos cerca de la Sierra, los cuales podrían propagarse y disminuir el movimiento angular de las parcelas a la par que tenderían a disipar el CT y disminuir la convección en el núcleo interno.

En caso de resultar cierto este mecanismo los CTs del Atlántico que atraviesen la península de Yucatán (la cual es una planicie minimizando los efectos orográficos) no deberían

experimentar una disminución de la  $\rho_e$  tanto como los CTs del clúster PC, por lo que este mecanismo podría ser corroborado elaborando un diagrama de dispersión semejante al de la Figura 8-13 de los CTs que atraviesan la península de Yucatán, y considerando que, al tiempo que los CTs se acercan a tierra estos generalmente se debilitan, aumentando las probabilidades de que la  $\rho_e$  disminuya (figura 7-4), por lo que si se comparan los CTs del clúster PC, con los que atraviesan la península de Yucatán se podría estudiar que efecto domina más sobre la  $\rho_e$ , la interacción del CT con la orografía o la disipación que ocurre al acercarse tierra adentro.

Otra forma de corroborar este mecanismo propuesto es emplear modelos numéricos de los CTs del clúster PC y comparar la convección que ocurriría en el núcleo interno si se considera que la superficie continental es plana con la convección que ocurriría si se considera la orografía real de la Sierra Madre Occidental.

Finalmente se puede concluir que los CTs que se encuentran lo suficientemente cerca de la costa, aproximadamente menos del 75% de la superficie del CT debe estar sobre el océano, aproximando el CT como un disco de 400 km de radio, los efectos de los aerosoles tienden a suprimirse (en caso de existir), al menos en el Pacífico Nororiental y la convección tiende a disminuir conforme el CT se va internando en tierra; sin embargo se requieren estudios adicionales para determinar si esta disminución en la  $\rho_e$  es ocasionada por la orografía, la disminución de la intensidad que experimentan los CTs al internarse en tierra o bien una combinación de ambas situaciones.

Adicionalmente la posible relación entre el AOD y la  $\rho_e$  concuerda con la hipótesis de Khain (2010), sin embargo deben realizarse estudios adicionales para confirmar que este mecanismo realmente ocurre en el núcleo interno de los CTs de esta cuenca.

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES FINALES

Los 62 CTs con nombre de cuatro temporadas en el PNO (2006-2009) fueron clasificados en 6 clústeres diferentes, de acuerdo a su tipo de trayectoria y al ambiente que los rodea para intentar aislar los posibles efectos que tienen diversos factores ambientales sobre la convección en el núcleo interno (véase capítulo 4).

En cada clúster se realizaron diversos experimentos con el propósito de estudiar la relación entre la convección en el núcleo interno aproximada a través de la cantidad de relámpagos que se forman en esta región en un intervalo de tiempo dado, con diversos factores ambientales y parámetros de los CTs, tales como movimiento e intensidad de este; así como un estudio empírico de las posibles relaciones o patrones que sigan los relámpagos en esta región. Las conclusiones generales cada uno de estos estudios se puede clasificar en dos tipos, de acuerdo al comportamiento que ocurra en cada clúster, las cuales son:

- I. Comportamientos y patrones que siguen todos los CTs independientemente del clúster al que pertenezcan y
- II. Comportamientos y patrones que varían entre clúster y clúster.

A continuación se resumen los resultados de cada estudio de acuerdo a su tipo como se definió en el párrafo anterior.

### **Comportamientos, relaciones y patrones comunes a todos los clústeres.**

I.1 La superficie ocupada por los relámpagos del núcleo interno ocurridos en un intervalo de tiempo, estimada a través de la cantidad de puntos malla que ocupan, puede expresarse con muy buena aproximación como una potencia de la cantidad de relámpagos del núcleo interno ocurridos en ese mismo intervalo de tiempo. Dicha potencia es común a todos los clústeres.

I.2 La cantidad máxima de relámpagos que hay en un punto de malla del núcleo interno ocurridos en un intervalo de tiempo, puede expresarse con muy buena aproximación como una potencia de la cantidad de relámpagos del núcleo interno ocurridos en ese mismo intervalo de tiempo. Dicha potencia es común a todos los clústeres.

I.3 Las densidades relativas de todas las DECRM y DECRC acumulada siguen la misma función de densidad acumulada, sin embargo, los parámetros de esta función varían a lo largo de cada clúster.

I.4 Tanto las DECRM como las DECRC acumuladas de cada clúster muestran un máximo de la cantidad de relámpagos en el núcleo interno, un mínimo muy marcado en las bandas interiores (anillo de 100-200km) y otro máximo en las bandas exteriores (anillo de 200-400 km).

I.5 La densidad efectiva restringida al núcleo interno puede incrementarse y alcanzar valores máximos cuando la intensificación es mínima, y decrece cuando el valor absoluto de la intensificación se incrementa, con un ligero sesgo hacia valores positivos de intensificación.

I.6 La densidad efectiva restringida al núcleo interno puede incrementarse y alcanzar valores máximos cuando la intensidad de un CT se encuentra entre 30 y 60 kts, conforme la intensidad del CT aumenta, la densidad efectiva decrece abruptamente.

I.7 La producción de relámpagos en el núcleo interno parece estar influenciada por el ángulo formado entre la cortante y el vector de movimiento, de tal forma que cuando este ángulo es aproximadamente  $180^\circ$  la producción de relámpagos tiende a minimizarse, en caso de que se produzcan relámpagos la intensidad de la cortante tiene que ser aproximadamente el doble de la rapidez de traslación. Además cuando estos vectores forman un ángulo menor la densidad efectiva puede incrementarse sustancialmente con respecto a los valores de densidad efectiva cuando el ángulo es  $180^\circ$ . Este comportamiento es un indicador de que estos vectores pueden interactuar constructiva o destructivamente sobre la producción de relámpagos, dependiendo del ángulo que formen y de sus magnitudes, de tal forma que en general la intensidad de la cortante debe ser mayor que la rapidez de traslación de este.

I.8 Se observó que a mayor SST (hasta un umbral aproximado de  $28^\circ\text{C}$  después existen variaciones en cada clúster) la probabilidad de que se formen relámpagos en el núcleo interno se incrementa. Además se observó un umbral de  $26^\circ\text{C}$  a partir de los cuales la densidad efectiva se dispara pudiendo alcanzar los valores máximos de densidad efectiva, para valores menores de este umbral, la densidad efectiva se minimiza.

I.9 Se observó que la densidad efectiva en el núcleo interno puede incrementarse y alcanzar sus valores máximos cuando el AOD alcanza valores mínimos relativos a cada clúster, mientras que los valores mayores de AOD se encuentran asociados a valores mínimos en densidades efectivas.

### **Comportamientos, relaciones y patrones diferenciados entre los clústeres.**

II.1 Las DECRM acumuladas de cada clúster presentan asimetrías azimutales, mismas que varían a lo largo de cada clúster, en este sentido, en los clústeres EO y NO se observó que los relámpagos del núcleo interno tienden a formarse en la parte frontal y a la izquierda, esto último se observa en medida en el clúster NO.

Por el contrario en el clúster PC los relámpagos del núcleo interno tienden a producirse en la parte posterior del CT, mientras que en el clúster RE estos relámpagos se producen sobre el vector de movimiento.

En el clúster restante (OE) los relámpagos de esta región no siguen un patrón bien definido, mientras que en el caso del clúster CO los relámpagos tienden a formarse en la parte posterior derecha, opuesto a lo que ocurre en el clúster PC.

Mientras que en las bandas exteriores la gran mayoría de los relámpagos se forma en la parte frontal derecha, esto ocurre en todos los clústeres excepto en el clúster OE, posiblemente debido a que estos CTs son muy pequeños, ni tampoco ocurre en el clúster CO, donde los relámpagos se encuentran diseminados a lo largo de todas las bandas exteriores.

II.2 Las DECRC acumuladas de cada clúster presentan asimetrías azimutales, mismas que varían a lo largo de cada clúster, siendo que en el núcleo interno, los relámpagos ocurridos en los clústeres EO y NO se encuentran en la parte frontal del este vector, aunque en el clúster EO el máximo se encuentra a la izquierda, mientras que en el clúster NO el máximo se encuentra a la derecha.

En el caso del clúster PC ocurre totalmente lo opuesto, los relámpagos del núcleo interno tienden a formarse en la parte posterior y a la izquierda de la cortante. Mientras que en el caso del clúster RE, los relámpagos se forman sobre la dirección de la cortante, el los clústeres OE y CO muestran un comportamiento semejante.

En el caso de las bandas exteriores se observa que los relámpagos en todos los clústeres tienden a formarse en la parte frontal de la cortante, aunque dependiendo del clúster en cuestión los relámpagos se forman a la derecha (NO, PC y RE) o bien sobre el vector cortante (EO), en el caso de los clústeres CO y OE (en este clúster no se formaron relámpagos en las bandas exteriores) no hay un patrón claro.

II.3 La probabilidad de que en un intervalo de tiempo se produzcan o no relámpagos depende de a) la intensidad y b) la intensificación.

- a) Los CTs que se encuentran cerca de la costa (clústeres PC y RE) muestran que cuando la intensidad es mayor a 110 kts estos siempre producen relámpagos en el núcleo interno, en particular el clúster PC muestra que a mayor intensidad, mayores son las posibilidades de que se formen relámpagos en el núcleo interior.

En el caso de los CTs que se encuentran lejos de la costa (clústeres EO, NO), y en los clústeres CO y OE no existe una relación entre la presencia de relámpagos en el núcleo interno y la intensidad; si bien en todos los clústeres se puede observar que para valores de intensidad de entre 30 y 40 kts las probabilidades de que se formen relámpagos se incrementan.

- b) En el caso de los clústeres EO y PC se observó que las probabilidades de presenciar relámpagos en el núcleo interno se incrementan conforme se incrementa la intensificación, estas relaciones se observan en mucho medida en el clúster NO (para valores de intensificación pequeños), RE y OE (en el caso de considerar el comportamientos de los valores extremos), sin embargo en el clúster CO no se observa ninguna relación entre estas dos variables.

II.4 Las series de tiempo de la densidad efectiva en el núcleo interno en los clústeres EO, NO y OE tienden a mostrar estadísticamente que los máximos relativos de estas series ocurren durante la madrugada, mientras que los mínimos tienden a ocurrir durante la tarde, mostrando una anticorrelación entre los máximos y mínimos.

Por el contrario los clústeres PC y RE muestran que los máximos de estas series de tiempo ocurren durante la mañana y durante la noche, los cuales parecen seguir una oscilación semidiurna, sin embargo los mínimos tienden a ocurrir durante la mañana (PC) o durante la tarde (RE) y no se encuentra anticorrelacionada con la frecuencia de los máximos.

Los máximos relativos ni los mínimos de estas series no muestran algún patrón en el caso del clúster CO.

II.5 Se encontró en los clústeres EO, NO y PC el ángulo formado entre la cortante y el vector de movimiento en un intervalo puede ser útil para determinar la posibilidad de que se formen relámpagos, puesto que se observó que cuando este ángulo tiene valores aproximados de  $180^\circ$  las posibilidades de que se formen relámpagos disminuyen considerablemente, por el contrario cuando este ángulo tiene valores menores a  $120^\circ$  (el vector de movimiento se encuentra a la izquierda de la cortante) las posibilidades se incrementan considerablemente, pero alcanzan su máximo cuando el ángulo tiene valores mayores a  $240^\circ$  (el vector de movimiento se encuentra a la derecha de la cortante).

En el caso del clúster RE se observa que en promedio, las probabilidades de que se formen relámpagos disminuyen conforme el ángulo se incrementa, alcanzando su mínimo cuando el vector de movimiento se encuentra a la derecha; sin embargo en este clúster puede observarse que los intervalos donde este ángulo tenga aproximadamente  $180^\circ$  son muy pocos, por lo que es posible que una muestra más grande de CTs de este tipo puedan revelar un comportamiento semejante al de los clústeres mencionados arriba, anulando este comportamiento "extraño".

En el caso del clúster OE no se puede evaluar una posible relación semejante a la mencionada en los párrafos anteriores debido a que este clúster contiene muy pocos intervalos.

Finalmente el clúster CO muestra un comportamiento propio, donde las probabilidades de que se formen relámpagos en el núcleo interno alcanzan su máximo cuando el ángulo vale aproximadamente  $180^\circ$ . Este comportamiento es un ejemplo de la gran variabilidad individual que puede experimentar un CT, mostrando que esta relación válida en los clústeres EO, NO y PC no se cumple.

Respecto a este ángulo también es relevante mencionar que en el caso de los CTs (clústeres EO y PC) que se encuentran lejos de tierra, es común encontrar que este ángulo tenga valores de  $180^\circ$ , mientras que en el caso de los CTs que se encuentran cerca de tierra (clústeres PC y RE) es poco frecuente que estos vectores se encuentren desfasados  $180^\circ$ , sin embargo la relación entre la posibilidad de que se formen relámpagos y este ángulo se mantiene.

II.6 Se observó que la producción de relámpagos en los CTs muy cercanos a tierra (clúster PC) se ven influenciados por la cercanía a la costa, observándose que conforme los CTs se acercan a la costa la densidad efectiva en el núcleo tiende a disminuir. Esto puede ser debido a la fricción entre las parcelas de aire y la superficie orográfica, o bien a movimientos turbulentos ocasionados por la cercanía con la orografía continental, ralentizando las parcelas y ocasionando que estas pierdan momento angular, implicando que estas no puedan alcanzar grandes velocidades verticales.

### **Conclusiones finales.**

El comportamiento de la densidad efectiva en el núcleo es una variable que depende únicamente de la cantidad de relámpagos en el núcleo interno, aunque en estos momentos no es posible plantear alguna explicación física de esta relación, la cual en caso de encontrarse podría servir para conocer a fondo los procesos microfísicos de separación de carga en estos sistemas, así como la rapidez y eficiencia con la que las cargas eléctricas se separan. Sin embargo, en este trabajo se plantea esta relación únicamente como una relación empírica.

Con ayuda de esta variable, en lugar de la cantidad de relámpagos que ocurren en el núcleo interno, se ha estudiado la influencia de diversos factores ambientales que influyen en la convección profunda



## APÉNDICE **A**

### Operaciones sobre una superficie esférica.

Los CTs se trasladan sobre la superficie planetaria, misma que consideraremos esférica, sobre esta superficie curva algunas variables de interés sufren ligeras modificaciones con respecto a los cálculos realizados en coordenadas cartesianas.

#### Base vectorial en coordenadas esféricas.

Una base ortogonal sobre una superficie esférica está dada por los siguientes vectores:

$$\hat{\theta} = \begin{pmatrix} -\cos \varphi \sin \theta \\ -\sin \varphi \sin \theta \\ \cos \theta \end{pmatrix} \quad \hat{\varphi} = \begin{pmatrix} -\sin \varphi \\ \cos \varphi \\ 0 \end{pmatrix} \quad \hat{r} = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \theta \\ \sin \varphi \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} \quad (\text{A.1.1})$$

Donde el lado derecho de cada ecuación está representado en coordenadas cartesianas y el lado izquierdo son los vectores base en la dirección normal a la superficie esférica ( $\hat{r}$ ), en la dirección meridional apuntando hacia el norte ( $\hat{\theta}$ ) y en la dirección zonal apuntando hacia el este ( $\hat{\varphi}$ ).

#### Azimut de la trayectoria.

Se define el azimut como el ángulo comprendido entre el vector que apunta hacia el norte y el vector tangente a la trayectoria de una partícula en un tiempo dado.

La trayectoria de una partícula arbitraria sobre una superficie esférica se puede aproximar a través de una curva poligonal, cuyos segmentos tienen la siguiente ecuación paramétrica:

$$\begin{pmatrix} \theta(s) \\ \varphi(s) \\ r(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta_i + (\theta_{i+1} - \theta_i)s \\ \varphi_i + (\varphi_{i+1} - \varphi_i)s \\ \mathbf{r}_0 \end{pmatrix} \quad (\text{A.2.1})$$

Donde  $(\varphi_i, \theta_i, \mathbf{r}_0)$  denota la posición inicial del segmento  $i$ -ésimo de la poligonal,  $(\varphi_{i+1}, \theta_{i+1}, \mathbf{r}_0)$  la posición final de dicho segmento,  $\mathbf{r}_0$  es el radio de la esfera y  $s \in [0, 1]$ , es importante notar que  $s$  no necesariamente representa el tiempo.

El vector que apunta hacia el norte se puede representar como la siguiente trayectoria, asociada a un segmento de la poligonal:

$$\begin{pmatrix} \theta_N(s) \\ \varphi_N(s) \\ r_N(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta_i + (\theta_{i+1} - \theta_i)s \\ \varphi_i \\ r_0 \end{pmatrix} \quad (\text{A.2.2})$$

Cuando  $s = 0$  se tiene que  $\begin{pmatrix} \theta \\ \varphi \\ r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta_N \\ \varphi_N \\ r_N \end{pmatrix}$ , por lo que el azimut al inicio de este segmento de la poligonal viene dado por:

$$\cos \alpha_z = \frac{\overline{T|_{s=0}} \cdot \overline{T_N|_{s=0}}}{|\overline{T|_{s=0}}| |\overline{T_N|_{s=0}}|} \quad (\text{A.2.3})$$

Donde  $\overline{T|_{s=0}}$  es el vector tangente a la poligonal y  $\overline{T_N|_{s=0}}$  es el vector tangente a la trayectoria que apunta hacia el norte, Así:

$$\overline{T} = r_0 \Delta \theta \hat{\theta} + r_0 \Delta \varphi \cos \theta(s) \hat{\varphi} \quad (\text{A.2.4})$$

$$\overline{T_N} = r_0 \Delta \theta \hat{\theta} \quad (\text{A.2.5})$$

Donde  $\Delta \theta = \theta_{i+1} - \theta_i$  y  $\Delta \varphi = \varphi_{i+1} - \varphi_i$ , por lo que el azimut  $\alpha_z$  cuando  $s = 0$  viene dado por:

$$\cos \alpha_z = \sqrt{\frac{\Delta \theta^2}{\Delta \theta^2 + (\Delta \varphi \cos \theta_i)^2}} \quad (\text{A.2.6})$$

Dado que esta forma de estimar el azimut limita los valores de  $\alpha_z$  a la rama que va de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  del rango de la función arcocoseno, es necesario hacer un pequeño ajuste dependiendo del signo, tanto de  $\Delta \theta$  como de  $\Delta \varphi$  de acuerdo a la siguiente tabla:

	$\Delta \varphi \geq 0$	$\Delta \varphi < 0$
$\Delta \theta > 0$	$\alpha_z$	$2\pi - \alpha_z$
$\Delta \theta \leq 0$	$\pi - \alpha_z$	$\pi + \alpha_z$

Tabla A-1. Ajuste que se debe realizar sobre el ángulo  $\alpha_z$  dependiendo del signo de  $\Delta \theta$  y  $\Delta \varphi$ .

Esta forma de aproximar el azimut resulta muy conveniente cuando se conocen solamente algunas posiciones a lo largo de la trayectoria de dicha partícula.

### Velocidad de traslación sobre una esfera.

La velocidad de traslación de un objeto que se mueve sobre una poligonal descrita por la ecuación (A.2.1) tiene la siguiente forma.

$$\overline{V} = r_0 \dot{s}(t) \Delta \theta \hat{\theta} + r_0 \dot{s}(t) \Delta \varphi \cos \theta(s) \hat{\varphi} \quad (\text{A.3.1})$$

Donde  $\dot{s}(t)$  es la derivada del parámetro  $s$  con respecto al tiempo. Cuando  $s$  es una función lineal del tiempo,  $\dot{s}(t)$  adquiere la siguiente forma:

$$s(t) = \frac{\Delta t}{T} \Rightarrow \dot{s}(t) = \frac{1}{T} \quad (\text{A.3.2})$$

Donde  $\Delta t = t - t_i$ ,  $t_i$  es el tiempo cuando la partícula se encuentra en  $(\theta_i, \varphi_i, r_0)$  y  $t$  es el tiempo cuando la partícula se encuentra en alguna parte del segmento de la poligonal, por lo que  $T$  es el tiempo que tarda la partícula en ir del punto  $(\theta_i, \varphi_i, r_0)$  al punto  $(\theta_{i+1}, \varphi_{i+1}, r_0)$ , nótese que el rango de (A.3.2) es consistente con el dominio  $s$  en (A.2.1).

Combinando (A.3.1) y (A.3.2) resulta:

$$\bar{\mathbf{V}} = r_0 \frac{\Delta \theta}{T} \hat{\theta} + r_0 \frac{\Delta \varphi}{T} \cos \theta(t) \hat{\varphi} \quad (\text{A.3.3})$$

El vector resultante de la ecuación (A.3.3) se puede reescribir en términos de su magnitud y de su dirección (azimut). Su magnitud es (rapidez):

$$|\bar{\mathbf{V}}| = \frac{r_0}{T} \sqrt{\Delta \theta^2 + \Delta \varphi \cos \theta(t)^2} \quad (\text{A.3.4})$$

Si  $\theta_i \gg \Delta \theta$  y empelando (A.2.1) se tiene que  $\cos \theta(t) \approx \cos \theta_i$ . Con esta aproximación se puede estimar la rapidez con la que se traslada la partícula en cualquier punto del segmento de la poligonal.

Y su azimut es:

$$\cos \alpha_z = \frac{(\Delta \theta / T)^2}{(\Delta \theta / T)^2 + (\Delta \varphi \cos(\theta_i) / T)^2} = \frac{v^2}{v^2 + u^2} \quad (\text{A.3.5})$$

Donde  $vT = r_0 \Delta \theta$  y  $uT = r_0 \Delta \varphi \cos \theta(t)$ , que no son más que las velocidades, meridionales y zonales respectivamente.

### Valor medio de una variable sobre una región en una superficie esférica.

El valor medio sobre una región  $\Sigma \subseteq \mathbb{R}^n$  de la variable  $F$  se define como:

$$\langle F \rangle = \int_{\Sigma} F d\mathbf{V} \times \left( \int_{\Sigma} d\mathbf{V} \right)^{-1} \quad (\text{A.4.1})$$

En el caso de una región  $\Sigma \subseteq \mathbf{S}^2$  de radio  $r_0$ , definida como el conjunto de puntos tales que su distancia a un punto  $\mathbf{P}$  es menor o igual a la distancia  $D$ , el valor medio de la variable  $\langle F \rangle$  se reescribe como:

$$\langle F \rangle = \int_{\Sigma} F(\theta, \varphi) r_0^2 \cos \theta d\theta d\varphi \times \left( \int_{\Sigma} r_0^2 \cos \theta d\theta d\varphi \right)^{-1} \quad (\text{A.4.2})$$

La representación formal de  $\Sigma$  puede definirse como:

$$\Sigma = \left\{ (\theta, \varphi, r_0) \mid \cos \frac{D}{r_0} \leq \cos \theta_0 \cos \theta \cos(\varphi - \varphi_0) + \sin \theta_0 \sin \theta \right\} \quad (\text{A.4.3})$$

Es fácil observar que la integral  $\int_{\Sigma} r_0^2 \cos \theta d\theta d\varphi = 2\pi r_0^2 \left[ 1 - \sin \left( \frac{\pi}{2} - \frac{D}{r_0} \right) \right]$ .

(A.4.2) y (A.4.3) pueden reescribirse de la siguiente forma en caso de que F sea una variable discreta:

$$\langle F \rangle = \frac{r_0^2}{A} \sum_{n,m} F(\theta_n, \varphi_m) \times (\theta_{n+1} - \theta_n) \times (\varphi_{m+1} - \varphi_m) \times \cos \theta_n \quad (\text{A.4.4})$$

$$\Sigma = \left\{ (\theta_n, \varphi_m, r_0) \mid \cos \frac{D}{r_0} \leq \cos \theta_0 \cos \theta_n \cos(\varphi_m - \varphi_0) + \sin \theta_0 \sin \theta_n \right\} \quad (\text{A.4.5})$$

Nótese que  $\langle F \rangle = \langle F(\theta_0, \varphi_0) \rangle$  y que  $\Sigma = \Sigma(\theta_0, \varphi_0)$ .

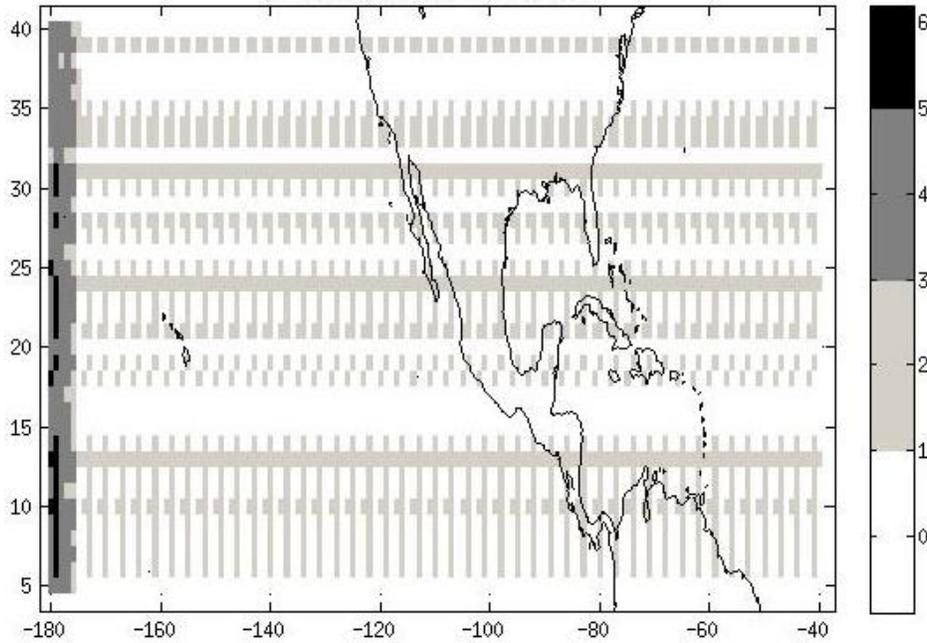


Figura A-1. Evaluación de la función de error sobre el dominio y parámetros mencionados en el párrafo anterior. La escala de grises se muestra en %.

Si  $F = 1 \Rightarrow \langle F \rangle = 1$ . En el caso de un dominio discreto, esta función prueba ayuda a estimar el error porcentual  $\varepsilon$  inducido por la discretización del dominio, de esta forma  $\varepsilon$  adquiere la siguiente forma:

$$\varepsilon \left( \theta_0, \varphi_0, \frac{D}{r_0}, \Delta\theta, \Delta\varphi \right) = \frac{1 - \langle 1 \rangle}{A} \times 100\% \quad (\text{A.4.6})$$

Donde  $\Delta\theta = (\theta_{n+1} - \theta_n)$ ,  $\Delta\varphi = (\varphi_{m+1} - \varphi_m)$  y  $\langle 1 \rangle \approx 1$ .

Es fácil mostrar que si  $D r_0^{-1} \gg \theta_{n+1} - \theta_n$  y  $D r_0^{-2} \gg (\varphi_{m+1} - \varphi_m) \cos \theta_n$   $\forall \theta_n, \theta_{n+1}$  y  $\varphi_m, \varphi_{m+1}$  entonces  $\varepsilon \rightarrow 0$ .

La Figura A-1 muestra la estimación de  $\varepsilon(\theta_0, \varphi_0, 0.078, 0.3^\circ, 0.3^\circ)$  donde  $(\theta_0, \varphi_0) \in [(5^\circ, 40^\circ)] \times [-180^\circ, -40^\circ]$ . Que es el caso de una Tierra esférica de radio  $r_0 = 6371.2 \text{ km}$  con  $D = 500 \text{ km}$ , en esta situación el error es menor al 6% sobre la región.

### Rotación sobre una superficie esférica.

Una rotación  $R_\alpha$  por un ángulo  $\alpha$  alrededor de un punto fijo sobre una superficie esférica se puede definir como la rotación por un ángulo  $\alpha$  en el plano perpendicular al vector que va del origen al punto fijo, llamado eje de rotación.

Esta rotación se puede visualizar en la Figura A-2: la rotación por un ángulo  $\alpha$  alrededor del punto  $(1,0,0)$  ocasiona que los puntos pertenecientes a la curva  $a$  sean transformados en los puntos de la curva  $a'$  (en negrita) preservando su componente  $x$  (arco con puntos), así la rotación, en este caso puede representarse de la siguiente forma:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (\text{A.5.1})$$

En coordenadas esféricas (A.5.1) se reescribe de la siguiente forma:

$$r_0 \begin{pmatrix} \cos \varphi' \cos \theta' \\ \sin \varphi' \cos \theta' \\ \sin \theta' \end{pmatrix} = r_0 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \theta \\ \sin \varphi \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} \quad (\text{A.5.2})$$

La rotación (A.5.2) se puede reescribir como una función exclusiva de coordenadas esféricas, i.e.  $R_\alpha: S^2 \rightarrow S^2$ . Así  $R_\alpha$  adquiere la siguiente representación:

$$\begin{pmatrix} \sin \theta' \\ \tan \varphi' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \varphi \cos \theta \cos \alpha + \sin \theta \sin \alpha \\ \tan \varphi \cos \alpha - \tan \theta \sec \varphi \sin \alpha \end{pmatrix} \quad (\text{A.5.3})$$

Cuando el punto fijo no se encuentre sobre el eje  $X$ , basta hacer una traslación tanto en la latitud como en la longitud de tal forma que el punto fijo se encuentre sobre el eje  $X$ , resultando:

$$\begin{pmatrix} \sin \theta' \\ \tan \varphi' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \Delta\varphi \cos \Delta\theta \cos \alpha + \sin \Delta\theta \sin \alpha \\ \tan \Delta\varphi \cos \alpha - \tan \Delta\theta \sec \Delta\varphi \sin \alpha \end{pmatrix} \quad (\text{A.5.4})$$

Donde  $\Delta\theta$  y  $\Delta\varphi$  son las diferencias, tanto latitudinal como longitudinal de un punto de la superficie y el punto fijo.

Finalmente, si se necesita rotar con respecto al azimut de algún vector resulta que  $R_\alpha = R_{\alpha_z}$

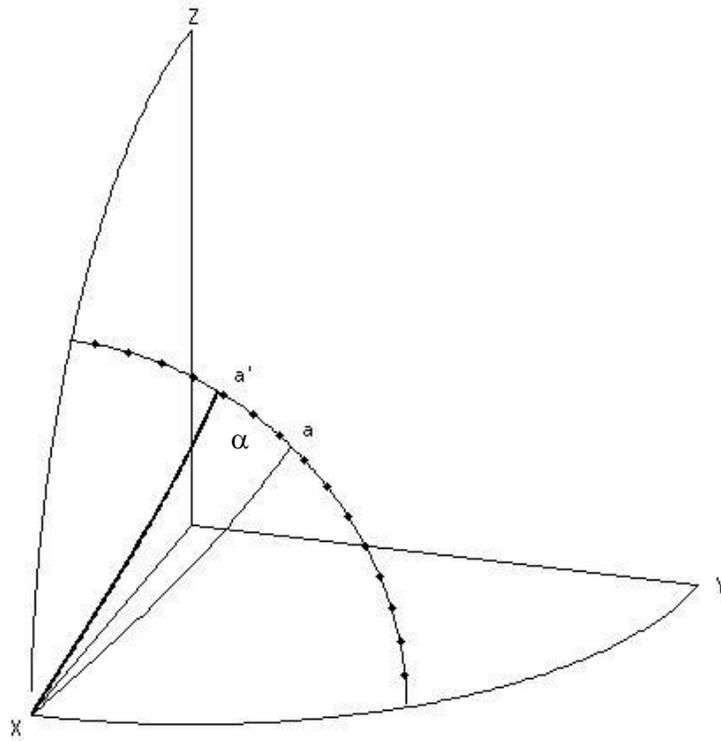


Figura A-2. Rotación sobre una esfera por un ángulo  $\alpha$ .

## APÉNDICE **B**

### Proyección Cónica Conforme de Lambert.

En ocasiones, las variables atmosféricas no se encuentran en coordenadas geográficas  $(\theta, \varphi)$ , sino en coordenadas  $(X, Y)$  propias de alguna proyección cartográfica, en esta situación es deseable encontrar una relación explícita entre el conjunto de coordenadas  $(X, Y)$  y el conjunto de coordenadas  $(\theta, \varphi)$ . En el caso particular de la proyección cónica conforme de Lambert (CCL) con un paralelo estándar, esta relación además de las coordenadas  $(\theta, \varphi)$  depende de varios parámetros, por lo que,  $(X, Y) = \text{CCL}(\theta, \varphi, \theta_F, \varphi_F, E_F, N_F, \theta_1, \theta_2, a, e)$ , donde los parámetros de la proyección son:  $\theta_F, \varphi_F, E_F, N_F, \theta_1, \theta_2, a, e$  y  $\theta_1 = \theta_2$ , mismos que se describen más adelante.

Supondremos que el lector está familiarizado con los conceptos básicos de cartografía, por lo que no ahondaremos en el significado del concepto de cada parámetro de la proyección, y que solamente se desea conocer el valor  $(X, Y)$  dada una coordenada  $(\theta, \varphi)$

La transformación de las coordenadas  $(X, Y)$  de una proyección CCL con dos paralelos estándar en coordenadas esféricas  $(\theta, \varphi)$  de acuerdo al método de operación de datos con coordenadas, código 9802 elaborado por el European Petroleum Survey Group (EPSG)<sup>1</sup> es la siguiente:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_F + r \sin \alpha \\ N_F + r_F - r \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (\text{B.1.1})$$

Donde  $E_F$  es el valor este en el centro de la proyección,  $N_F$  es el valor norte en el centro de la proyección,  $r_F$  es el radio del paralelo en la latitud central de la proyección. Además:

$m = \cos \theta / (1 - e^2 \sin^2 \theta)^{1/2}$  para  $m_1, \theta_1$  y  $m_2, \theta_2$  donde  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son las latitudes de los paralelos estándar y  $e$  es la excentricidad del elipsoide de revolución.

$t = \tan(\pi/4 - \theta/2) / [(1 - e \sin \theta) / (1 + e \sin \theta)]^{e/2}$  para  $t_1, t_2, t_F$  y  $t$  usando  $\theta_1, \theta_2$  y  $\theta_F$ , donde  $\theta_F$  es la latitud central de la proyección.

$n = \ln(m_1/m_2) / \ln(t_1/t_2)$ .

$F = m_1 / (n t_1^n)$ .

$r = a F t^n$ , para  $r_F$  y  $r$ , donde  $r_F$  es el radio del paralelo de la latitud del falso origen y  $a$  es el semieje mayor del elipsoide

$\alpha = n(\varphi - \varphi_F)$ , donde  $\varphi_F$  es la longitud del centro de la proyección.

---

<sup>1</sup> <http://www.epsg.org/guides/docs/g7-2.pdf>

En el caso de un paralelo estándar, de acuerdo método de operación de datos con coordenadas, código 9801 del EPSG, la transformación es la siguiente:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_F + r \sin \alpha \\ N_F + r_0 - r \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (\text{B.1.2})$$

Donde  $E_F$  y  $N_F$  se definen como en el caso anterior. Además:

$$n = \sin \theta_F.$$

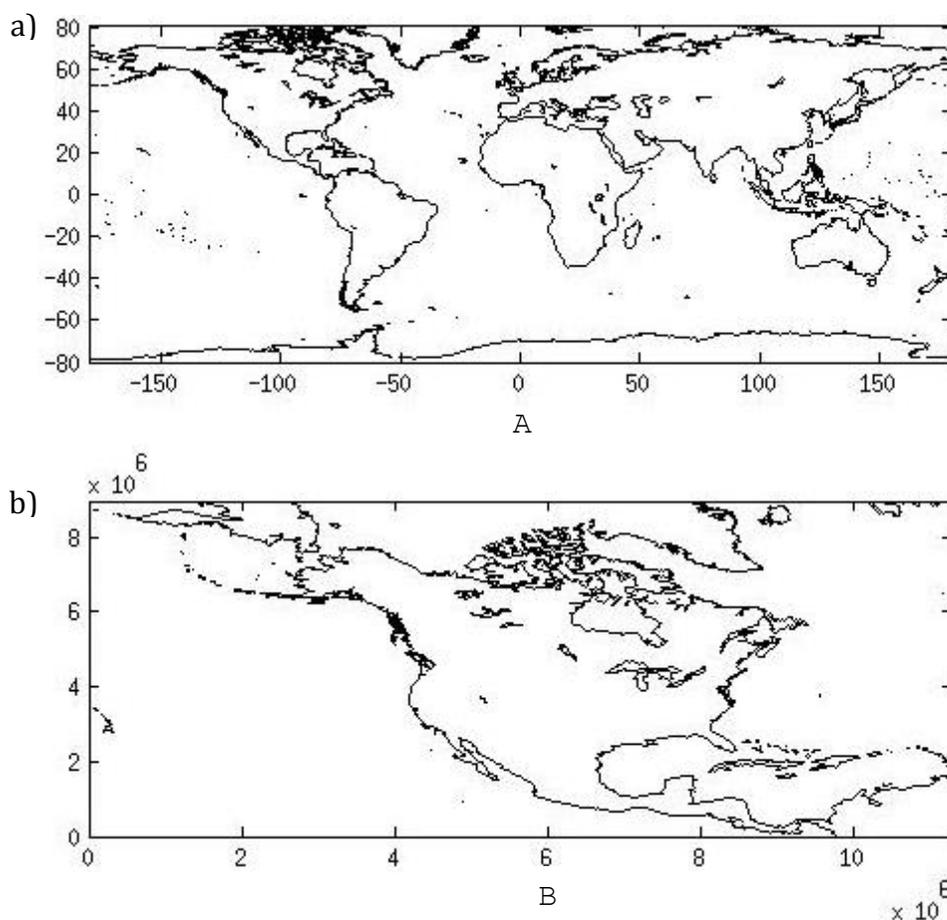
$$r = a F t^n \text{ para } r_0 \text{ y } r.$$

$t$  se evalúa para  $t_0, \theta_F$  y  $t, \theta$  y  $m, F$  y  $\alpha$  se calculan como en la variante de dos paralelos estándar.

Esta transformada analítica resulta fácil de implementar en un código computacional, aunque induce un pequeño error numérico, mismo que se discutirá en el apéndice C.

En la Figura B-1, se muestra la línea de costa (A) y la proyección de Norteamérica bajo la proyección CCL (B), con los siguientes parámetros:

$50^\circ, -107^\circ, 5632642 \text{ m}, 4612545 \text{ m}, 50^\circ, 50^\circ, 6371296 \text{ m}, 0.0008$



**Figura B-1. A. Representación de la superficie terrestre sobre una red  $(\theta, \varphi)$  y B. Transformación de Norteamérica bajo la proyección Cónica Conforme de Lambert, las unidades se encuentran en metros.**

## APÉNDICE C

### Manipulación de datos del North American Region Reanalysis.

El North American Reanalysis Region (NARR), es una base de datos de variables atmosféricas, cuyo dominio espacial cubre Norteamérica y sus zonas adyacentes, el periodo de los datos abarca desde 1970 hasta el presente, estos datos se encuentran espaciados regularmente cada 32463 m, tanto al norte como al este sobre una proyección CCL.

Si se trabaja en coordenadas geográficas, resulta necesario aplicar la transformación  $(X, Y) = \text{CCL}(\theta, \varphi, \theta_F, \varphi_F, E_F, N_F, \theta_1, \theta_2 a, e)$  de los puntos  $(\theta, \varphi)$  de interés para obtener las variables que se encuentran en la malla del NARR. Los parámetros de las coordenadas del NARR son los siguientes:

$$(\theta_F, \varphi_F, E_F, N_F, \theta_1, \theta_2 a, e) = (50^\circ, -107^\circ, 5632727 \text{ m}, 4612613 \text{ m}, 50^\circ, 50^\circ, 6371296 \text{ m}, .0008)$$

En ocasiones es necesario aplicar la transformada inversa, misma que no se ha discutido y puesto que es compleja pero, dentro del conjunto de variables del NARR se incluyen la latitud y a la longitud, por lo que no es necesario calcular la transformada inversa cuando se trabaja con esta base de datos.

En el apéndice B se menciona que la transformación CCL induce errores debido a las aproximaciones numéricas, por lo que en este apéndice estimaremos ese error empleando los parámetros de la proyección del NARR, considerando que cada punto  $(\theta, \varphi)$  del NARR es el valor verdadero asociado al punto  $(X, Y)$  que le corresponde.

De esta forma el error  $\varepsilon$  en metros se puede expresar de la siguiente forma:

$$|\varepsilon(\theta_N, \varphi_N)| = |\text{CCL}(\theta_N, \varphi_N, P_{NARR}) - (X, Y)| \quad (\text{C.1.1})$$

Donde  $(\theta_N, \varphi_N)$  es un punto en coordenadas geográficas perteneciente a la malla NARR y  $P_{NARR}$  son los parámetros de la proyección mencionado anteriormente. Es fácil observar que el error depende de la posición, por lo que el error debe ser evaluado sobre todo el dominio NARR.

El valor máximo de  $|\varepsilon(\theta_N, \varphi_N)|_{max} = 8.4 \text{ m}$ , mientras que en el 99.5% de los puntos del dominio resultó que  $|\varepsilon(\theta_N, \varphi_N)| \leq 6.0 \text{ m}$  (la Tabla C-1 muestra la distribución de los errores, y la Figura C-1 muestra la distribución espacial del error sobre todo el dominio NARR), por lo

que se puede considerar que en el dominio NARR la transformación CCL (B.1.2) induce un error a lo mas de 6 m en cualquier dirección

Error [m]	Porcentaje de puntos de malla [%]	Error [m]	Porcentaje de puntos de malla [%]
$ \varepsilon  \leq 2$	22.7	$4 <  \varepsilon  \leq 6$	38.4
$2 <  \varepsilon  \leq 4$	38.4	$6 <  \varepsilon $	0.5

Tabla C-1. Distribución del error de la proyección CCL en el dominio NARR.

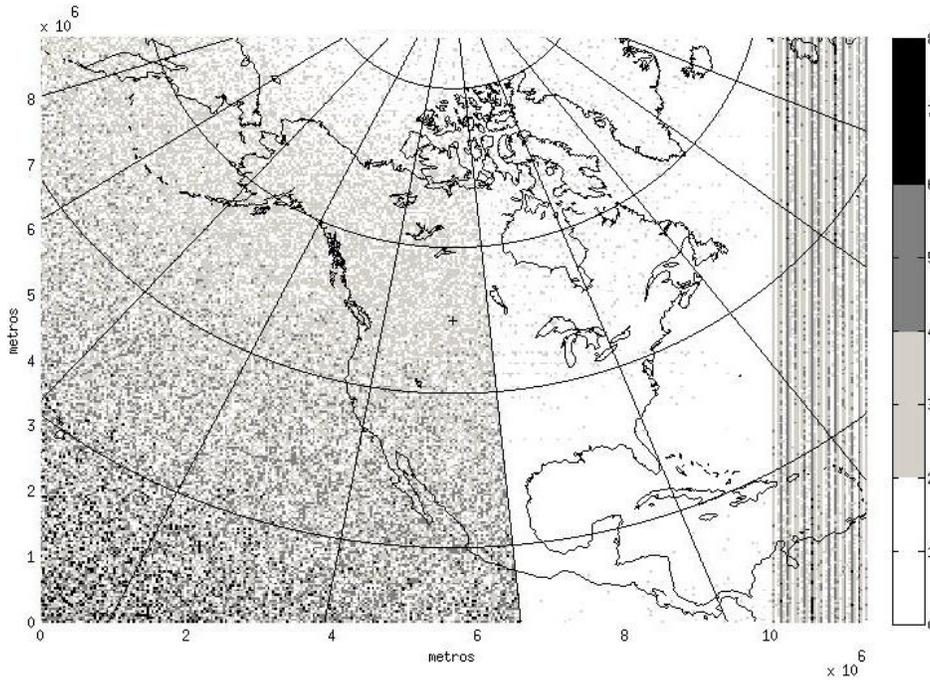


Figura C-1. Distribución espacial de la norma del error en cada punto prueba sobre todo el dominio NARR. La escala de grises se muestra en metros. Se muestra la gradícula con fines ilustrativos.

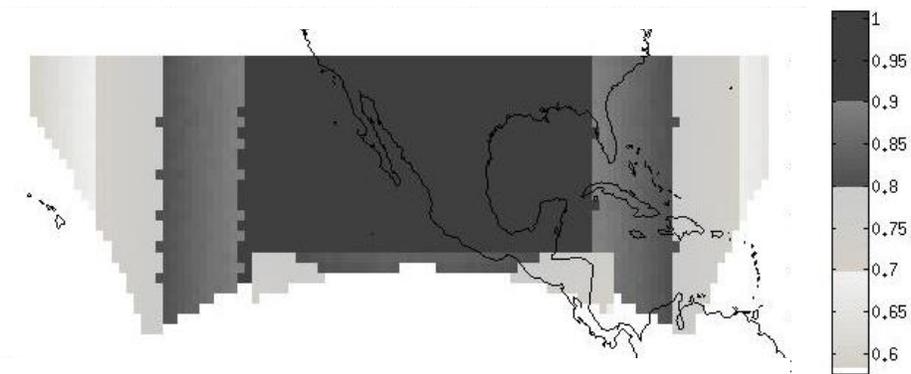
El análisis del error muestra que la transformación CCL resulta útil para conocer los puntos de malla del NARR, puesto que esta transformación tiene un error asociado de  $\pm 6$  m en cualquier dirección, lo cual representa un error porcentual de apenas el 0.02% con respecto al intervalo de la malla NARR.

### Error inducido en el cálculo de superficies debido a la malla NARR sobre una esfera.

La malla en coordenadas CCL del NARR es regular, pero deja de ser regular cuando se transforma en coordenadas geográficas, esto es debido a que la proyección CCL no es equivalente, lo cual implica que una aproximación numérica del área de una región  $\Sigma$  definida como en (A.4.5) no necesariamente tiene un error semejante a una malla regular de  $\Delta\theta = \Delta\varphi = 0.3^\circ$  (equivalente a una malla cartesiana regular con  $\Delta x = \Delta y = 32,000$  m sobre el ecuador), por lo que la distribución espacial del error asociado al valor medio de alguna variable sobre esta región S no es semejante al de la Figura A-1.

Se ha calculado el error, ecuación (A.4.6), asociado a la aproximación numérica del área de un casquete esférico de radio  $r = 500,000$  m centrado en los puntos del dominio NARR. Se observó que esta aproximación numérica presenta errores relativos de hasta el 40% (Figura C-2), dependiendo la posición del centro del casquete.

La Figura C-2 muestra que los casquetes centrados en las longitudes centrales del dominio NARR presentan errores relativos menores al 10%, conforme el centro de los casquetes se aleja de estas longitudes, el error aumenta hasta llegar al 40% en las fronteras del NARR, este tipo de distorsiones es característico de proyecciones cónicas normales (el centro del cono es paralelo al eje de rotación terrestre), las cuales distorsionan el área mientras más alejado del meridiano central se encuentre un punto, independientemente de que la proyección tenga uno o dos paralelos estándar.



**Figura C-2. Fracción del área de un casquete empleando aproximaciones numéricas de una malla regular CCL respecto al valor analítico.**

## APÉNDICE D

### Función de densidad acumulada.

Dada una distribución  $\varphi$  de densidades sobre un intervalo  $[a, b]$  se define la función de densidad acumulada como la siguiente integral:

$$\Phi(a_f) = \int_a^{a_f} \varphi(x) dx \quad (\text{D.1.1}) \quad \text{donde } a_f \in [a, b]$$

Además esta función cumple las siguientes propiedades:

$$\Phi(b) = 1 \quad \text{y} \quad \Phi(a) = 0$$

Y  $\Phi$  debe ser una función creciente y positiva definida.

De esta forma, la probabilidad de obtener un elemento de la distribución en los valores  $a_i$  y  $a_f \in [a, b]$  es:

$$P(x|a_f > x > a_i) = \Phi(a_f) - \Phi(a_i) \quad (\text{D.1.2})$$

Misma que puede ser interpretada como la fracción de densidades que se encuentran en el intervalo  $[a_i, a_f]$  respecto al intervalo  $[a, b]$ .

En el caso de una distribución de densidades discretas la integral se sustituye por una suma.

## Glosario y términos

**Aerosoles:** Cualquier tipo de partículas suspendidas en la atmósfera que no sean agua en cualquiera de sus fases.

**advectar:** Cuando una partícula o una cantidad física es transportada por un campo de velocidades, mismo que puede ser generado por el viento.

**AOD:** Profundidad óptica de los aerosoles.

**Cantidad máxima de relámpagos en un punto de malla [ $R_{m\acute{a}x}$ ]:** Cantidad máxima de relámpagos en un punto de malla en un intervalo de tiempo.

**CCN:** Núcleos de condensación de nube.

**clúster:** Conjunto o agrupamiento de elementos. En el trabajo los clústeres de ciclones tropicales se muestran son los siguientes: EO (Este-Oeste), NO (Noroeste), PC (Paralelo a la costa), RE (Recurvan), OE (Oeste-Este) y CO (Complejas).

**CT:** Ciclón tropical. En este trabajo se consideró que los CTs pueden ser aproximados por un disco de 400 km de radio.

**DECR:** Distribución espacial de relámpagos con respecto al movimiento.

**DECRM:** Distribución espacial de relámpagos con respecto al movimiento.

**DECRC:** Distribución espacial de relámpagos con respecto a la cortante.

**densidad efectiva [ $\rho_e$ ]:** Es la cantidad de relámpagos que ocurren en un intervalo de tiempo dividida por la superficie que ocupan estos, la cual es aproximada por el área que ocupan los puntos de malla donde hay relámpagos.

**Graupel:** granizo cuyo diámetro es menor a 5 mm. Generalmente se forma cuando las gotas de aguas sobreenfriadas son colectadas y congeladas por un copo de nieve.

**Hidrometeoros:** Agua en cualquiera de sus fases o bien partículas húmedas, que se encuentren suspendidas, que precipiten de la atmósfera o que se depositen sobre alguna superficie.

**hPa:** Hectopascales, 1 hPa = 1 mb.

**I**ntervalos efectivos [ $I_e$ ]: Es la cantidad de intervalos en cada clúster donde se puede estimar la cortante del viento las inmediaciones de un CT. Considérese además que  $I_{en}$  es la cantidad de intervalos efectivos no nulos.

intervalos totales [ $I_t$ ]: Es la cantidad total de intervalos en cada clúster y coincide con la cantidad de imágenes de satélite disponibles para cada CT de cada clúster.

intervalos no nulos [ $I_n$ ]: Es la cantidad de intervalos en cada clúster donde ocurrió la menos un relámpago. Considérese además que  $I_{tn}$  es la cantidad total de intervalos no nulos.

**K**ts: nudos,  $1 \text{ kt} = 0,514 \text{ m s}^{-1}$ .

**N**úcleo interno: Es un disco de 100 km de radio centrado en la posición del CT

**P**NO: Pacífico Nororiental.

punto de malla con fracción  $p$  ( $R_p$ ): Es un punto de malla no nulo tal que la cantidad  $n > 0$  de relámpagos en ese punto satisface la ecuación  $p = n/m$ , donde  $m$  es la máxima cantidad de relámpagos que hay en un punto de malla de la DECR en cuestión.

**R**MW: Radio de vientos máximos.

**S**ST: Temperatura de la superficie del mar.

superficie efectiva restringida al núcleo [ $Se_N$ ]: Es la cantidad de puntos de malla que ocupan los relámpagos en un intervalo de tiempo expresada en kilómetros cuadrados.

**U**<sub>C</sub>: Intensidad de la cortante en un intervalo de tiempo.

$U_M$ : Rapidez de traslación de un CT en un intervalo de tiempo.

$U^* = U_C/U_M$ , donde  $U_C$  es la intensidad de la cortante y  $U_M$ . Puede ser considerado como la intensidad adimensional de la cortante de viento.

**W**WLLN: Red Mundial de posicionamiento de relámpagos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abarca, S. F., K. L. Corbosiero, y D. Vollaro, 2011: The World Wide Lightning Location Network and Convective Activity in Tropical Cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 175-190.
- Altaratz, O., I. Koren, Y. Yair y C. Price, 2010: Lightning reponse to somke from Amazonian fires. *Geohpys. Res. Lett.*, **37**, L07801.
- Bell, T. L., D. Rosenfeld y K.-M. Kim, 2009: Weekly cycle of lightning: Evidence of storm invigoration by pollution. *Geo. Res. Let.*, **36**, L23805.
- Bell, T. L., D. Rosenfeld, K.-M. Kim, J-M Yoo, M.-I. Lee, y M. Hahnenberger, 2008: Midweek increase in U.S. summer rain and storm heights suggest air pollution invigorates rainstorms. *J. Geo. Res.*, **113**, D02209.
- Black, R. A., y J. Hallet, 1986: Observations of the distribution of ice in hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, **43(8)**, 802-822.
- Black, R. A. y J. Hallet, 1999: Electrification or the hurricane. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 2004-2028.
- Chen, Y., y M. K. Yau, 2001: Spiral bands in a simulated hurricane. Part I: Vortex Rossby wave verification. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 2128-2145.
- Chen, Y., G. Brunet, y M. K. Yau, 2003: Spiral bands in a simulated hurricane. Part II: Wave activity diagnostics. *J. Atmos. Sci.*, **128**, 1239-1256.
- Christian, H., C. R. Holmes, J. W. Bullock, W. Gaskell, y A. J. Illinworth, 1980: Airborne and ground-based studies of thunderstorms in the vicinity of Langmuir laboratory. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **106** (447), 159-174.
- Corbosiero, K. L., y J. Molinari, 2002: The Effects of Vertical Wind Shear on the Distribution of Convection in Tropical Cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2110-2123.
- Corbosiero, K. L., y J. Molinari, 2003: The Relationship between Storm Motion, Vertical Wind Shear, and Convective Asymmetries in Tropical Cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 366-376.
- Corbosiero, K. L., J. Molinari, A. R. Aiyyer, y M. L. Black, 2006: The structure and evolution of Hurricane Elena (1985). Part II: Convective asymmetries and evidence for vortex Rossby waves. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 3073-3091.
- Corbosiero, K., S. Abarca, F. Oropeza, G. Raga, y S. Stevenson, 2013:

- Tropical Cyclone Lightning Characteristics as Revealed by the World Wide Lightning Location Network. *6th Conference on the Meteorological Applications of Lightning Data*. Austin, Texas, Amer. Meteor. Soc.
- Cushman-Roisin, B., y J.-M. Beckers, 2011: *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics. Physical and Numerical Aspects*. Academic Press, 750 pp.
- Deierling, W., y W. A. Petersen, 2008: Total lightning activity as an indicator of updraft characteristics. *J. Geophys. Res.*, **113** (D16210).
- DeMaria, M., R. T. DeMaria, J. A. Knaff, y D. Molenaar, 2011: Tropical Cyclone Lightning and Rapid Intensity Change. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 1828-1842.
- Demetriades, N. W., y R. L. Holle, 2005: *Long-range lightning applications for hurricane intensity*. [Disponible en [http://www.vaisala.com/Vaisala Documents/Scientific papers/Long-range lightning applications for hurricane intensity.pdf](http://www.vaisala.com/Vaisala/Documents/Scientific%20papers/Long-range%20lightning%20applications%20for%20hurricane%20intensity.pdf)]
- Dengler, K., y M. J. Reeder, 1997: The Effects of Convection and Baroclinicity on the Motion of Tropical Cyclone Like Vortices. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **123**, 699-725.
- Foster, T., y J. Hallet, J. 1982: A laboratory investigation of the influence of liquid water content on the temperature dependence of secondary ice crystal production during soft hail growth. *Conf. on Cloud Physics* (págs. 123-126). Chicago, IL: Amer. Meteor. Soc.
- Gatlin, P. N., y S. J. Goodman, 2010: A total lightning trending algorithm to identify severe thunderstorms. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **27**.
- Ghil, M., M. R. Allen, M. D. Dettinger, K. Ide, D. Kondrashov, M. E. Mann, y otros. 2002: Advanced spectral methods for climatic time series. *Rev. Geophys.*, **40**, 1-41.1
- Harris, M. F., F. G. Finger, y S. Teweles, 1962: Diurnal Variation of Wind, Pressure, and Temperature in the Troposphere and Stratosphere Over the Azores. *J. Atmos. Sci.*, **19**, 136-149.
- Helsdon, J. H., S. Gattaleeradapan, R. D. Farley, y C. C. Waits, 2002: An examination of the convective charging hypothesis: Charge structure, electric fields and Maxwell currents. *J. Geophys. Res.*, **107** (D22, 4630).
- Houze, R. A., 1993: *Cloud Dynamics*. Academic Press, 573 pp.
- Houze, R. A., 2010: Clouds in Tropical Cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 293-344.
- Houze, R., S. S. Chen, B. F. Smul, W.-C. Lee, y M. M. M. Bell, 2007: Hurricane intensity and eyewall replacement. *Science*, **315**, 1235-1239.
- Jacobson, A. R., y M. J. Heanver, 2004: Comparison of Narrow Bipolar Events with Ordinary Lightning as

- Proxies for Severe Convection. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 1144-1154.
- Jones, S. C., 1995: The Evolution of Vortices in Vertical Shear. I: Initially Barotropic Vortices. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **121**, 821-851.
- Kawai, Y., y A. Wada, 2007: Diurnal Sea Surface Temperature Variation and Its Impact on the Atmosphere and Ocean: A review. *J. Oceanogr.*, **63**, 721-744.
- Kelley, O. A., J. Stout, y J. B Halverson, 2004: Tall precipitation cells in tropical cyclone eyewalls are associated with tropical cyclone intensification. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L24112.
- Khain, A., B. Lynn, y J. Dudhia, 2010: Aerosol effects on intensity of landfalling tropical cyclones as seen from simulations with the WRF model with spectral bin microphysics. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 365-384.
- Kossin, J. P., 2002: Daily Hurricane Variability Inferred from GOES Infrared Imagery. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2260-2270.
- Kucieńska, B., G. B. Raga, y R. Romero-Centeno, 2012: High lightning activity in maritime clouds near Mexico. *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 8055-8072.
- Kucieńska, B., G. B. Raga, y V. M. Torres-Puente, 2011: Climatology of precipitation and lightning over the Pacific coast of southern Mexico retrieved from Tropical Rainfall Measuring Mission satellite products and World Wide Lightning Location Network data. *Int. J. Rem. Sen.*, **33(9)**, 2831-2850.
- Kocha, C., P. Tulet, J.-P. Lafore y C. Flamant, 2013: The importance of the diurnal cycle of aerosol Optical Depth in West Africa. *Geos. Res. Lett.*, **40**, 785-790
- Landsea, C., y J. Franklin, 2013: How 'Good' are the Best Tracks? - Estimating Uncertainty in the Atlantic Hurricane Database. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 3576-3592, doi:10.1175/MWR-D-12-00254.
- Lascody, R., 1993: A different look at the hurricane Andrew-Lightning around the eyewall. *Natl. Wea. Dig.*, 39-40.
- Lugo, A, 2011: *Desarrollo de Ciclones Tropicales en el Pacífico Nororiental (2006-2009) y su impacto en México*. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, [Disponible en <http://132.248.9.195/ptd2012/enero/0676294/Index.html>]
- Lyons, W. A., y C. S. Keen, 1994: Observations of lightning in convective supercells within tropical storms and hurricanes. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 1897-1916.
- Molinari, J., y D. Vollaro, 1989: External influences on hurricane intensity. Part I: Outflow layer eddy angular momentum fluxes. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 1093-1105.
- Molinari, J., P. Moore y V. Idone, 1999: Convective structure of hurricane

- as revealed by lightning locations. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 520-534.
- Molinari, J., P. Moore, V. Idone, R. Henderson, y A. Saljoughy, 1994: Cloud-to-ground lightning in Hurricane Andrew. *J. Geo-phys. Res.*, **99**, 16665-16676.
- Montgomery, M. T., M. M. Bell, S. D. Aberson, y M. L. Black, 2006: Hurricane Isabel (2003): new insights into the physics of intense storms. Part I. *Bull. Amer. Soc.*, **87**, 1335.
- Orrt, D., 2007: *Effects of environmental water vapor on tropical cyclone structure and intensity*. Tesis de Maestria, University Of Miami.
- Petersen, W. A., H. J. Christian , y S. A. Rutledge, 2005: TRMM observations of the global relationship between ice water content and lightning. *Geo. Res. Let.*, **32**, L14819.
- Price, C., M. Asfur, y Y. Yair, 2009: Maximum hurricane intensity preceded by increase in lightning frequency. *Nature Geosci.*, **2**, 329-332.
- Rosenfeld, D., U. Lohmann, G. B. Raga, C. D. O'Dowd, M. Kulmala, S. Fuzzi, S., et al., 2008: Flood or drought: How do aerosols affect precipitation. *Science*, 1309-1313.
- Rotunno, R., y K. A. Emanuel, 1987: An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part II: An evolutionary study using a hydrostatic axisymmetric numerical model. *J. Atmos. Sci.*, **44**, 543-561.
- Rutherford B., y M. T. Montgomery, 2012: A Lagrangian analisis of a developing and non-developing disturbance observed during the Predict experiment. *Atmos. Chem Phys.*, **12**, 11357-11381
- Sabin, T. P., C. A. Babu y P. V. Joseph, 2013: SST-convection relation over tropical oceans, *Int. J. Climatol.*, **33**, 1424-1435.
- Saunders, C., 2008: Charge separation mechanisms in clouds. *Spa. Sci. Rev.*, **137**, 335-353.
- Sax, R. I., J. Thomas, M. Bonebreak, y J. Hallet, 1979: Ice evolution within seeded and nonseeded Florida cumuli. *J. Appl. Meteor.*, **18**, 203-214.
- Sen Roy, S., y R. C. Balling, 2013: Spatial Patterns of Diurnal Variations in Summer-Season Lightning Activity Across the Tropical and Subtropical Regions of the Northern Hemispheric Americas. *Meteol. Atmos. Phys.*, 199-206.
- Simpson, G. C., y S., F. R., 1909: On the electricity of rain and its origin in thunderstorms. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A*, **209**.
- Simpson, G. C., y S., F. R., 1927: The mechanism of a thunderstorm. *Proc. R. Soc. Lond. A*, **114**.
- Simpson, G. C., y F. J. Scrase, 1937: Distribution of electricity in thunderclouds. *Proc. Roy. Soc. Lon. A*, **161(906)**, 309-352.

- Takahashi, T., 1975: Electric charge life cycle in warm clouds. *J. Atmos. Sci.*, **32**, 123-142.
- Terwey, W. D., y M. T. Montgomery, 2008: Secondary eyewall formation in two idealized, full-physics modeled hurricanes. *J. Geophys. Res.*, **113**, D12112.
- Vonnegut, B., 1953: Possible mechanism for the formation of thunderstorm electricity. *Bull. Amer. Soc.*, **34**, 378.
- Williams, E., y S. Stanfill, 2002: The physical origin of the land-ocean contrast in lightning activity. *C. R. Physique* **3**, 1277-1292.
- Williams, E., D. Rosenfeld, N. Madden, J. Gerlach, N. Gears, L. Atkinson, et al, 2002: Contrasting convective regimes over the Amazon: Implications for cloud electrification. *J. Geophys. Res.*, **107**, (D20), 8082.
- Zhang, J. A., R. F. Rogers, P. D. Reasor, E. W. Uhlhorn, y F. D. Marks, 2013: Asymmetric Hurricane Boundary Layer Structure from Dropsonde Composites in Relation to the Environmental Vertical Wind Shear. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 3968-3984.
- Zipser, E. J., y K. R. Lutz, 1994: The vertical profile of radar reflectivity of convective cells: a strong indicator of storm intensity and lightning probability? *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 1751-1759.







