

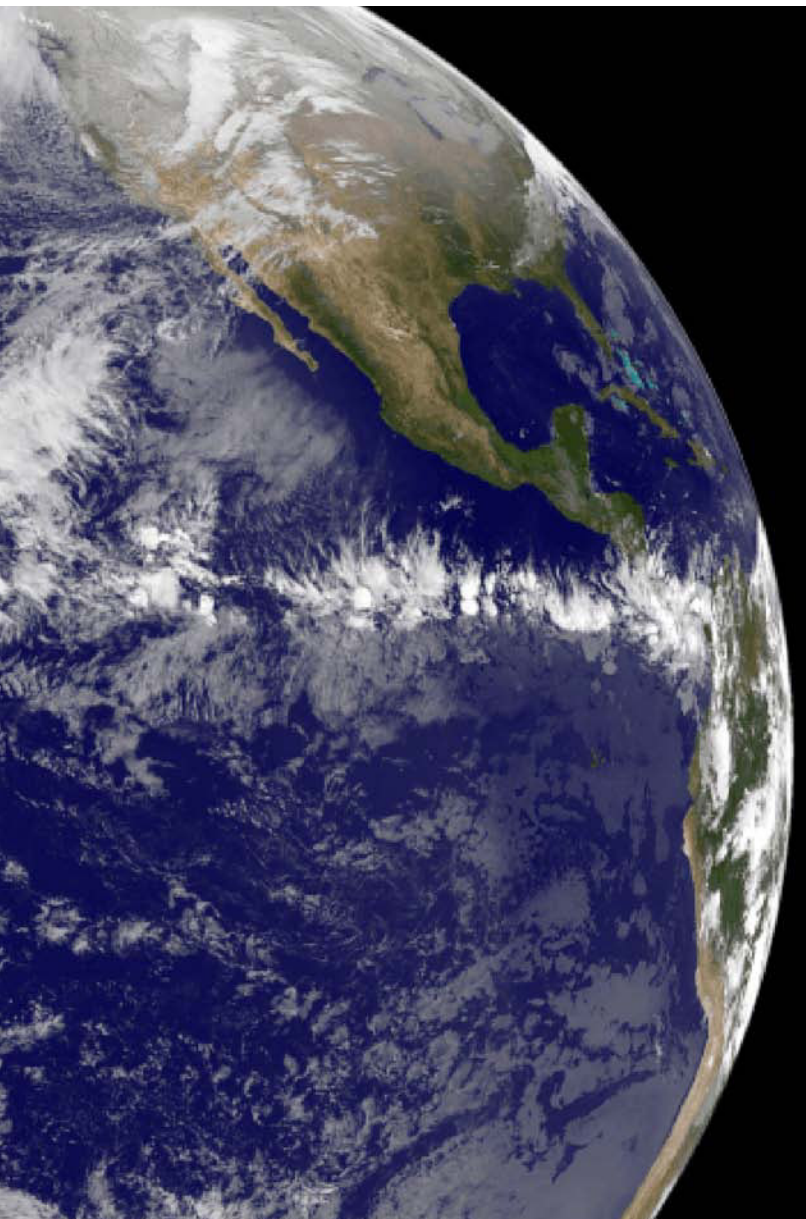
# TÓPICOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS



ISSN 1409 - 2034

Volumen 15

Diciembre 2016



# TÓPICOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS

ISSN 1409 - 2034

Volumen 15

Diciembre 2016

**Editora:**

Dra. Gladys Jiménez Valverde

**Director de publicación:**

MSc. Roberto Villalobos Flores

**Comité editorial:**

Lic. Werner Stolz España   Ing. José Alberto Retana Barrantes   Lic. Luis Fernando Alvarado Gamboa

**Diseño y diagramación:**

Rodrigo Granados Jiménez

---

*La revista "Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos" es publicada por el Instituto Meteorológico Nacional, Ministerio de Ambiente y Energía, Costa Rica. Tiene como finalidad dar a conocer los resultados de investigaciones y estudios en Ciencias de la Atmósfera y Oceanografía Física.*

## CONTENIDO

- Pág. Artículo
- 5 **Prediction of MJ rainfall season using CCA models**  
ERIC J. ALFARO, HUGO G. HIDALGO, NATALIE P. MORA
- 20 **El Mega-Niño de 1877-1878 y su impacto social en Costa Rica**  
RONALD E. DÍAZ BOLAÑOS, ERIC J. ALFARO
- 33 **Interacción de la Zona de Convergencia Intertropical del Pacífico Este con Sistemas Tropicales**  
EVELYN QUIRÓS BADILLA, HUGO G. HIDALGO LEÓN
- 48 **Eventos extremos de lluvia ocasionados por empujes fríos que han llegado a Costa Rica en el periodo invernal (NDEF) del año 2000 al 2010: Líneas de cortante.**  
GABRIELA CHINCHILLA, JORGE GUTIÉRREZ, ELADIO ZÁRATE
- 63 **Sensación térmica en Costa Rica: Determinación de índices biometeorológicos aplicables**  
JOSHUA A. CASTRO Y FRANCELA TENCIO

# Interacción de la Zona de Convergencia Intertropical del Pacífico Este con Sistemas Tropicales

EVELYN QUIRÓS BADILLA<sup>1</sup>  
HUGO G. HIDALGO LEÓN<sup>2</sup>

## Resumen

Las estimaciones satelitales de Tropical Rainfall Monitoring Mission (TRMM) fueron usadas para calcular cuatro índices que describen las características de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), estos son: el centro de masa latitudinal de la precipitación, el centro de masa longitudinal de la precipitación, la precipitación promedio, y la dispersión latitudinal de la precipitación, todos ellos para la región limitada por 10° S y 25° N y 150° y 82° W. En cada uno de los momentos fueron comparados los días con ondas o ciclones tropicales, así como los días sin estos. La longitud media y precipitación mostraron cambios significativos de posición de la ZCIT asociada con el tránsito de ondas tropicales, mientras que la latitud media y la precipitación fueron afectadas por los ciclones tropicales, donde se utilizaron las bases de datos de huracanes de HURDAT and HURDAT2, del National Hurricane Center (NHC).

**PALABRAS CLAVE:** ZCIT, TRMM, HURDAT, HURDAT2, ONDAS TROPICALES, CICLONES TROPICALES, PACÍFICO TROPICAL ESTE.

## Abstract

Tropical Rainfall Monitoring Mission are used to compute four indexes that describe characteristics of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ): the latitudinal center of mass of precipitation, the longitudinal center of mass of precipitation, the average precipitation in a region bounded by 10° S to 25° N and 150° to 82° W. The moments were compared to the days with easterly waves and tropical cyclones, and to days without these events. The central longitude and precipitation showed significant changes of position of ITCZ associated with transit of tropical waves, the central latitude and precipitation was affect for cyclones, using hurricanes data from HURDAT and HURDAT2, from the National Hurricane Center (NHC).

**KEY WORDS:** ITCZ, TRMM, HURDAT, HURDAT2, TROPICAL WAVES, TROPICAL CYCLONES, PACIFIC TROPICAL EAST.

## 1. Introducción

Algunos estudios han mostrado como el paso de ondas tropicales (OT) en la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) provocan un aumento de la vorticidad positiva (Thorncroft, 2008), lo cual bajo condiciones adecuadas genera la formación de ciclones tropicales, tal es el caso de la tormenta tropical Alma en mayo 2008. También, el paso de una OT puede inducir la formación de sistemas de baja presión, que son de gran relevancia para

América Central debido a los elevados montos de precipitación que pueden provocar generalmente en periodos de 24 horas o menos. Ejemplo de esto fueron las bajas presiones de abril de 1970 y julio del 2012, en las que la mayor afectación fue para el Caribe de Costa Rica, no obstante las lluvias cubrieron la mayor parte del país. El evento de 1970 es particularmente relevante, porque se mantiene como el de mayor monto de precipitación acumulada en un día, en la región Caribe de Costa Rica (Quirós, 2014 y

1 MSc. en Hidrología. Instituto Costarricense de Electricidad. Email: [equirosb@ice.go.cr](mailto:equirosb@ice.go.cr)

2 Doctor en Hidrología. Escuela de Física, Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica. Email: [hugo.hidalgo@ucr.ac.cr](mailto:hugo.hidalgo@ucr.ac.cr)

2015), donde el mayor monto registrado fue de 483.4 mm de lluvia acumulada en 24 horas, en la estación 73044 La Suiza, perteneciente a la red hidrometeorológica del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

América Central se ve afectada por el paso de ciclones tropicales (CT), tanto los que se forman cerca de Panamá, Costa Rica y Nicaragua, en el lado del Pacífico (el único caso es la tormenta tropical Alma en 2008), como por los que transitan por el mar Caribe los cuales son más frecuentes, tal es el caso del reciente huracán Otto, en noviembre 2016. Según Peña y Douglas (2002), los efectos de estos últimos se han clasificado en dos tipos: los de influencia directa, cuando ingresan a suelo centroamericano (como los huracanes Mitch en 1998 y Otto en 2016) y los de efecto indirecto, que son los que pese a no tocar el territorio centroamericano, provocan que los vientos alisios del Hemisferio Sur converjan hacia el ciclón por el efecto de la baja presión del mismo, por lo que se habla de interacción con la ZCIT.

En el estudio de Quirós (2009), se muestran varios casos en los que la observación de imágenes satelitales y de líneas de corriente de viento, han permitido evidenciar como esta modulación hace que la convergencia se mantenga sobre América Central generando intensas precipitaciones asociadas a los núcleos de convección profunda que en ella se desarrollan. Estos núcleos se forman por la convergencia de los vientos que ingresan al continente con dirección suroeste y se encuentran en forma perpendicular con las cadenas montañosas de la región, provocando lluvias orográficas severas, como en el caso del huracán Cesar (1996) y el huracán Tomás (2010), entre otros.

En dicho estudio se analizaron casos de los dos tipos de efectos provocados por los huracanes, pero con un interés particular en los casos de influencia indirecta, con el fin de mostrar si existe una relación entre la intensidad de la ZCIT y la

afectación para América Central por el paso de los ciclones tropicales (CT). La hipótesis radicó en que en estas circunstancias lo que ocurre es una fractura de la ZCIT, la cual definimos como la ruptura del flujo de fondo en superficie de los vientos alisios del sureste que convergen con los del noreste para formar la ZCIT, los que se ven deformados en su dirección por la fuerza de la baja presión del ciclón que desvía al flujo de fondo hacia ella, fragmentando la banda de nubosidad.

De este fraccionamiento de la ZCIT una porción converge hacia el ciclón, mientras que la otra porción queda al sur de esta. La porción al sur de la banda queda generalmente debilitada o casi imperceptible, pero se reforma cuando se restablece la convergencia del flujo de fondo de superficie. La sección fracturada se desplaza con el ciclón, un ejemplo de esto se presentó los días 23-25 de noviembre 2016, con el huracán Otto.

Los análisis de Shubert, Ciesielski, Stevens y Kuo (1991), indican que esta ruptura de la banda se debe al efecto de la vorticidad positiva al norte de la ZCIT, que es donde se encuentran las ondas tropicales y los ciclones, por lo tanto en este análisis se considera que con la presencia de un ciclón tropical en el Atlántico esta ruptura provoca que una porción de la ZCIT se mantenga sobre América Central, por lo que el enfoque fue encontrar el punto de ruptura, el cual se puede ver siguiendo el comportamiento que tuvo o momento espacial, asociado a la latitud del conjunto de datos de precipitación de Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), con la presencia del CT.

## 2. Metodología

### 2.1. Datos

Se utilizaron datos producto de la estimación de la precipitación por satélite, de los campos de microondas obtenidos del TRMM (Huffman et al., 2007), en resolución temporal y espacial de

3-horas y  $0.25 \times 0.25^\circ$  de la versión TRMM\_3B42. Los datos de 3-horas fueron acumulados en periodos de 24 horas (usando como base la hora UTC-6) de cada día, entre el 1 enero de 1998 y el 31 de diciembre de 2013. Estos datos fueron usados para calcular los índices de la ZCIT a nivel diario detallados en Quirós (2015).

Se utilizó además el registro de ondas tropicales, provenientes del Boletín Meteorológico Mensual del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), información que fue extraída con el apoyo del personal del CIGEFI de la Universidad de Costa Rica (Alfaro y Pérez-Briceño, 2014).

La base de datos HURDAT (Hurricane Data, NHC) del Centro Nacional de Huracanes de Miami, contiene los huracanes que han transitado por el

océano Atlántico norte, desde el año 1851 hasta el 2013. Además se utilizó la base de datos HURDAT2 (Northeast and North Central Pacific Hurricane Database) que comprende los ciclones que se han presentado en el Pacífico norte y noreste, en el periodo comprendido entre 1949 y el 2012. Para ambas bases de datos de ciclones tropicales, se utilizó el periodo 1998-2012. La información sobre ciclones tropicales proviene de una gran recolección de datos meteorológicos históricos y en cuanto a las técnicas de análisis se basa en la “mejor trayectoria” (Landsea y Franklin, 2013) y (Bell, Goldenberg, Landsea, Blake, Kimberlain, Schemm y Pasch, 2013).

En la figura 1 se muestran las áreas de análisis de cada uno de los conjunto de datos utilizados.

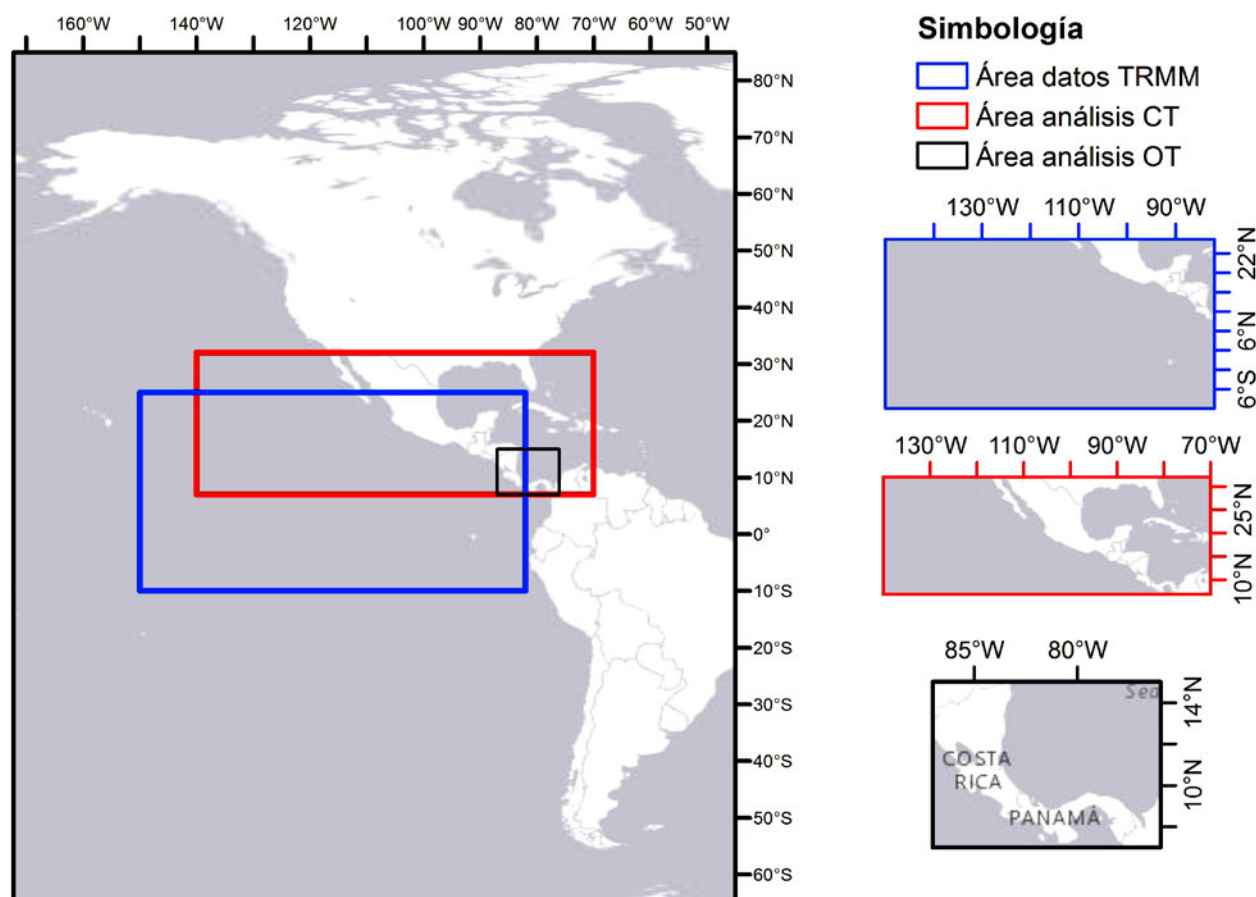


Figura 1. Área utilizada para el cálculo del CM-ZCIT con la serie TRMM (recuadro azul) y las áreas utilizadas para ondas y ciclones tropicales (recuadro negro y rojo respectivamente).

## 2.2. Método

El propósito de los análisis fue indagar cómo la ubicación y la intensidad de la ZCIT se relacionan con los sistemas tropicales, por lo que se analizaron los momentos espaciales (media, latitud central y extensión longitudinal) de la precipitación areal, promediados a lo largo de la región de América Central y del océano alrededor de esta región. Cada uno de los momentos espaciales se comparó con los datos de la presencia de ondas y ciclones tropicales.

Los momentos de posición e intensidad del centro de masa de la ZCIT (LATC, LONC, P y SPREAD), fueron calculados de acuerdo con lo señalado en Quirós e Hidalgo (2016). Para monitorear la interacción de CM-ZCIT con sistemas tropicales, se utilizaron los datos diarios de TRMM, de los que se extrajeron los días con presencia de ondas tropicales transitando sobre Costa Rica, y se compararon con los días en los que no se presentaron ondas. Para los días con ondas tropicales se utilizaron los datos del IMN recopilados por Alfaro y Pérez –Briceño (2014).

De igual forma con la serie diaria de TRMM, se buscaron cuántos grados de desplazamiento y aumentos de intensidad recibe el CM-ZCIT (LATC, LONC, P y SPREAD), con el tránsito de ciclones tropicales por la cuenca del océano Pacífico este, el Atlántico tropical y el mar Caribe, y se compararon los días con ciclones tropicales en diferentes áreas y para las diferentes categorías de los ciclones según la escala Saffir-Simpson.

Las pruebas de significancia estadística de los análisis de OT y CT, se realizaron por medio de la prueba no paramétrica de Wilcoxon ranksum test, esta prueba refleja si las diferencias en las medianas de los grupos de datos comparados son significativas, se realizó para el nivel de confianza del 95%.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Comportamiento del CM-ZCIT con el paso de ondas tropicales

Las OT salen de África y se desplazan por el océano Atlántico y el mar Caribe (Gu y Zhang, 2002), este recorrido lo hacen sobre la ZCIT, salvo algunas que logran ser desplazadas hacia el noroeste por la fuerza de Coriolis y alcanzan a formar ciclones tropicales. Otras quizá la mayoría, avanzan por el norte de Venezuela-Colombia y llegan hasta América Central. Además, la zona frente al Caribe centroamericano es una región inestable, ya que es la salida del CLLJ (Amador, 1998; 2008). En esta zona las OT encuentran una condición atmosférica favorable y pueden dar paso a bajas presiones, apoyadas en su interacción por la sección de ZCIT llamada Vaguada Monzónica Ecuatorial (TAFB, 2011; Quirós, 2015), la cual posee una vorticidad positiva importante. Otras ondas tropicales no logran desprender bajas presiones, pero al avanzar hacia el Pacífico dejan montos elevados de lluvia sobre América Central. Finalmente, algunas que pasan al océano Pacífico, pueden dar paso a la formación de ciclones tropicales que también pueden afectar a América Central y al suroeste de México principalmente.

La ZCIT puede ser perturbada por las ondas tropicales que se propagan desde la cuenca del Atlántico (Zehnder y Powell, 1999), o auto destruida por el efecto de la inestabilidad barotrópica (Nieto y Schubert, 1997).

Los análisis indicaron un total de 282 días con OT en dicho periodo, siendo mayor la cantidad entre 2004 y 2010. Se determinó que se presentó un cambio en el método del IMN para recopilar las OT en ese periodo, igual al resultado encontrado por Alfaro y Pérez-Briceño (2014).

El análisis consistió en comparar los días con OT, los días sin OT y contrastarlo con el registro de datos diarios de TRMM. Se encontró que ni

la posición media de LATC ni el SPREAD sufren cambios significativos en la mediana con el paso de una OT (al intervalo de confianza del 95%).

Los resultados más relevantes se encontraron con LONC, que mostró una tendencia a ubicarse más hacia América Central en los días con presencia de OT, la diferencia en LONC entre los días con y sin OT fue de  $1.9^\circ/\text{día}$  en promedio, estas diferencias en las medianas son respaldadas por la significancia estadística para el intervalo de confianza del 95% (figura 2). Por otro lado la diferencia en las medianas de los días sin OT y la de todos los días del registro no presentó significancia estadística, pero si se presentó significancia estadística al 95% de intervalo de confianza entre la mediana de los días con OT y la del total de los días del registro.

Además, P registró valores más altos en los días con OT que en los días sin OT (figura 3), lo que resultó ser significativo al 95% del intervalo de confianza de la prueba para las medianas de estos grupos de datos. No se presentó significancia estadística en la diferencia de los días sin OT y todos los días del registro, ni entre los días con OT y el total de los días, es posible que la muestra sea pequeña para notar diferencias en estos conjuntos de datos debido a la amplitud de su dispersión.

Por lo tanto, el CM-ZCIT sufre cambios con el aumento de P y el LONC sesgado hacia el este, lo que es un indicativo de que la ZCIT se robustece

con la presencia de una OT, esto ha sido evidente en los montos de lluvia registrados por estaciones meteorológicas con el paso de una OT, sin embargo, la OT da paso a un aumento de lluvias concentrado en un área en particular, razón por la cual generalmente solo una o pocas estaciones indican el aumento de lluvias con el paso de la OT. Por lo anterior, es muy importante que se esté apreciando en una escala espacial mayor del campo de la precipitación y en una escala temporal más amplia que incluye al conjunto de los eventos.

Otro dato interesante del análisis de la serie de OT para Costa Rica, son los meses en que se presentan mayor cantidad de días con OT registradas transitando sobre el país, y que generalmente afectan a toda la región centroamericana. En la figura 4 se muestra la frecuencia mensual de las OT para el periodo 1980-2012, en estos años la mayoría de días con OT se presentaron en el mes de agosto, seguido por junio, en los restantes meses la cantidad de OT disminuyó. Una característica importante que se observa, es la disminución de días con OT en los meses de setiembre y octubre, esto se debe a que en estos meses es cuando la mayoría de OT dan paso a ciclones tropicales en la cuenca del Atlántico, por lo tanto no continúan como OT y no son contabilizadas, en el mes de julio disminuye también la cantidad de OT, lo cual está en acuerdo con los resultados de Alfaro y Pérez-Briceño (2014).

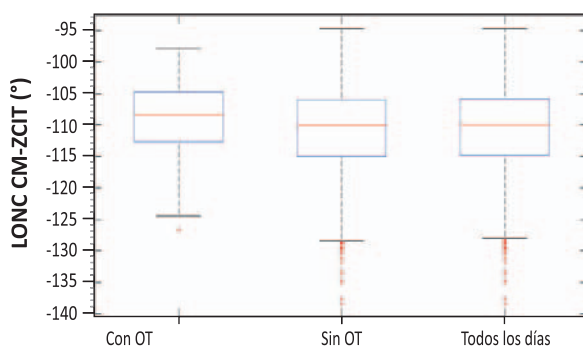


Figura 2. Ubicación del LONC del CM-ZCIT de TRMM en los días con y sin ondas tropicales, del periodo de mayo a noviembre 1998-2012.

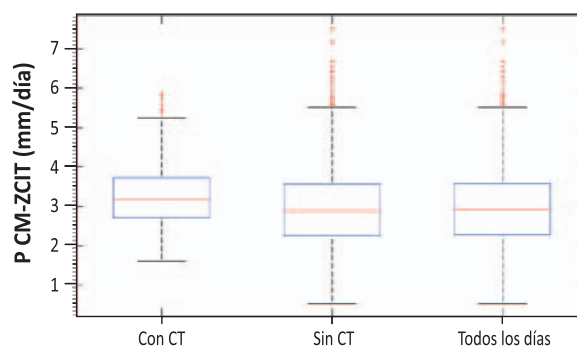


Figura 3. Intensidad de P del CM-ZCIT de TRMM en los días con y sin ondas tropicales, del periodo de mayo a noviembre 1998-2012.



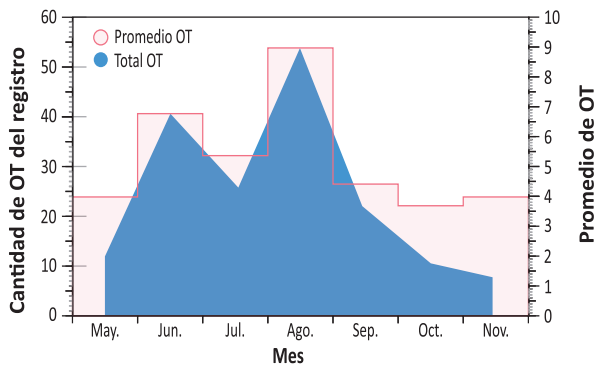


Figura 4. Distribución y cantidad mensual de ondas tropicales sobre Costa Rica, durante el periodo de mayo a noviembre 1998-2012.

Estudios sobre OT han incluido análisis de perfiles verticales de viento, humedad y temperatura en intervalos de 3 a 6 días. Los resultados fueron en general consistentes con los estudios teóricos de las OT, así como con los análisis basados en datos infrarrojos de satélite (IR) los que indicaron una variación significativa en los periodos 3-6 días en la región 0-20°N, 75°-150°W, para julio y agosto de 1997 (Yolande, Robert y Houze, 2002). Estos autores indican que la variabilidad observada por el satélite, fue más pronunciada en las costas de América del Sur y sobre las aguas cálidas al norte del Ecuador, lo que marca la latitud de la ZCIT. Además, la observación de nubosidad de satélites meteorológicos mostraron organizaciones ondulatorias, con áreas perturbadas en movimiento hacia el oeste a  $8 \text{ m s}^{-1}$  ( $6^{\circ}\text{-}7^{\circ} \text{ day}^{-1}$ ), con longitudes de onda de 2.000-3.000 km (Yolande, et al., 2002).

En el presente estudio se analizó la frecuencia de las OT del periodo que comprende los meses de mayo a noviembre de cada año, que es cuando se producen las OT. Se encontró que efectivamente el conteo de OT en Costa Rica indica intervalos de mayor frecuencia de paso de OT entre 2-3 días, seguido de intervalos de 4-5 días y de 6-7 en menor frecuencia (figura 5), se halló además, una cantidad reducida de OT recorriendo la región en intervalos de tiempo de 8 días o más. La alta frecuencia de OT en los intervalos de tiempo de 6 días o menos, corresponde adecuadamente

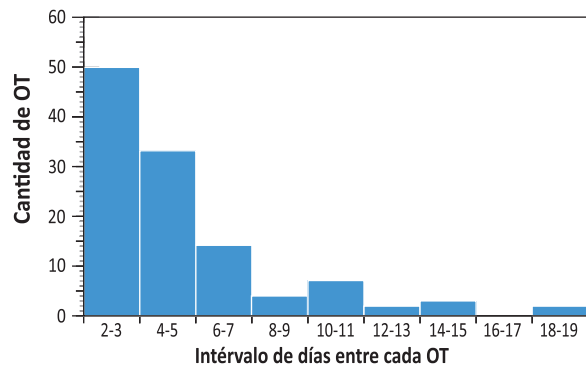


Figura 5. Distribución de frecuencia de las ondas tropicales que transitaron sobre Costa Rica, en el periodo de mayo a noviembre 1998-2012.

con los estudios teóricos de las OT y con las investigaciones de Yolande, et al. (2002).

En la figura 5 no se muestran los casos del análisis de frecuencias de los intervalos de más de 30 días sin ondas, ya que esta condición se presentó en solo tres casos de todo el registro utilizado.

### 3.2. Variación del CM-ZCIT asociado a la intensidad de las temporadas de ciclones del Atlántico

Primeramente se realizó un análisis estadístico, el cual consistió en evaluar las fechas con eventos ciclónicos y separarlas de las que no presentaron ciclones tropicales. Para esto se utilizaron los datos diarios de TRMM del CM-ZCIT y el fin fue cuantificar los grados de desplazamiento de la banda de la ZCIT por el efecto del CT.

Para ello, se analizaron los patrones que puedan reflejar cambios en la posición e intensidad de la ZCIT. Las variaciones espaciales de posición de la ZCIT fueron vinculadas a cambios en los índices LATC y LONC, mientras que los cambios en la intensidad de la ZCIT se vincularon a variaciones de los índices P y SPREAD.

Los casos considerados representan días en que se presentaron ciclones tropicales: i) en la cuenca

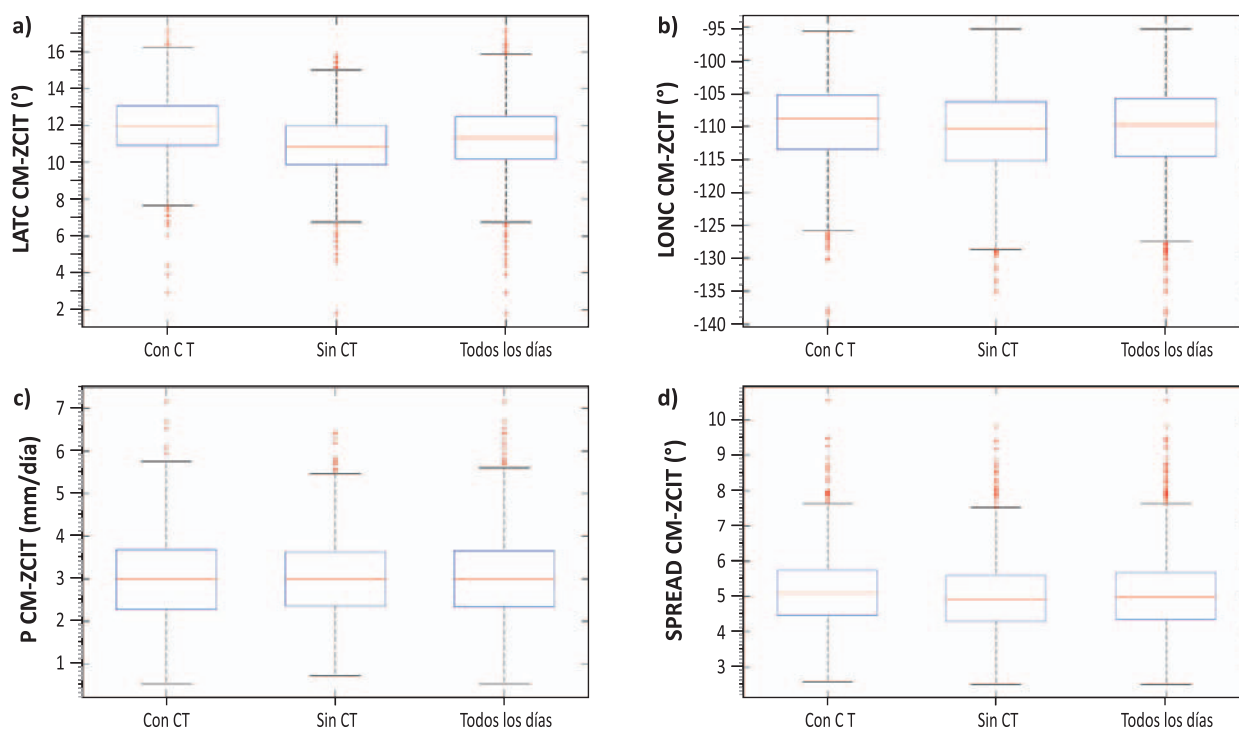


Figura 6. Desplazamiento del CM-ZCIT, datos de TRMM de 1998-2012, considerando los ciclones tropicales que transitaron por el océano Atlántico, en el periodo de junio a noviembre.

del océano Atlántico y ii) cuando ingresan o se formaron en el mar Caribe. Para esto se utilizó la información diaria del CM-ZCIT, basada en los datos de TRMM y los datos de la base Hurdad (Hurricane Data, NHC), del periodo 1998-2012, para las 12Z de cada día considerado.

El análisis se realizó en varias áreas y para las diferentes intensidades de los CT, en el período comprendido entre junio y noviembre donde se define la temporada de ciclones del Atlántico y de mayo a noviembre en el caso de los CT del Pacífico.

Inicialmente se muestran los resultados del análisis estadístico para la cuenca del Atlántico, en los que se comparan la posición del CM-ZCIT para los días con CT, días sin CT y todos los días del registro de TRMM. Los siguientes resultados fueron significativos para las medianas por la significancia estadística al intervalo de confianza del 95% (Wilcoxon ranksum test).

Se encontró que efectivamente LATC se ubica más al norte, en días con CT que en los días sin CT, tal y como se observa en la figura 6a). El desplazamiento de la ZCIT para días con CT transitando por el océano Atlántico, representa una variación de  $1.0^\circ$  en promedio con respecto a su posición en los días en los que no hay ciclones y una diferencia de  $0.6^\circ$  entre los días con CT y el total del registro.

Además, la posición de LONC indicó que con el tránsito de CT por el Atlántico, la ZCIT se desplaza en promedio  $1.3^\circ$  más hacia el este, lo que en este caso corresponde a una posición más cercana a América Central del CM-ZCIT, que en los días sin CT. Los datos mostraron una diferencia de  $0.8^\circ$  entre la posición promedio de LONC, para las fechas con CT que en el total del registro (figura 6b).

Con respecto a la intensidad diaria, el valor de P (figura 6c) para los días con ciclones tropicales en el Atlántico, resultó ser mayor en un 11.3% con respecto a los días en que no hay ciclones, sin

embargo, pese a que este porcentaje es importante para la región y que se sabe que los montos elevados de precipitación con ciclones tropicales pueden ser extremos en el área, los resultados de la prueba estadística para el 95% de intervalo de confianza no dieron resultados significativos para las medianas de los grupos de datos.

La dispersión de la ZCIT indicada por el índice SPREAD, mostró que en los días con CT, el CM-ZCIT se encuentra con mayor grado de dispersión que cuando no hay ciclones en el Atlántico, sin embargo, la diferencia entre ambos conjuntos de datos fue muy leve, siendo de tan solo el  $0.1^\circ$ , no obstante esta leve diferencia en las medianas resultó significativa para la prueba estadística al intervalo de confianza del 95%, debido a la relativamente poca variabilidad de SPREAD (figura 6d).

Este mismo método se utilizó para analizar los grupos de ciclones tropicales transitando en diferentes áreas del Atlántico y mar Caribe, con el fin de observar cuando los CT provocan un mayor desplazamiento del CM-ZCIT. Los resultados indicaron que las diferencias estadísticas en las medianas son pequeñas en el movimiento de la CM-ZCIT para las diferentes áreas con CT, sin embargo, el desplazamiento es mayor conforme el CT este más al oeste en el mar Caribe, en acuerdo con análisis dinámicos de Quirós (2009), en los que se observó en las imágenes satelitales y con el apoyo de las líneas de corriente de los diferentes eventos, que se da una interacción importante de la ZCIT con la cercanía de un CT al área centroamericana.

Además, se analizó la reacción de CM-ZCIT con diferentes intensidades de ciclones tropicales (huracanes, tormentas tropicales y depresiones tropicales). Esta comparación se realizó tomando en cuenta solo los ciclones tropicales que transitaron por el área que comprende los  $70^\circ\text{W}$  a  $90^\circ\text{W}$  y hasta los  $10^\circ\text{N}$ , es decir los más cercanos a América Central.

En el caso de LATC el cambio en la posición de la mediana es en promedio de  $0,7^\circ$  más al norte

cuando son huracanes que cuando son tormentas tropicales (figura 7a), lo que estadísticamente es significativo para las medianas al intervalo de confianza del 95%, pero no se encontraron cambios significativos entre tormentas tropicales y depresiones tropicales, ni entre depresiones tropicales y huracanes.

Para LONC, las diferencias en desplazamiento fueron muy leves, de  $0.24^\circ$  entre huracanes y tormentas tropicales, y de  $0.31^\circ$  entre tormentas tropicales y depresiones tropicales. Así mismo, las diferencias en las medianas de los grupos de datos de P y SPREAD, no mostraron diferencias estadísticamente significativas al intervalo de confianza del 95%, entre los tres tipos de sistemas ciclónicos. En general, en el análisis de las cuatro componentes de CM-ZCIT con CT los datos presentaron una amplia dispersión.

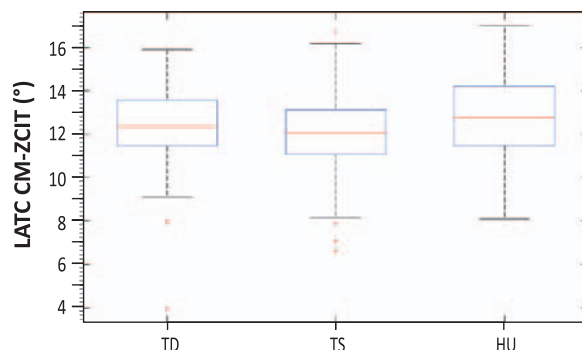


Figura 7. Variación de LATC del CM-ZCIT, datos de TRMM de 1998-2012, considerando los ciclones tropicales que transitaron por el área comprendida entre los  $90^\circ\text{W}$  y hasta  $30^\circ\text{N}$ . Huracanes (HU), tormentas tropicales (TS) y depresiones tropicales (TD).

### 3.3. Variación del CM-ZCIT en función de la posición e intensidad de los ciclones tropicales que transitaron por el océano Pacífico este

En el caso de los ciclones tropicales que transitan por el Pacífico este, se utilizó la base HURDAT2 (Hurricane Data del Pacífico Noreste, NHC) y se

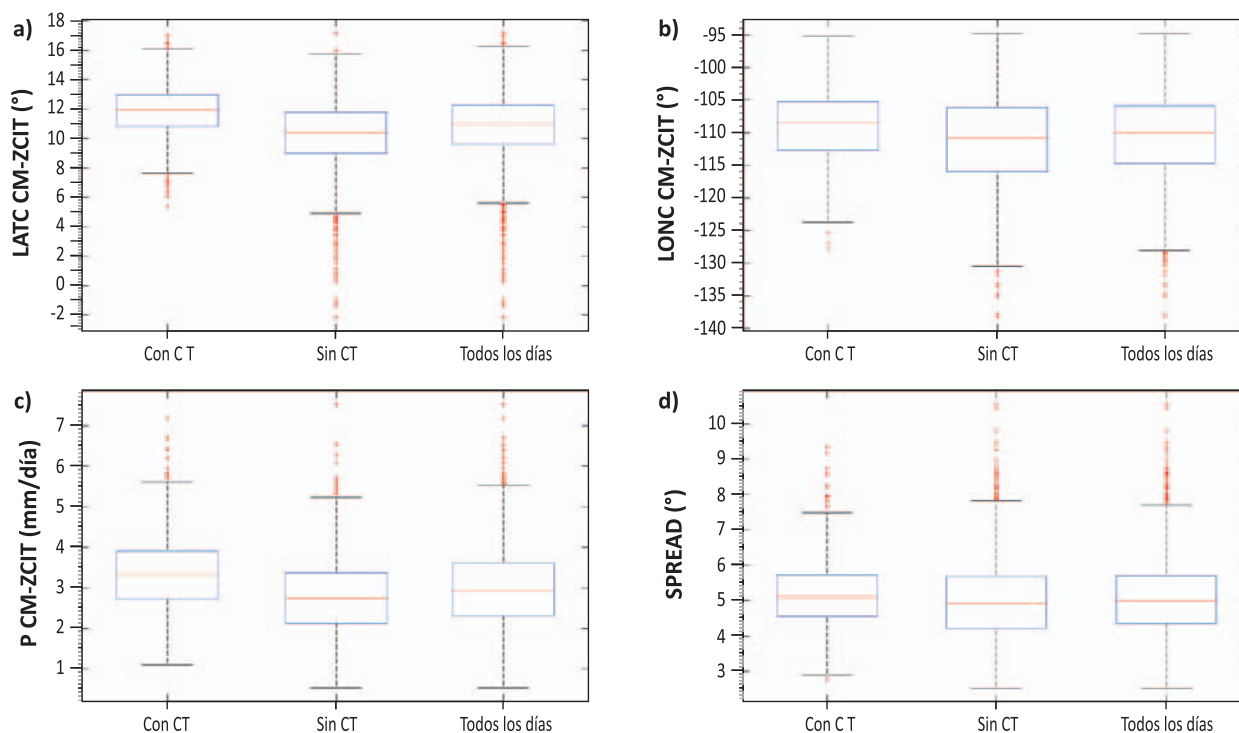


Figura 8 Variación del CM-ZCIT, datos de TRMM de 1998-2012, considerando los ciclones tropicales que transitaron por el océano Pacífico este. C-CT (con ciclones tropicales), S-CT (sin ciclones tropicales), y T-DÍAS (todos los días).

tomaron todos los ciclones que se presentaron entre los 140-87°W y los 7-32°N, que es justamente la región ciclónica del Pacífico que afecta a América Central y suroeste de México.

Utilizando LATC, LONC, P y SPREAD, del CM-ZCIT de los datos diarios de TRMM, se compararon los patrones en los días en que se presentaron ciclones tropicales y en los días que no. El análisis se realizó para los meses de mayo a noviembre, periodo en el que se define la temporada de ciclones del Pacífico este.

El análisis estadístico mostró que LATC se ubica, 1.6° en promedio más al norte en días con CT que en los días sin CT, (figura 8a). Mientras que en el caso del LONC indicó que se ubica 2.5° en promedio más al oeste, en los casos que se presenta un CT en el Pacífico este, (figura 8b).

Además, la precipitación P (mm/día) del CM-ZCIT evidenció un aumento en promedio de 0,9 mm/

día en los días con la presencia de un CT sobre los días sin CT (figura 8c). El índice SPREAD mostró un cambio de 0.2°/día en promedio, de mayor dispersión cuando hay CT que cuando no los hay (figura 8d).

Los datos presentaron una amplia dispersión, pero las diferencias en las medianas fueron estadísticamente significativas al intervalo de confianza del 95%.

### 3.4. Patrones de ruptura y reformación de la ZCIT debidos a la presencia de ciclones tropicales

Una segunda parte del análisis consistió en la visualización de los efectos descritos de ondulación, ruptura, reforma y disipación de la ZCIT, para dicho fin se identificaron casos individuales en los que se pudieran observar estas características

que permitieran determinar las condiciones atmosféricas prevalecientes en cada caso.

Anteriormente se encontró, que tanto los ciclones del sector Pacífico como los del mar Caribe provocan fuertes formas de variación en la ZCIT, el análisis individual brindó algunos detalles que permitieron comprender mejor la banda de lluvia, los tiempos de respuesta de la misma y la forma en que esta es modulada en un evento en particular.

Se consideraron casos entre 1998-2013, de la base de HURDAT se tomó la posición de cada día del recorrido del ciclón a las 12Z y de los de datos diarios de TRMM para la posición del CM-ZCIT. En la figura 9, comportamiento LATC (izquierda) y P (derecha) con el ciclón tropical Mitch, 1998, se muestra un ejemplo de los casos, estos se verificaron utilizando imágenes satelitales del canal infrarrojo y vapor de agua.

Para intentar ubicar el punto de ruptura, en primera instancia se consideraron los eventos con CT más relevantes por el grado de afectación que recibió América Central, como el caso del huracán Mitch (1998), que tuvo un efecto directo lo cual dificultó observar el efecto individual de la ZCIT. Se analizó el huracán Tomas (2010), ya que su trayectoria fue particularmente interesante para su seguimiento y porque su afectación fue indirecta, lo que permite darle un mejor seguimiento a los campos de precipitación del ciclón y de la ZCIT.

Además de analizar los ciclones de temporadas muy activas, se consideraron ciclones de temporadas con baja cantidad, debido a que se notó que cuando hay varios sistemas seguidos es muy difícil ver los cambios en el CM-ZCIT. Mientras que cuando el sistema ocurrió aislado de otros sistemas ciclónicos, tanto temporal como espacialmente, se apreció mejor la interacción de los parámetros del CM-ZCIT con el ciclón.

Para observar cuando ocurrió la modulación de la ZCIT, se dio seguimiento del CM-ZCIT en los cinco días previos a la formación del ciclón y en los cinco días posteriores a su disipación. La modulación del LATC antes, durante y después de la presencia de un CT permite brindar una buena idea del momento en que se presenta la ruptura de la ZCIT, es decir donde se rompe el flujo del este y el sistema absorbe el flujo del suroeste.

En los casos observados se encontró que cuando el ciclón tropical se ubica por debajo de los 16°N mantiene la interacción con el CM-ZCIT, mientras que cuando el CT pasa de los 17-22°N el LATC del CM-ZCIT retorna a su posición más al sur.

Sin embargo, observar el momento en que el CM-ZCIT inicia la interacción con el CT resultó más complejo, ya que desde que comienza la formación de la baja presión con la perturbación atmosférica que da pasó al ciclón, ocurre una situación de bloqueo, es decir, la perturbación bloquea parcialmente los vientos alisos del noreste que van

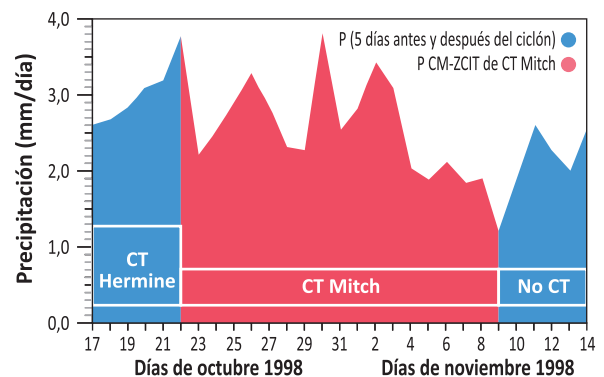
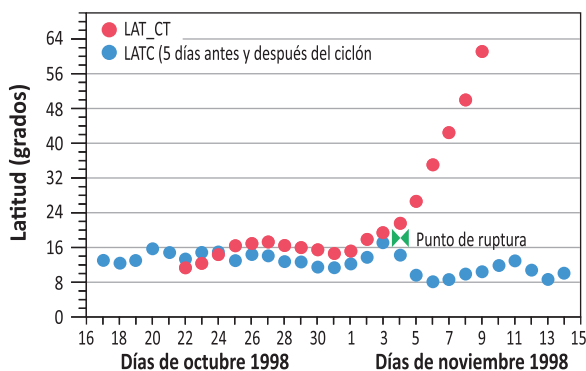


Figura 9. Comportamiento LATC (izquierda) y P (derecha) con el ciclón tropical Mitch, 1998.

hacia América Central, este bloqueo hace que la ZCIT reciba en menor grado los alisios del noreste lo que le permite desplazarse hacia el norte. Por esta razón, en varios de los eventos se identificó que los días con el ciclón apenas en formación el LATC se observó bastante al norte, indicando que ya en ese momento la convergencia que da paso a la ZCIT se presenta desplazada más al norte.

De esta manera se logró observar que cuando el ciclón se ubica entre 14-16°N, es cuando ocurre el levantamiento del LATC y la ruptura de la banda ZCIT debería ocurrir justo antes. Con datos horarios se podría documentar cuando ocurre este momento y como participan o son afectados los patrones locales como el ciclo diurno y la brisa marina.

Se revisaron un conjunto de 30 eventos de ciclones registrados entre 1998 y 2012. En los casos analizados se encontró que conforme el CT avanzó ubicándose entre 17-22°N, la banda regresó a su posición más al sur, es decir el flujo de fondo de superficie ya no converge hacia el CT como en el evento presentado del huracán Mitch. De los eventos evaluados solo en el caso del huracán Rita (2005) no se cumplió esta condición, ya que aún con el huracán Rita en los 25-30°N se mantuvo la convergencia de la ZCIT hacia el ciclón.

Con respecto a LONC no fue evidente la señal de un tipo de movimiento general asociado al ciclón, en algunos casos es claro el efecto mientras que en otros casos no siguen un patrón general.

La precipitación del CM-ZCIT expresada por P reflejó el aumento esperado con el tránsito de un ciclón, los detalles de cada evento son muy particulares, pero en general en los casos analizados, el valor de P de cinco días antes del ciclón casi no varió con respecto al valor de P durante el ciclón, mientras que el valor de P en los días posteriores al ciclón descendió de forma importante en todos los casos, siempre y cuando no se formase un nuevo CT seguido al evaluado.

Lo anterior mostró la posibilidad de dos situaciones: que los días antes del ciclón pueden ser muy activos debido a que el entorno atmosférico es húmedo y esta humedad es la que facilita la formación del ciclón y al mismo tiempo en que favorece una ZCIT intensa; o bien que este efecto en P previo al ciclón, se debe a que en pocos casos los ciclones estaban aislados de la presencia de otros sistemas como ciclones, ondas tropicales o bajas presiones. Cabe mencionar que la definición de P (como el total de precipitación acumulada en el dominio), captura cualquier sistema que esté localizado en la región antes del ciclón, incluyendo condiciones precursoras de la tormenta que puedan afectar los resultados.

En cuanto a la disminución de P pos ciclón encontrada en todos los casos analizados, también se observó con frecuencia en las estaciones meteorológicas del área y la dinámica atmosférica que la respalda se explica por la presencia de una dorsal tras el ciclón. Esto quiere decir que efectivamente, la intensidad del CM-ZCIT es relevante para la cantidad de lluvia que reciba la región con un CT. Una ZCIT deformada o en proceso de reformación por el bloqueo del ciclón, puede representar una baja en las lluvias de las cuencas del Pacífico centroamericano, con un ciclón en el Caribe. Mientras una ZCIT robusta aumenta las lluvias en el Pacífico centroamericano, como el huracán Cesar en 1996.

Se observó además en los casos analizados, que ante la presencia de ciclones simultáneos en ambas cuencas, el LONC del CM-ZCIT responde más a los de la cuenca del océano Atlántico y mar Caribe que al CT en el Pacífico, es decir que el desplazamiento de la ZCIT se da hacia el CT del Atlántico. LATC responde en forma muy similar en ambas cuencas y P se incrementa para ambas situaciones.

Como ejemplo de esta condición se detalla el caso del 20-27 junio 2010, con el CT en el Pacífico (huracán Darby, 20-29 junio, 2010) y en el mar Caribe (tormenta tropical Alex, 25-27 junio, 2010):

Se verificó por medio de imágenes satelitales, como la ZCIT se observó fuerte y bien organizada entre el 20 y el 22 de junio, el día 23 ya se observó fraccionada debido a la ruptura de la banda, ya solo con una porción como parte del CT del Pacífico y otra menor sobre el Pacífico centroamericano.

En tanto, se observó el desarrollo de una perturbación que tomó fuerza en el mar Caribe entre los días 24-25 de junio. Se notó como la porción de ZCIT cercana a América Central se fortaleció, al tiempo que se daba la formación del CT en el mar Caribe, y en ese momento si se observó que el CM-ZCIT es modulado por el CT del mar Caribe.

La diferencia de intensidad de ambos sistemas mencionados en los párrafos anteriores, indicó que el más fuerte fue el del Pacífico, el cual se llevó con él una porción de la ZCIT, mientras que entre 24-48 horas se reformó la porción que permaneció cercana a Centroamérica, que se intensificó y fue modulada con la presencia de la tormenta tropical Alex en el mar Caribe.

Así mismo, se revisaron los casos entre 1998-2013 en los que ambas cuencas presentaron en forma simultánea un CT. De los 24 eventos analizados se observó que efectivamente la ZCIT era fraccionada, el CT del Pacífico logró modular la porción de la banda más cercana ubicada entre 140-100°W, y en su desplazamiento la lleva hacia el noroeste. Mientras que cuando se presenta un CT en cada cuenca pero de muy similar latitud, uno a cada lado del istmo de Tehuantepec, la ZCIT obedece a ambos y se forma una sola banda de nubosidad hacia ellos.

El tercer patrón observado es cuando el CT del Atlántico es el más fuerte y se ubica más hacia el este, siempre dentro del mar Caribe o en el golfo de México pero cercano a Cuba, en estos casos la ZCIT es modulada por el CT del Atlántico, pero además se aprecia la fractura en los 90-85°W. Esa porción es atraída hacia el CT y es la que

usualmente es mantenida sobre América Central, además, en cuestión de 12 horas se ve que la Vaguada Monzónica Ecuatorial se reforma y se aprecia intensa sobre la porción de los 85-75°W, con una modulación leve hacia el CT del Atlántico.

## 4. Conclusiones

La metodología empleada por el IMN para labores operativas de seguimiento de ondas tropicales, dio resultados consistentes con los estudios teóricos de frecuencia de ondas tropicales.

El conteo de estos sistemas y su influencia en el país, permite mejorar los procesos de análisis que podrían contribuir a mejorar los pronósticos de afectación de futuros eventos.

Se verificó que el CM-ZCIT sufre cambios en el aumento de P, y el LONC sesgado hacia el este, que son un indicativo de que la ZCIT se robustece con la presencia de una OT, sin embargo la OT da paso a un aumento de lluvias concentrado en un área en particular. Es decir, generalmente solo una o pocas estaciones indican el aumento de lluvias con el paso de la OT, por lo que es muy importante que se haya apreciado en una escala espacial mayor del campo de la precipitación y en una escala temporal más amplia que incluye el conjunto de los eventos.

Del análisis de frecuencia de las OT, se encontró que efectivamente el conteo de OT en Costa Rica indica intervalos de mayor frecuencia de paso de OT entre 2-3 días, seguido de intervalos de 4-5 días y de 6-7 en menor frecuencia. La alta frecuencia de OT en los intervalos de tiempo de seis días o menos, coincide con los estudios teóricos de las OT y con las investigaciones de Yolande et al. (2002).

Los análisis realizados mostraron que efectivamente el CM-ZCIT recibe una significativa influencia de los CT, tanto de los que transitan por la cuenca del Atlántico y el mar Caribe como los del Pacífico este.

Además se encontró, que a mayor intensidad del ciclón mayor será el desplazamiento de la ZCIT, e incluso los sistemas más alejados pueden provocar un leve desplazamiento de la banda.

Se logró cuantificar el movimiento en grados del LATC, que en días con CT se ubica más al norte que en los días sin CT. El desplazamiento de la ZCIT para días con CT transitando por el océano Atlántico, representa una variación en promedio de  $1.0^\circ$  con respecto a su posición en los días en los que no hay ciclones, y una diferencia de  $0.6^\circ$  entre los días con CT y el total del registro. Además la posición de LONC indicó, que con el tránsito de CT por el Atlántico la ZCIT se desplaza en promedio  $1.3^\circ$  más hacia el este, lo que en este caso corresponde a una posición más cercana del CM-ZCIT a América Central, que en los días sin CT. Los datos mostraron también, una diferencia de  $0.8^\circ$  entre la posición promedio de LONC para las fechas con CT que en el total del registro.

Se puede concluir, que el efecto de un CT del Pacífico se presentaría en todas las componentes del CM-ZCIT, mientras que la modulación del CM-ZCIT por un CT del Atlántico y mar Caribe se presenta en forma significativa solo sobre el LATC y SPREAD.

El análisis estadístico mostró, que LATC se ubica en promedio  $1.6^\circ$  más al norte en días con CT, que en los días sin CT. Mientras que en el caso del LONC indicó que se ubica en promedio  $2.5^\circ$  más al oeste, en los casos que se presenta un CT en el Pacífico este.

Si bien el CM-ZCIT no obedece propiamente a solo la ubicación del ciclón, existe una influencia en el cálculo del CM-ZCIT debido a la presencia de todos los sistemas en el área. Aún bajo este efecto, fue posible notar la modulación de la ZCIT hacia el noroeste (noreste) con la presencia de CT en el Pacífico este (océano Atlántico y mar Caribe). La dinámica tras esta modulación del CM-ZCIT obedece a la convergencia del flujo de

bajo nivel hacia la baja presión del CT, detallada anteriormente.

En cuanto a la disminución de P pos ciclón, encontrada en todos los casos analizados, se ha observado frecuentemente en las estaciones meteorológicas del área y la dinámica atmosférica que la respalda se explica por la presencia de una dorsal tras el ciclón. Se podría concluir que la intensidad del CM-ZCIT es relevante para la cantidad de lluvia que reciba la región, con un CT. Una ZCIT deformada o en proceso de reformación por el bloqueo del ciclón, puede representar una baja en las lluvias de las cuencas del Pacífico centroamericano con un ciclón en el Caribe. Mientras una ZCIT robusta aumenta las lluvias en el Pacífico centroamericano, como con el huracán Cesar en 1996.

No obstante, son necesarios estudios más detallados con información de mayor resolución temporal, para identificar el inicio de la interacción de los ciclones con la convergencia de la banda de lluvias, anticiparse a este momento sería de gran importancia para prevenir y mitigar los impactos de los efectos indirectos de los ciclones en la región.

## 5. Agradecimientos

Los autores agradecen a Dr. Eric Alfaro, Dr. Jorge Amador y Dr. Walter Fernández, por sus valiosas sugerencias y comentarios. También expresan su agradecimiento al Centro de Investigaciones Geofísicas y al Instituto Meteorológico Nacional, por haber proporcionado apoyo en la generación de datos utilizados en esta investigación.

Hugo Hidalgo es financiado parcialmente por los proyectos 805-B3-413, B4-227, A9-532 (CSUCA-ASDI), B3-600, B6-143 (Vicerrectoría de Investigación de la UCR, CONICIT y MICITT), B0-810 y A4-906. HH agradece al apoyo de la Escuela de Física de la UCR.



## 6. Referencias

- Alfaro, E. y Pérez-Briceño, P. (2014). Análisis del impacto de fenómenos meteorológicos en Costa Rica, América Central, originados en los mares circundantes. *Revista de Climatología*, 14, 1-11 ISSN 1578-8768.
- Amador, J. (1998). A Climate Feature of the Tropical Americas: The Trade Wind Easterly Jet. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos.*, 5(2), 91-102.
- Amador, J. (2008). The Intra-Americas Sea Low-level Jet Overview and Future Research. Trends and Directions in Climate Research: *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146, 153-188. doi: 10.1196/annals.1446.012.
- Bell, G.D., Goldenberg, S.B., Landsea, C.W., Blake, E.S., Kimberlain, T.B., Schemm, J., & Pasch, R.J. (2013). Tropical Cyclones - Atlantic Basin, State of the Climate in 2012. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94, S85-S89.
- Dettinger, M.D., Cayan, R.D., Díaz, H.F. & Meko, D.M. (1998). North-South Precipitation Patterns in Western North America on Interannual-to-Decadal Timescales. *American Meteorological Society*.
- Gu G. & Zhang Ch. (2002). Westward-Propagating Synoptic-Scale Disturbances and the ITCZ. *Journal of Atmospheric Sciences*, 59, 1062-1075. doi: 10.1175/1520-0469(2002)059<1062:WPSS DA>2.0.CO;2.
- Huffman, G.J.; Adler, R.F.; Bolvin, D.T.; Gu, G.; Nelkin, E.J.; Bowman, K.P.; Hong, Y.; Stocker, E. & Wolff D.B. (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *American Meteorological Society. Journal of Hydrometeorology*, 8, 38:55. doi: 10.1175/JHM560.1
- Landsea, C.W. & Franklin, J.L. (2013). Atlantic Hurricane Database Uncertainty and Presentation of a New Database Format. *Mon. Wea. Rev.*, 141, 3576-3592. doi: 10.1175/MWR-D-12-00254.1
- Nieto, R., & Schubert, W. H. (1997). Barotropic aspects of ITCZ breakdown. *Journal Atmospheric Sciences*, 54(2), 261-285. doi:10.1175/1520-0469(1997)054.
- Peña, M. & Douglas, M. (2002). Characteristics of Wet and Dry Spells over the Pacific Side of Central America during the Rainy Season. *Mon. Weather Rev.*, 130(12), 3054-3073. doi: 10.1175/1520-0493(2002)130<3054:COW ADS>2.0.CO;2.
- Quirós E. y Alfaro, E. (2009). Algunos aspectos relacionados con la Variabilidad Climática en la Isla del Coco, Costa Rica. *Revista de Climatología*, 9, 33-44 ISSN 1578-8768.
- Quirós, E. (2015). *Variabilidad Climática de la Zona de Convergencia Intertropical y su Influencia en la Hidrometeorología Centroamericana*. Tesis de Maestría. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Quirós, E. y Hidalgo, H. (2016). Variabilidad y conexiones climáticas de la Zona de Convergencia Intertropical del Pacífico Este. *Revista Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 15, 21-36 ISSN 1409-2034.
- Quirós, E. (2015). *Informe Climático de Eventos Extremos de Precipitación del Proyecto Hidroeléctrico Reventazón*. San José, Costa Rica: Instituto Costarricense de Electricidad, CS EBI, Área de Hidrología.
- Quirós, E. (2014). *Caracterización climática de la cuenca media-baja del río Reventazón-Parismina y la microcuenca del río Siquirres (revisión)*. San José, Costa Rica: Instituto Costarricense de Electricidad, CS EBI, Área de Hidrología.
- Shubert, W.H., Ciesielski, P.E., Stevens, D.E. & Kuo, H. Ch. (1991). Potencial Vorticity Modeling of ITCZ and Hadley Circulation. *American*

- Meteorological Society. *J. Atmos. Sci.*, 48(12), 1493-1509.
- TAFB. (2011). *Changes to the TAFB portion of the unified surface analysis*. National Hurricane Center (NHC-NOAA).
- Thorncroft, C.D., Hall N.M. & Kiladis G.N. (2008). Three-Dimensional Structure and Dynamics of African Easterly Waves. Part III: Genesis. *J. Atmos. Sci.*, 65, 3596–3607. doi: 10.1175/2008JAS2575.1.
- Yolande, L.S, Robert, A. & Houze, Jr. (2002). Observations of Variability on Synoptic Timescales in the East Pacific ITCZ. American Meteorological Society. *J. Atmos. Sci.*, 59, 1723–1743. doi: 10.1175/1520-0469.
- Zehnder, J. A. & Powell, D. M. (1999). The interaction of easterly waves, orography, and the intertropical convergence zone in the genesis of eastern Pacific tropical cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 1566–1585. doi:10.1175/1520-0493(1999)127<1566:TI OEWO>2.0.CO;2.