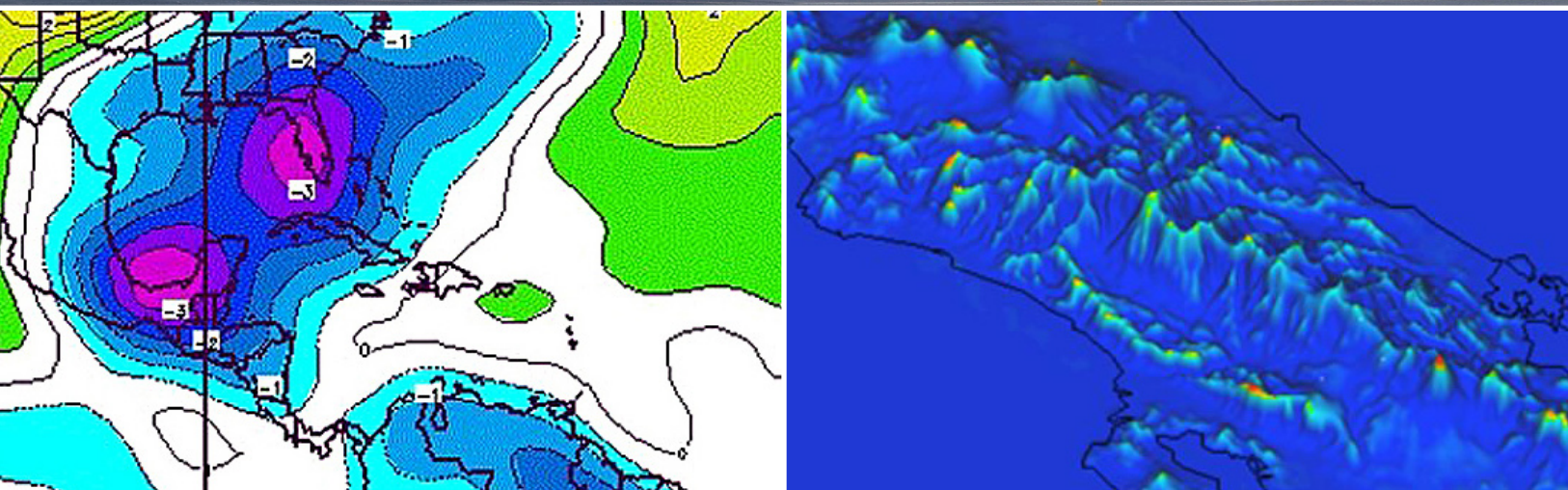


# TÓPICOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS

ISSN 1409 - 2034

Volumen 16

Diciembre 2017





# TÓPICOS METEOROLÓGICOS Y OCEANOGRÁFICOS

ISSN 1409 - 2034

Volumen 16

Diciembre 2017

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, MSc. María Esther Suárez Baltodano.

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 **Análisis sinóptico de casos de eventos extremos de lluvia asociados a líneas de cortante de empujes fríos que han llegado a Costa Rica en el periodo invernal**

GABRIELA CHINCHILLA, JORGE GUTIÉRREZ, ELADIO ZÁRATE

- 19 **Importancia de la interpretación e implementación de las regulaciones y procedimientos meteorológicos para la aviación internacional**

JOSE PABLO VALVERDE MORA

- 28 **Comparación y evaluación de diferentes esquemas de parametrización de cúmulos con el WRF EMS aplicadas al caso del huracán Otto**

DANIEL POLEO, CAMILO VINDAS, WERNER STOLTZ



# Análisis sinóptico de casos de eventos extremos de lluvia asociados a líneas de cortante de empujes fríos que han llegado a Costa Rica en el periodo invernal

GABRIELA CHINCHILLA<sup>1</sup>

JORGE GUTIÉRREZ<sup>2</sup>

ELADIO ZÁRATE<sup>3</sup>

## Resumen

Los empujes fríos están conformados por varios sistemas meteorológicos, esto hace que su estudio o análisis sea complejo. En trabajos anteriores, se determinó que más de una tercera parte de los eventos extremos de lluvia que se registraron desde noviembre hasta febrero en la década del 2000 al 2010 coinciden con el tránsito de líneas de cortante por Costa Rica. Con el propósito de obtener más información acerca del comportamiento sinóptico de los eventos de lluvia más intensos en el periodo de estudio, se analizó la configuración sinóptica que caracterizó a los eventos de mayor y de menor magnitud, encontrando que las anomalías de los campos sinópticos compuestos muestran claramente las diferencias entre estos dos tipos de eventos.

**PALABRAS CLAVE:** EMPUJE FRÍO, FRENTE FRÍO, LÍNEA DE CORTANTE, MASAS DE AIRE, ANÁLISIS SINÓPTICO.

## Abstract

Cold surges are comprised by several meteorological systems, which makes their analysis a hard task to perform. It has been pointed out, in a previous article, that more than a third of extreme events of rain registered between November and February during the period comprised between the years 2000 and 2010 coincide with the passage of shearlines through or near the Costa Rican territory. In order to get more information about the synoptic behavior of the most intense events in the 2000-2010 period, the synoptic structure of the extreme events with the major and minor impacts has been analyzed. It was found that the anomalies associated to the synoptic fields related to extreme events are quite different from those anomalies related to the synoptic fields of weaker events.

**KEY WORDS:** COLD SURGE, COLD FRONT, SHEAR LINE, AIR MASS, SYNOPTIC ANALYSIS.

## 1. INTRODUCCIÓN

El empuje frío es el fenómeno meteorológico que afecta por excelencia a Costa Rica durante el periodo invernal del hemisferio norte, siendo el de mayor frecuencia mensual en este periodo

del año según IMN, MINAET y PNUD (2011). Las regiones con mayor incidencia de lluvias extremas ocasionadas por los empujes fríos son el Caribe y la Zona Norte, siendo los cantones de la Región Caribe y algunos de la Zona Norte los sectores del país con mayor riesgo, así como los sectores con mayor

- 1 Máster en Ciencias de la Atmósfera. Departamento de Meteorología Sinóptica y Aeronáutica. Instituto Meteorológico Nacional. Correo electrónico: gchinchilla@imn.ac.cr.
- 2 Doctor en Meteorología. Director del Programa de Posgrado en Física. Escuela de Física. Universidad de Costa Rica. Correo electrónico: jaim613@yahoo.co.uk.
- 3 Investigador *Ad-honorem* de la Escuela de Física de la Universidad de Costa Rica. Correo electrónico: elzarate2003@yahoo.com.

vulnerabilidad en sus sistemas social y económico, dadas sus condiciones humanas, de infraestructura y servicios, las cuales están asociadas a altos niveles de pobreza en zonas rurales (IMN, MINAET y PNUD, 2011). Dado que la Región Caribe posee una combinación de altos índices de riesgo y vulnerabilidad, surge la necesidad de realizar un análisis profundo de los principales sistemas climáticos que afectan esta región del país. Específicamente cantones del Caribe y de la Zona Norte como Los Chiles, Sarapiquí, Upala y Matina, que presentan patrones de pobreza y bajos índices de Desarrollo Humano o Desarrollo Relativo al Género, según lo indican IMN y CRRH (2014).

Los empujes fríos son sistemas complejos que están compuestos de varios elementos atmosféricos que, a pesar de tener sus propias características, a su vez están relacionados entre sí conformando un amplio sistema dinámico en la atmósfera el cual tiene frecuencia estacional. El frente frío como parte de un empuje frío, está relacionado a las características de las masas de aire que lo establecen, el mismo es generado por el avance de la masa fría y seca sobre la masa cálida y húmeda de origen tropical, provocando advección fría en su avance latitudinal desde el norte hacia el sur. La baroclinicidad o advección de temperatura de estas masas, se modifica durante su paso por superficies más cálidas, especialmente si es marítima debido al transporte vertical de calor latente. Con ello se induce una gran frontera de alta baroclinicidad llamada frente frío, la cual es un área de transición entre dos masas de aire de diferente densidad. A su vez, la densidad dependerá de la temperatura y de la humedad de la masa (Davison, 2015).

De acuerdo a Chinchilla, Gutiérrez y Zárate (2016), un 32,8% de los eventos extremos que se registraron entre noviembre y febrero en la década del 2000 al 2010, coinciden con el tránsito de líneas de cortante asociadas a empujes fríos por Costa Rica. En dicha investigación, se procedió a establecer un umbral a partir del cual

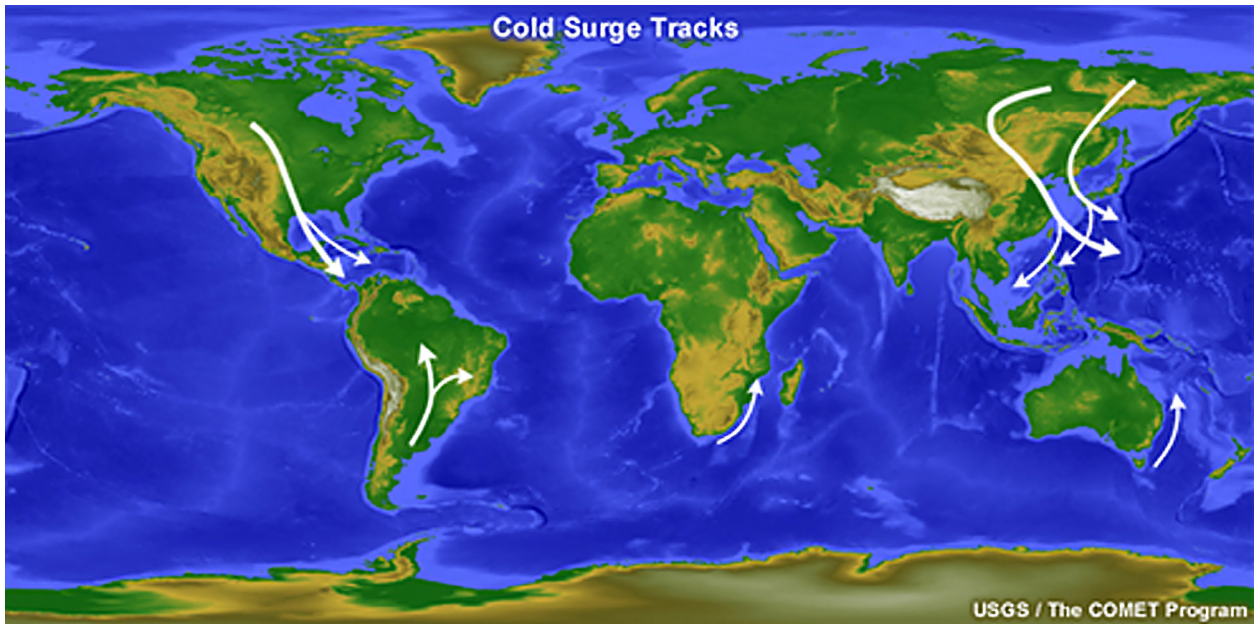
se determina un posible evento extremo (EE), para ello se calculó el percentil 90 de cada una de las series de datos de lluvia de las estaciones meteorológicas, de forma tal que el valor del percentil 90 de cada estación sería el umbral a partir del cual se establecería un evento extremo (IPCC, 2013).

## 1.1. Empujes fríos

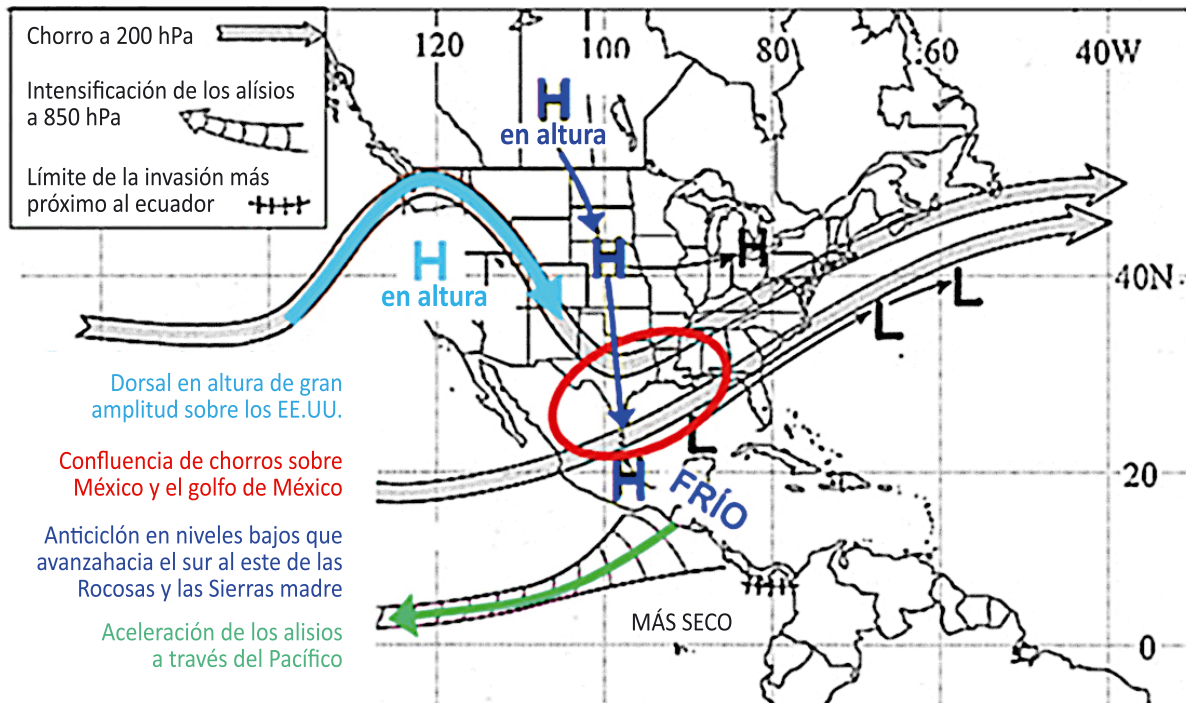
Irrupciones de aire frío en las zonas tropicales se producen, cuando masas de aire más frío de lo normal se mueven lo suficientemente rápido para lograr que la influencia de la capa cálida subyacente disminuya. Se producen comúnmente cuando el aire frío fluye hacia el ecuador, en el lado de sotavento (este) de las principales cadenas montañosas orientadas de norte a sur, como se muestra en la figura 1 en casos vistos en Asia y las Américas. Otros casos que no han sido forzados por la topografía, pueden crear también riesgos como en el norte de África donde los fuertes vientos asociados a los frentes fríos pueden ocasionar graves tormentas de polvo, según se menciona en MetEd (2015).

Cerca de un 15-20% de los días de invierno en el norte del mar Caribe, se ven afectados por los frentes que son los principales productores sinópticos de las precipitaciones y tormentas eléctricas durante el invierno. Los frentes en invierno suelen tener una orientación de noreste a suroeste (NE a SO), como describe Henry (1979), y son el sector frontal de los empujes fríos, los cuales en raras ocasiones alcanzan la costa de Suramérica (MetEd, 2015).

Según Reding (1992), en promedio 16 empujes fríos afectan a América Central al año, con variaciones de  $\pm 40\%$  entre eventos de ENOS. Qué tan cerca del ecuador lleguen los empujes fríos depende según Schultz (1998), de las características topográficas. Los empujes son más fríos cuando:



**Figura 1.** Trayectorias frecuentes de empujes fríos a nivel mundial. Fuente: Garreaud (2001), adaptado por MetEd (2015).



**Figura 2.** Características relacionadas con empujes fríos en Centroamérica. Fuente: Schultz (1998) adaptado por MetEd (2015).

- Una dorsal de gran amplitud en altura persiste sobre el oeste de Estados Unidos.
- El ingreso y la confluencia del jet polar y el jet subtropical ocurre sobre México y el golfo de México, y

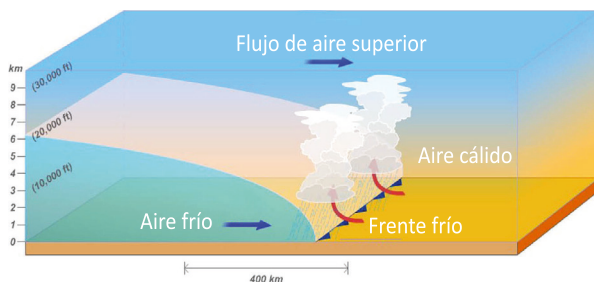
- c) Un anticiclón sobre territorio canadiense en la troposfera baja se mueve hacia el ecuador a lo largo de las Montañas Rocallosas y la Sierra Madre, como se muestra en la figura 2.

La importancia de los empujes fríos radica no solamente en su impacto transitorio, sino que además juegan un papel significativo en el mantenimiento del balance de calor sobre las regiones subtropicales donde son frecuentes, con un efecto de enfriamiento de bajo nivel casi tan grande como el calentamiento producido por la circulación meridional media, como lo concluye Garreaud (2001).

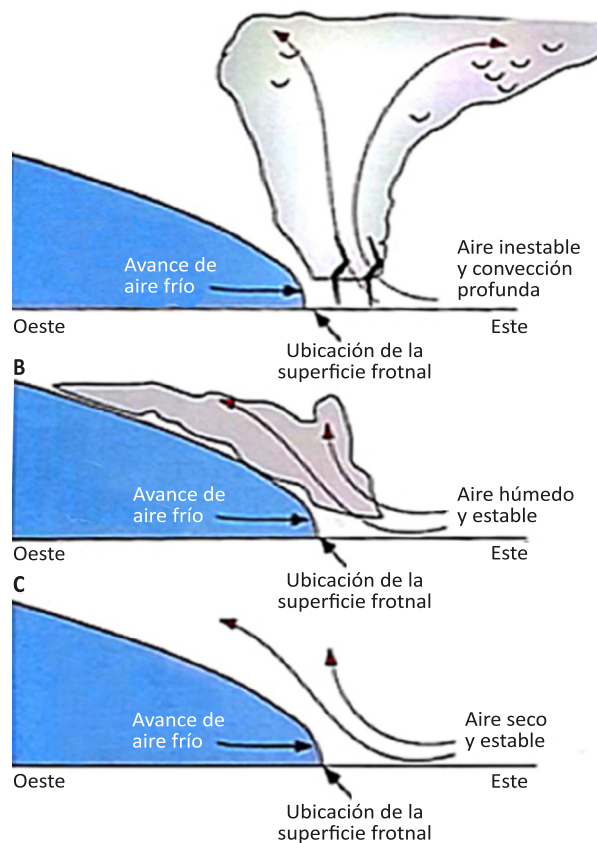
## 1.2. Frente frío

El sector limítrofe de la masa de aire frío usualmente presenta forma de domo, tal como está representado en la figura 3, situación que provoca que la posición horizontal del frente cambie respecto a la altitud, supeditando dicha posición a la altura de la masa de aire fría.

El tipo de precipitación que se produce a lo largo del frente frío depende de las características de la masa cálida (figura 4). Si la masa cálida es húmeda y se encuentra inestable, los ascensos verticales de los flujos de aire podrían producir una banda de convección profunda con tormenta eléctrica. Por otro lado, si la masa de aire cálido se encuentra estable, las nubes que se forman por los ascensos verticales serán de poca profundidad



**Figura 3.** Corte vertical del avance de un frente frío. Nótese el aire frío avanzando hacia el aire cálido. Fuente: Prentice Hall, Inc. (2003).



**Figura 4.** Corte vertical de tres frentes fríos. En A, el aire localizado al este del frente es inestable y presenta convección profunda, fuertes ascensos verticales y tormenta eléctrica. En B, el aire es húmedo y estable, presenta ascensos sobre la superficie frontal. En C, el aire es seco y se eleva sobre la superficie frontal, sin embargo, no se forman nubes. En todos los casos, el aire frío está avanzando hacia el aire más cálido. Fuente: Rauber (2002).

con lluvias débiles o ausencia de ellas. En algunos casos el aire cálido es seco, por lo que no habrá formación de nubes.

En esta investigación se analizaron las características de la línea de cortante. Según Davison (2015), las líneas de cortante están asociadas con cambios en el viento (dirección y/o velocidad), mientras que los frentes son un área de transición entre dos masas de aire de diferente densidad.

- La densidad depende de la temperatura y el contenido de humedad de la masa.



- Los frentes se pueden encontrar a lo largo de las líneas de cortante o rezagados detrás de ellas.

## 2. METODOLOGÍA

Para el análisis de la precipitación se utilizaron datos diarios de lluvia, provenientes de estaciones meteorológicas mecánicas del

Instituto Meteorológico Nacional (IMN), durante los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero, del periodo 2000 al 2010, en la Zona Norte y la Región Caribe, además de algunas localizadas al este y norte del Valle Central. En este trabajo se utilizaron los datos y el análisis realizado por Chinchilla, Gutiérrez y Zárate (2016). En el cuadro 1, se especifican las características de las estaciones meteorológicas utilizadas en

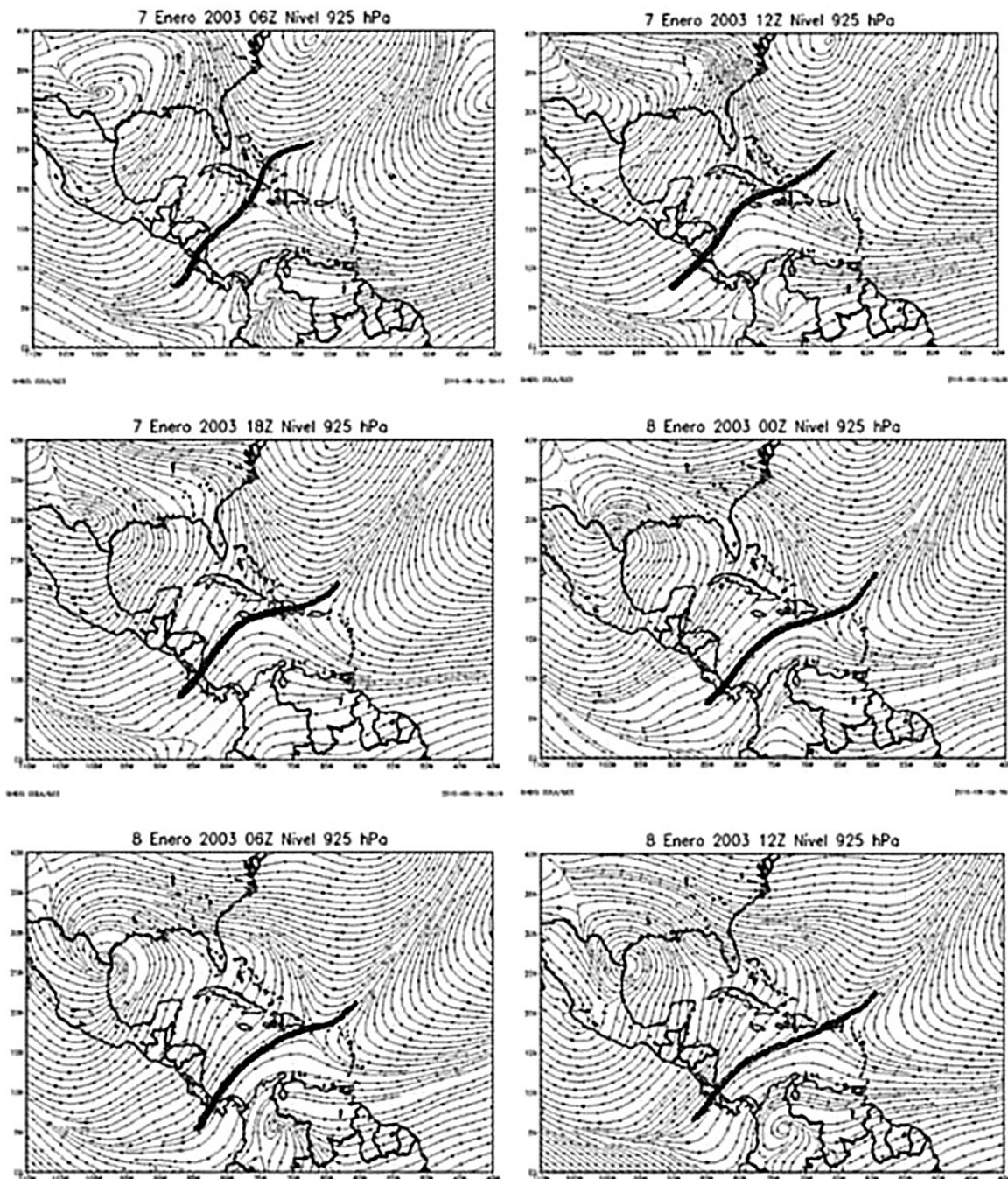
Cuadro 1. Estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio

| Número | Nombre                       | Latitud Norte | Longitud Oeste | Elevación (m) | Datos faltantes (%) |
|--------|------------------------------|---------------|----------------|---------------|---------------------|
| 69506  | San Miguel de Sarapiquí      | 10°18'57"     | 84°10'57"      | 500           | 9                   |
| 69512  | Zarcero                      | 10°11'31"     | 84°23'35"      | 1736          | 0                   |
| 69515  | Quebrada Azul                | 10°24'12"     | 84°28'21"      | 83            | 0                   |
| 69537  | La Selva de Sarapiquí        | 10°25'53"     | 84°00'10"      | 40            | 13                  |
| 69556  | San Vicente Ciudad Quesada   | 10°17'16"     | 84°22'58"      | 1450          | 0                   |
| 69565  | Pital                        | 10°27'48"     | 84°16'30"      | 150           | 2                   |
| 69579  | Santa Clara                  | 10°21'39"     | 84°30'30"      | 170           | 0                   |
| 69591  | San Jorge Los Chiles         | 10°43'02"     | 84°40'25"      | 55            | 5                   |
| 69613  | Laguna Caño Negro            | 10°53'31"     | 84°47'16"      | 30            | 7                   |
| 69621  | Río Achiote Bijagua          | 10°45'00"     | 84°57'51"      | 400           | 4                   |
| 69629  | Rebusca                      | 10°28'28"     | 84°00'32"      | 26            | 5                   |
| 69635  | CoopeVega                    | 10°43'07"     | 84°24'01"      | 100           | 8                   |
| 69637  | San Gerardo (Río Cuarto)     | 10°24'56"     | 84°09'30"      | 180           | 0                   |
| 69639  | Agroverde                    | 10°20'52"     | 84°13'45"      | 480           | 5                   |
| 71002  | La Mola                      | 10°20'36"     | 83°40'17"      | 70            | 0                   |
| 73010  | Catie                        | 09°53'25"     | 83°39'11"      | 602           | 0                   |
| 73018  | Linda Vista El Guarco        | 09°50'01"     | 83°58'15"      | 1400          | 1                   |
| 73024  | Paraíso Los Naranjos         | 09°49'38"     | 83°52'44"      | 1380          | 5                   |
| 73035  | Navarro Cartago              | 09°48'19"     | 83°52'21"      | 1100          | 0                   |
| 73048  | Dulce Nombre                 | 09°50'19"     | 83°54'26"      | 1345          | 0                   |
| 73091  | Hacienda El Carmen           | 10°12'01"     | 83°28'46"      | 15            | 0                   |
| 73103  | Sitio Mata Turrialba         | 09°52'42"     | 83°37'33"      | 900           | 0                   |
| 73109  | Guayabo Turrialba            | 09°58'21"     | 83°41'33"      | 1003          | 3                   |
| 73115  | Capellades Birris            | 09°54'36"     | 83°47'05"      | 1610          | 0                   |
| 73117  | San Juan de Chicoá           | 09°57'15"     | 83°51'52"      | 3090          | 3                   |
| 73121  | Ingenio Juan Viñas           | 09°53'43"     | 83°45'24"      | 1165          | 0                   |
| 77002  | La Lola                      | 10°05'30"     | 83°23'32"      | 40            | 0                   |
| 84006  | Hda. Concepción Tres Ríos    | 09°55'46"     | 82°00'22"      | 1320          | 0                   |
| 84019  | Hda, La Laguna Curridabat    | 09°55'18"     | 82°00'50"      | 1240          | 0                   |
| 84030  | La Laguna Fraijanes          | 10°08'09"     | 84°11'30"      | 1850          | 0                   |
| 84125  | Finca 3 Llano Grande Cartago | 09°56'43"     | 83°55'18"      | 2220          | 0                   |
| 84159  | Hda. La Giralda Heredia      | 10°07'41"     | 84°09'35"      | 2049          | 0                   |
| 85006  | Puerto Vargas Limón          | 09°43'52"     | 82°48'54"      | 3             | 0                   |

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional.

este análisis: su número el cual incluye en los dos primeros dígitos el correspondiente a la cuenca, su nombre, su latitud y longitud en grados, minutos y segundos, su elevación en metros y por último el porcentaje de datos faltantes de la serie utilizada.

Para el establecimiento de las líneas de cortante (LC), se crearon mapas diarios y horarios de líneas de corriente en el nivel de 925 hPa, utilizando los datos de la componente zonal y meridional del viento de la Base de Datos del Reanálisis del NCEP y generados por el desplegador gráfico GrADS,



**Figura 5.** Secuencia de seis horas de mapas de líneas de corriente en el nivel de 925 hPa. Válidos para: 06Z, 12Z, 18Z de 7 enero 2003 y 00Z, 06Z, 12Z del 8 de enero de 2003. Fuente: Chinchilla, Gutiérrez y Zárate (2016).



dentro del área que va desde 0° - 40° de latitud norte y de 40° - 110° de longitud oeste, como se realizó en Chinchilla, Gutierrez y Zárate (2016).

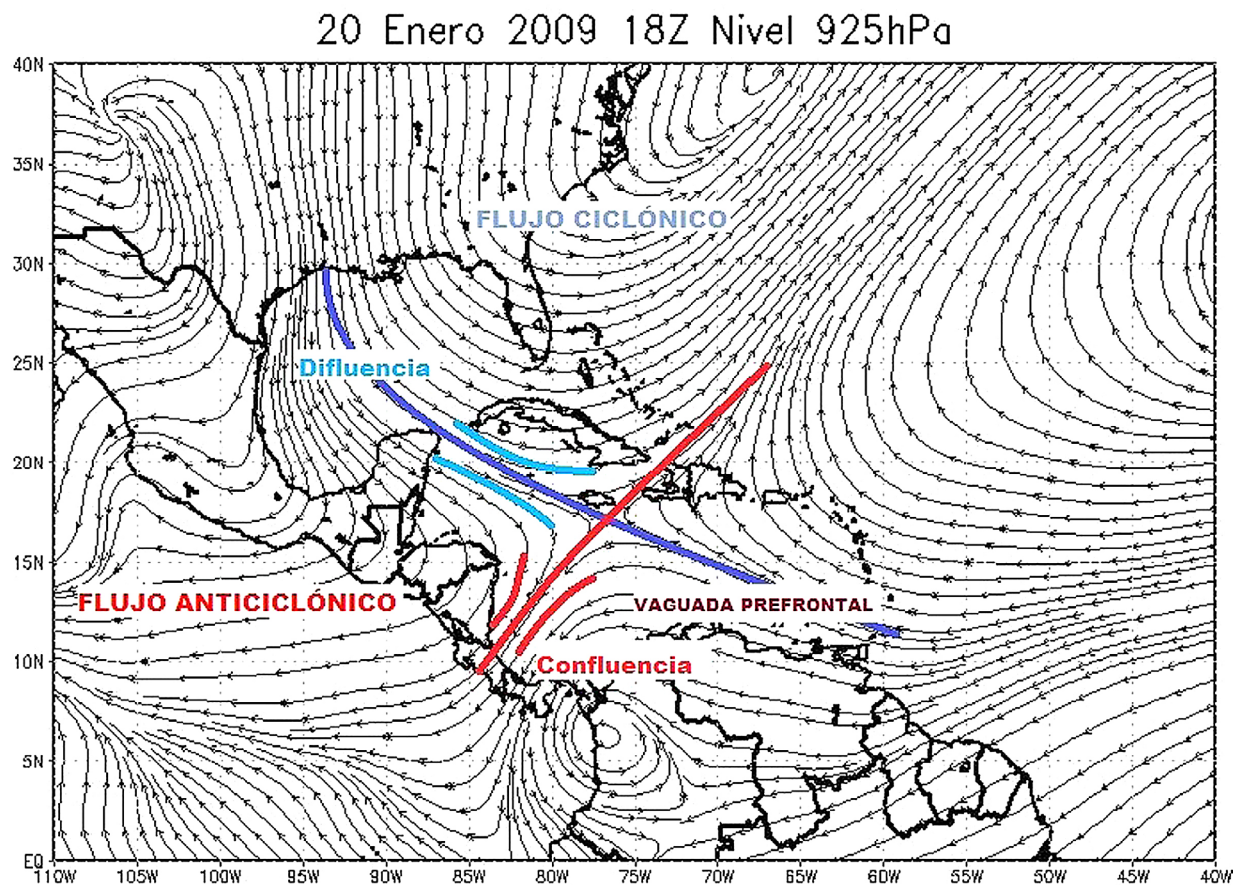
Las líneas de corriente están generadas de forma diaria y cada seis horas, esta última es especialmente necesaria para analizar los eventos donde el sistema se traslada rápidamente sobre la región centroamericana o mar Caribe, y se requiere una mejor resolución temporal para poder describir su avance y momento de llegada a Costa Rica.

En la figura 5 se presentan una serie de mapas de líneas de corriente, generados cada seis horas: 06Z, 12Z, 18Z del 7 enero 2003 y 00Z, 06Z, 12Z del 8 de enero del mismo año en el nivel de 925 hPa.

Para identificar las LC en los gráficos de líneas de corriente, se usó el análisis de corriente/flujo de Davison (2015), el cual utiliza la confluencia y/o difluencia por dirección, por medio del trazado de la asíntota confluyente.

Con el fin de clasificar una asíntota confluyente como una LC, se buscó identificar las siguientes características en los mapas de líneas de corriente:

- La difluencia entre el flujo ciclónico de la baja presión y el flujo anticiclónico de la alta presión, ambos sistemas pertenecientes a empujes fríos.
- La confluencia entre el flujo anticiclónico de la alta presión del empuje frío y el flujo tropical de los vientos alisios o de la vaguada prefrontal.



**Figura 6.** Esquemático de los componentes sinópticos de los flujos establecidos en los mapas de líneas de corrientes para determinar el establecimiento de una LC. Caso del 20 de enero de 2009 a las 18Z en el nivel de 925 hPa. Fuente: Chinchilla, Gutierrez y Zárate (2016).

En la figura 6 se muestra el esquema de la clasificación de una asintota confluyente (línea recta de color rojo que llega al país) como LC.

Con el propósito de analizar la información relacionada al comportamiento sinóptico de los eventos más intensos de lluvias, en el periodo de estudio, se ordenaron de forma decreciente cada uno de los eventos obtenidos; es decir, las fechas en las que se dieron eventos extremos (EE) y que a su vez cumplieron con el requisito de tener una línea de cortante transitando por el país.

Se escogieron las 10 fechas con mayor cantidad de estaciones que muestran simultaneidad de EE-LC, así como las 10 fechas con menor cantidad. A las que presentaron mayor cantidad se les llamó “casos altos” y análogamente a las de menor cantidad se les llamó “casos bajos”. Se analizaron las anomalías de las siguientes variables: presión a nivel del mar (Pa), vector viento en el nivel de 200 hPa (m/s), omega en 500 hPa (Pa/s) y la temperatura del aire en superficie (K).

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se identificaron las fechas en las se encontraron líneas de cortante (LC) sobre Costa Rica y que coinciden con la ocurrencia de eventos extremos (EE). En el cuadro 2 están clasificadas por temporadas, para los meses de noviembre a febrero del 2000 al 2010. Al final del cuadro se incluye el total de fechas para cada temporada (Chinchilla, Gutiérrez y Zárate, 2016).

Se observó que las temporadas de menor cantidad de días con líneas de cortante sobre el país fueron: 2002-2003 y 2006-2007, con un total de 8 y 9 días con LC respectivamente; caso contrario, las temporadas de mayor cantidad de días con tránsito o llegada de LC a Costa Rica fueron: 2005-2006 y 2009-2010, con 17 días ambas.

Con el propósito de obtener más información acerca del comportamiento sinóptico de los

eventos más intensos en el periodo de estudio, se ordenó de forma decreciente cada uno de los eventos obtenidos en Chinchilla, Gutiérrez y Zárate (2016); es decir, las fechas en las que se dieron eventos extremos y que a su vez cumplieran con el requisito de tener una línea de cortante transitando por el país.

En el cuadro 3 se especifica de forma decreciente, la cantidad de eventos extremos hallados en Chinchilla (2016) y su correspondiente fecha. El total de estaciones utilizadas fue de 33. En color azul (verde) se especifican ejemplos de casos con mayor (menor) cantidad de eventos extremos que coinciden con líneas de cortante.

Tomando en cuenta que se utilizaron 33 estaciones y que en total se registraron 133 días con EE y LC pasando por Costa Rica en todas las temporadas analizadas (EE-LC), puede notarse en el cuadro 3 que casi una quinta parte del total, un 18% (24 días) de las fechas establecidas, presentaron eventos extremos en 11 estaciones o más que representan la tercera parte del total utilizado en la investigación. Es decir que de cada 5,5 días que cumplan con la condición EE-LC, aproximadamente uno de ellos logra activar al menos una tercera parte del Caribe, Zona Norte y del Valle Central Oriental y Occidental.

En ello radica la importancia de analizar, cuál es la configuración sinóptica que caracteriza a los eventos particulares, que logran propiciar la ocurrencia de EE que pudiesen estar relacionados al paso de LC por nuestro país.

Por lo anterior, se escogieron del cuadro 3 las 10 fechas con mayor cantidad de estaciones con EE-LC, así como las 10 fechas con menor cantidad. A las que presentaron mayor cantidad de EE-LC se les llamó “casos altos” y análogamente, a las de menor cantidad se les llamó “casos bajos”.

En el cuadro 3, los casos altos corresponden a las fechas con los números asignados del 1 al 10 y resaltados en color azul; los números del 106

Cuadro 2. Fechas en las se encontraron líneas de cortante sobre Costa Rica y que coinciden con la ocurrencia de eventos extremos

|                    | 2000-2001 | 2001-2002 | 2002-2003 | 2003-2004 | 2004-2005 | 2005-2006 | 2006-2007 | 2007-2008 | 2008-2009 | 2009-2010 |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                    | 01-nov-00 | 10-nov-01 | 06-nov-02 | 13-nov-03 | 07-nov-04 | 21-nov-05 | 18-nov-06 | 07-nov-07 | 16-nov-08 | 10-nov-09 |
|                    | 15-nov-00 | 17-nov-01 | 17-nov-02 | 14-nov-03 | 08-nov-04 | 12-dic-05 | 19-nov-06 | 08-nov-07 | 17-nov-08 | 11-nov-09 |
|                    | 22-nov-00 | 18-nov-01 | 21-nov-02 | 28-nov-03 | 14-nov-04 | 13-dic-05 | 20-nov-06 | 09-nov-07 | 18-nov-08 | 12-nov-09 |
|                    | 03-dic-00 | 19-nov-01 | 28-nov-02 | 10-dic-03 | 12-dic-04 | 26-dic-05 | 28-nov-06 | 10-nov-07 | 21-nov-08 | 14-nov-09 |
|                    | 04-dic-00 | 21-nov-01 | 07-ene-03 | 11-dic-03 | 14-dic-04 | 27-dic-05 | 26-dic-06 | 15-nov-07 | 25-nov-08 | 26-nov-09 |
|                    | 29-dic-00 | 22-nov-01 | 08-ene-03 | 18-dic-03 | 18-dic-04 | 04-ene-06 | 10-ene-07 | 16-nov-07 | 01-dic-08 | 27-nov-09 |
|                    | 30-dic-00 | 04-dic-01 | 19-ene-03 | 19-dic-03 | 19-dic-04 | 05-ene-06 | 29-ene-07 | 17-nov-07 | 02-dic-08 | 20-dic-09 |
|                    | 03-ene-01 | 05-dic-01 | 27-ene-03 | 20-dic-03 | 26-dic-04 | 06-ene-06 | 17-feb-07 | 20-nov-07 | 03-dic-08 | 05-ene-10 |
|                    | 05-ene-01 | 21-dic-01 |           | 21-dic-03 | 16-ene-05 | 07-ene-06 | 18-feb-07 | 01-dic-07 | 07-dic-08 | 06-ene-10 |
|                    | 21-ene-01 | 26-dic-01 |           | 07-ene-04 | 31-ene-05 | 14-ene-06 |           | 02-ene-08 | 12-dic-08 | 09-ene-10 |
|                    | 22-ene-01 | 03-ene-02 |           | 13-ene-04 | 10-feb-05 | 15-ene-06 |           | 03-ene-08 | 13-dic-08 | 10-ene-10 |
|                    | 23-ene-01 | 06-ene-02 |           | 15-ene-04 |           | 26-ene-06 |           |           | 19-ene-09 | 06-feb-10 |
|                    | 24-ene-01 | 23-feb-02 |           | 18-feb-04 |           | 27-ene-06 |           |           | 22-ene-09 | 13-feb-10 |
|                    | 25-ene-01 | 24-feb-02 |           | 26-feb-04 |           | 12-feb-06 |           |           | 03-feb-09 | 16-feb-10 |
|                    |           |           |           | 27-feb-04 |           | 13-feb-06 |           |           | 04-feb-09 | 17-feb-10 |
|                    |           |           |           | 28-feb-04 |           | 14-feb-06 |           |           | 06-feb-09 | 18-feb-10 |
|                    |           |           |           |           |           | 26-feb-06 |           |           |           | 27-feb-10 |
| Días por temporada | 14        | 14        | 8         | 16        | 11        | 17        | 9         | 11        | 16        | 17        |

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 3. Orden decreciente de los eventos extremos (EE) que registraron con línea de cortante sobre Costa Rica (EE-LC) y la fecha de registro

| #  | Fecha     | EE-LC | #  | Fecha     | EE-LC | #  | Fecha     | EE-LC | #   | Fecha     | EE-LC | #   | Fecha     | EE-LC |
|----|-----------|-------|----|-----------|-------|----|-----------|-------|-----|-----------|-------|-----|-----------|-------|
| 1  | 17-nov-02 | 29    | 32 | 17-nov-07 | 9     | 63 | 07-ene-06 | 4     | 94  | 27-ene-06 | 2     | 125 | 01-dic-07 | 1     |
| 2  | 02-dic-08 | 24    | 33 | 17-nov-08 | 9     | 64 | 26-dic-06 | 4     | 95  | 12-feb-06 | 2     | 126 | 19-ene-09 | 1     |
| 3  | 07-nov-04 | 23    | 34 | 18-nov-08 | 9     | 65 | 09-nov-07 | 4     | 96  | 19-nov-06 | 2     | 127 | 22-ene-09 | 1     |
| 4  | 04-feb-09 | 22    | 35 | 06-feb-09 | 9     | 66 | 07-ene-06 | 4     | 97  | 17-feb-07 | 2     | 128 | 10-nov-09 | 1     |
| 5  | 10-dic-03 | 20    | 36 | 17-nov-01 | 8     | 67 | 26-dic-06 | 4     | 98  | 10-nov-07 | 2     | 129 | 26-nov-09 | 1     |
| 6  | 15-ene-06 | 18    | 37 | 27-ene-03 | 8     | 68 | 09-nov-07 | 4     | 99  | 07-dic-08 | 2     | 130 | 20-dic-09 | 1     |
| 7  | 28-nov-02 | 17    | 38 | 18-nov-06 | 8     | 69 | 03-dic-00 | 3     | 100 | 12-dic-08 | 2     | 131 | 05-ene-10 | 1     |
| 8  | 03-feb-09 | 17    | 39 | 07-nov-07 | 8     | 70 | 29-dic-00 | 3     | 101 | 14-nov-09 | 2     | 132 | 06-feb-10 | 1     |
| 9  | 11-dic-03 | 16    | 40 | 12-nov-09 | 8     | 71 | 30-dic-00 | 3     | 102 | 27-nov-09 | 2     | 133 | 13-feb-10 | 1     |
| 10 | 19-dic-04 | 16    | 41 | 18-feb-04 | 7     | 72 | 03-ene-01 | 3     | 103 | 09-ene-10 | 2     |     |           |       |
| 11 | 02-ene-08 | 16    | 42 | 13-feb-06 | 7     | 73 | 18-nov-01 | 3     | 104 | 16-feb-10 | 2     |     |           |       |
| 12 | 21-nov-08 | 15    | 43 | 25-ene-01 | 6     | 74 | 04-dic-01 | 3     | 105 | 27-feb-10 | 2     |     |           |       |
| 13 | 18-feb-10 | 15    | 44 | 21-nov-01 | 6     | 75 | 24-feb-02 | 3     | 106 | 15-nov-00 | 1     |     |           |       |
| 14 | 14-ene-06 | 14    | 45 | 08-nov-07 | 6     | 76 | 20-dic-03 | 3     | 107 | 05-ene-01 | 1     |     |           |       |
| 15 | 03-ene-08 | 14    | 46 | 01-dic-08 | 6     | 77 | 31-ene-05 | 3     | 108 | 21-ene-01 | 1     |     |           |       |
| 16 | 28-nov-03 | 13    | 47 | 24-ene-01 | 5     | 78 | 10-feb-05 | 3     | 109 | 10-nov-01 | 1     |     |           |       |
| 17 | 14-dic-04 | 13    | 48 | 22-nov-01 | 5     | 79 | 14-feb-06 | 3     | 110 | 19-nov-01 | 1     |     |           |       |
| 18 | 18-feb-07 | 13    | 49 | 21-dic-03 | 5     | 80 | 28-nov-06 | 3     | 111 | 21-dic-01 | 1     |     |           |       |
| 19 | 05-dic-01 | 12    | 50 | 18-dic-04 | 5     | 81 | 22-nov-00 | 2     | 112 | 26-dic-01 | 1     |     |           |       |
| 20 | 27-feb-04 | 12    | 51 | 26-dic-04 | 5     | 82 | 22-ene-01 | 2     | 113 | 19-ene-03 | 1     |     |           |       |
| 21 | 26-ene-06 | 12    | 52 | 13-dic-08 | 5     | 83 | 03-ene-02 | 2     | 114 | 13-nov-03 | 1     |     |           |       |
| 22 | 03-dic-08 | 12    | 53 | 11-nov-09 | 5     | 84 | 23-feb-02 | 2     | 115 | 13-ene-04 | 1     |     |           |       |
| 23 | 08-nov-04 | 11    | 54 | 04-dic-00 | 4     | 85 | 07-ene-03 | 2     | 116 | 15-ene-04 | 1     |     |           |       |
| 24 | 12-dic-05 | 11    | 55 | 23-ene-01 | 4     | 86 | 08-ene-03 | 2     | 117 | 12-dic-04 | 1     |     |           |       |
| 25 | 16-ene-05 | 10    | 56 | 06-ene-02 | 4     | 87 | 14-nov-03 | 2     | 118 | 27-dic-05 | 1     |     |           |       |
| 26 | 25-nov-08 | 10    | 57 | 6-nov-02  | 4     | 88 | 18-dic-03 | 2     | 119 | 04-ene-06 | 1     |     |           |       |
| 27 | 06-ene-10 | 10    | 58 | 21-nov-02 | 4     | 89 | 19-dic-03 | 2     | 120 | 05-ene-06 | 1     |     |           |       |
| 28 | 10-ene-10 | 10    | 59 | 28-feb-04 | 4     | 90 | 07-ene-04 | 2     | 121 | 26-feb-06 | 1     |     |           |       |
| 29 | 17-feb-10 | 10    | 60 | 21-nov-05 | 4     | 91 | 26-feb-04 | 2     | 122 | 20-nov-06 | 1     |     |           |       |
| 30 | 01-nov-00 | 9     | 61 | 13-dic-05 | 4     | 92 | 14-nov-04 | 2     | 123 | 10-ene-07 | 1     |     |           |       |
| 31 | 16-nov-07 | 9     | 62 | 26-dic-05 | 4     | 93 | 06-ene-06 | 2     | 124 | 29-ene-07 | 1     |     |           |       |

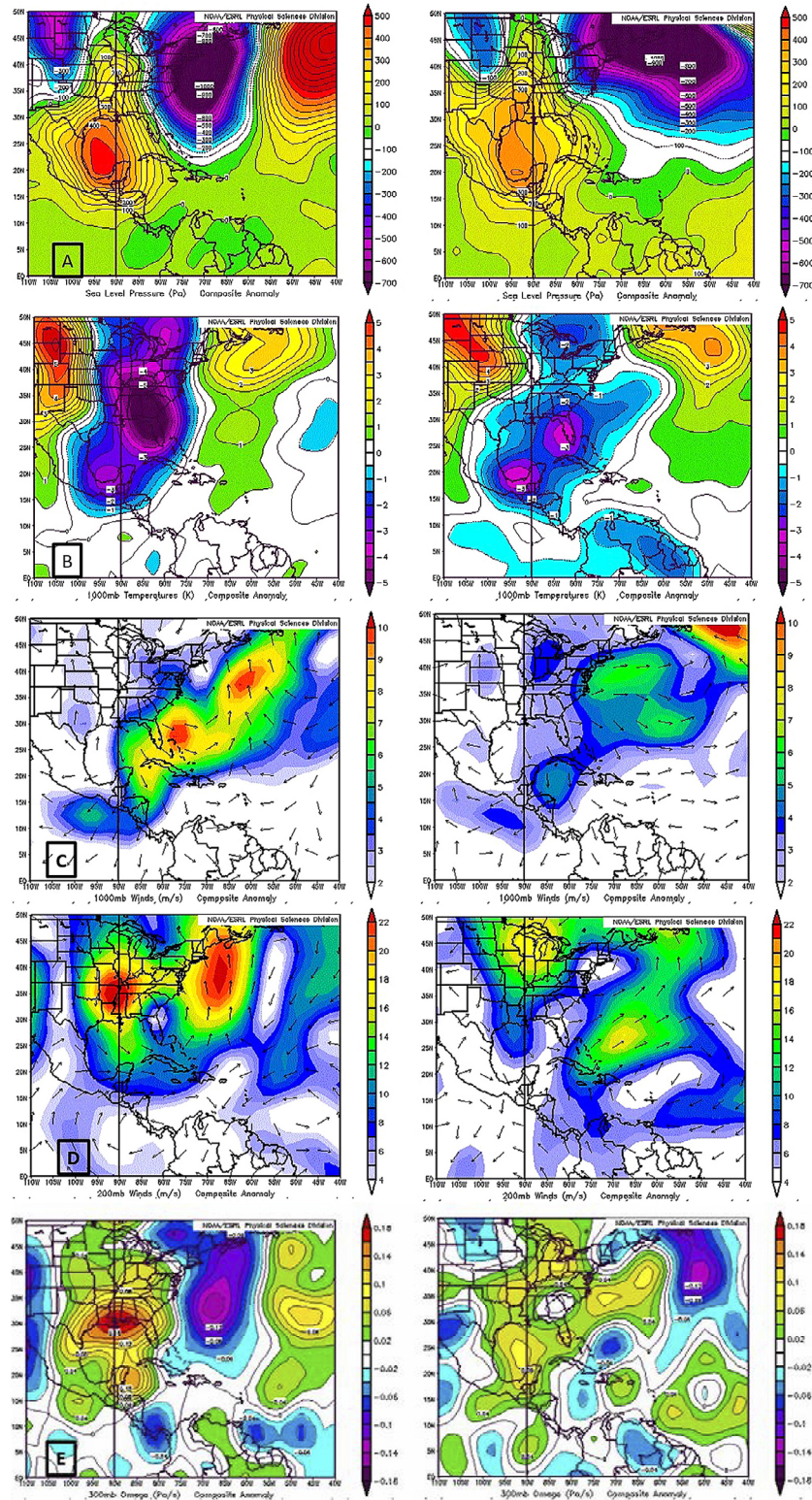
Fuente: Elaboración propia.

al 115 corresponden a los casos bajos y están resaltados en color verde claro. Con estas fechas, se elaboraron los mapas compuestos de las anomalías de las siguientes variables: presión a nivel del mar (Pa), la temperatura en el nivel de 1000 hPa (K), el vector viento en nivel de 1000

hPa (m/s) y 200 hPa, y el movimiento vertical ( $\omega$ ) en 300 hPa (Pa/s), las cuales se muestran en la figura 7.

Las anomalías de los campos sinópticos compuestos, muestran con claridad las diferencias





**Figura 7.** Anomalías de los días de casos altos (izquierda) y los días de casos bajos (derecha). A. Anomalías de presión a nivel del mar. B. Anomalías de la temperatura en el nivel de 1000 hPa. C. Anomalías de vector viento en nivel en el nivel de 1000 hPa. D. Anomalías del vector viento en el nivel de 200 hPa. E. Anomalías del movimiento vertical omega en el nivel de 300 hPa. Fuente: Reanálisis NCEP-NCAR.

existentes entre los casos altos y los casos bajos. Los casos altos tienden a aparecer, en los momentos en que las anomalías de las variables tienen sus mayores variaciones en el extremo oeste del Caribe y la parte sur de Centroamérica. En la figura 7 (A), se presentan las anomalías de la presión en superficie la cual muestra para los casos altos una vaguada bien definida, que se extiende desde el este de Norteamérica / extremo oeste del Atlántico, hasta Costa Rica y Panamá, pasando por la isla La Española. Según Zárate (2013 y 2014), este tipo de vaguadas de bajo nivel benefician la convergencia. Para los casos bajos, dicha vaguada no se presenta tan definida, más bien el territorio centroamericano se conecta con el noroeste de Suramérica a través de un dorsal.

Las anomalías de la temperatura en superficie figura 7 (B), muestran un comportamiento similar al señalado anteriormente para la presión en superficie. Los casos altos presentan mayores anomalías negativas de la temperatura y se ubican justo al norte de Costa Rica, propiciando un alto gradiente térmico entre el flujo frío y el cálido. En los casos bajos, cuando las anomalías frías de la temperatura se desplazan hacia la parte central del mar Caribe, este gradiente es menor generando una menor respuesta de los eventos extremos de lluvia.

Las anomalías encontradas en la presión a nivel del mar, permiten que las anomalías del viento en el nivel de 1000 hPa (figura 7 C) para los casos altos, muestren mayor magnitud y direcciones más de norte en el Caribe Occidental que para los casos bajos. Las anomalías del oeste para los casos bajos, invaden buena parte del Atlántico Occidental, lo cual sugiere menor convergencia de bajo nivel en el sur de Centroamérica y dentro del mar Caribe.

Algo de mayor significancia en cuanto a la diferencia entre los casos altos y los bajos tipo LC-EE, es el comportamiento del viento en los niveles superiores de la atmósfera. Nótese que los casos altos en el nivel de 200 hPa (figura 7 D), muestran

un centro anticiclónico localizado sobre el sur de Centroamérica y el sector oeste del mar Caribe, mientras que para los casos bajos, el centro anticiclónico aparece ubicado ligeramente al noreste del mar Caribe. Este parece ser uno de los elementos fundamentales para el comportamiento diferente que se da entre los casos altos y los bajos. Con salida del flujo en altura, las LC parecen ser mucho más activas que sin ella.

Las configuraciones del movimiento vertical en 300 hPa (figura 7 E), reflejan los campos descritos anteriormente. El máximo de movimiento vertical ascendente para los casos altos, se extiende desde la parte occidental del Atlántico Norte, pasando sobre la parte central de las Antillas Mayores y alcanzando desde el sur de Nicaragua hasta Panamá, beneficiando con ello la producción de la lluvia en el sur de Centroamérica. Para los casos bajos, el movimiento ascendente tiende a desplazarse hacia la parte central del Mar Caribe, desfavoreciendo la producción de lluvia en esa zona.

## 4. CONCLUSIONES

Las anomalías de los campos sinópticos compuestos muestran claramente las diferencias entre los casos altos y los casos bajos, en cuanto a la cantidad combinada de eventos extremos y líneas de cortante (EE-LC) que presentan.

Los casos altos tienden a presentarse cuando las anomalías de las variables, muestran mayores variaciones en el extremo oeste del Caribe y parte sur de Centroamérica. Se observaron vaguadas de bajo nivel que benefician la convergencia y que disminuyen para los denominados casos bajos.

Se encontró que los casos altos presentan mayores anomalías negativas de temperatura que se ubicaron al norte de Costa Rica, propiciando un alto gradiente térmico entre el flujo frío y el cálido. En los casos bajos cuando las anomalías frías de la temperatura se desplazan hacia la parte

central del Mar Caribe, este gradiente es menor generando una menor respuesta de los eventos extremos de lluvia.

Para los casos altos el viento mostró mayor magnitud y dirección norte en el Caribe Occidental, comparado con los casos bajos. Se encontró que las anomalías del oeste para los casos bajos, invaden buena parte del Atlántico Occidental, sugiriendo con ello menor convergencia de bajo nivel en el sur de Centroamérica y dentro del mar Caribe.

En el nivel de 200hPa, los casos altos mostraron un centro anticiclónico localizado sobre el sur de Centroamérica y sector oeste del mar Caribe, mientras que para los casos bajos, el centro anticiclónico se ubicó ligeramente al noreste del mar Caribe. Este podría ser uno de los elementos fundamentales para el comportamiento diferente de los casos altos y bajos. Además con salida del flujo en altura las LC, parecen ser mucho más activas que sin ella.

El máximo de movimiento vertical ascendente para los casos altos, se extendió desde la parte occidental del Atlántico Norte, pasando sobre la parte central de las Antillas Mayores y alcanzando desde el sur de Nicaragua hasta Panamá, beneficiando con ello la producción de la lluvia en el sur de Centroamérica. Para los casos bajos, el máximo de movimiento ascendente tiende a desplazarse hacia la parte central del Mar Caribe, desfavoreciendo la producción de lluvia en esa zona.

Cuando se logran identificar las configuraciones sinópticas como las descritas anteriormente para los casos altos, es posible que se presenten eventos extremos de lluvia relevantes en el Caribe y la Zona Norte, así como en el este y norte del Valle Central.

## 5. REFERENCIAS

Alfaro, E. J. y Soley, F. J. (2009). Descripción de dos métodos de rellenado de datos ausentes en series de tiempo meteorológicas. *Revista de*

*Matemática: Teoría y aplicaciones*. CIMPA-UCR, 16, 60-75.

Amador, J. A. (1998). A climate feature of the tropical Americas: The trade wind easterly jet. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 5, 91-102.

Chinchilla, G. (2016). *Análisis de Eventos Extremos de lluvia ocasionados por Empujes Fríos que han llegado a Costa Rica en el periodo invernal (NDEF) del año 2000 al 2010*. Tesis de Maestría. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

Chinchilla, G.; Gutiérrez, J. y Zárate, E. (2016). Análisis de 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. *Revista Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 15, 48-62.

Davison, M. (2015). *Frentes, Líneas de Cizalladura (Shearlines) y Áreas de Confluencia y Difluencia*. HPC International Desks, NOAA, Reporte, 71p.

Garreaud, R. D. (2001). Subtropical cold surges: Regional aspects and global distribution. *International Journal of Climatology*, 21(10), 1181-1197, doi:10.1002/joc.687.

Henry, W. K. (1979). Some aspects of the fate of cold fronts in the Gulf of Mexico. *Mon. Wea. Rev.*, 107(8), 1078-1082.

Instituto Meteorológico Nacional y Comité Regional de Recursos Hídricos. (2008). *El clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica*. Segunda comunicación sobre cambio climático en Costa Rica. IMN, CRRH. 75 p.

Instituto Meteorológico Nacional. (2009). *Atlas Climatológico*. Recuperado de: <https://www.imn.ac.cr/39>.

Instituto Meteorológico Nacional. (2009). *Boletín meteorológico mensual de enero*. Recuperado de: <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/14629/ENERO.>

Instituto Meteorológico Nacional. (2009). *Boletín meteorológico mensual de febrero*. Recuperado de: <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/14629/FEBRERO.>



- Instituto Meteorológico Nacional. (2009). *Boletín meteorológico mensual de noviembre*. Recuperado de: <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/14629/NOVIEMBRE>.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2010). *Boletín meteorológico mensual de enero*. Recuperado de: <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/14631/ENERO>.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2010). *Boletín meteorológico mensual de febrero*. Recuperado de: <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/14631/FEBRERO>.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2014). *Boletín meteorológico mensual de enero*. Recuperado de: <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/14639/ENERO>.
- Instituto Meteorológico Nacional (2014). *Boletín meteorológico mensual de febrero*. Recuperado de: <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/14639/FEBRERO>.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2014). *Tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. IMN, MINAE. 112 pp.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2011). *Análisis del riesgo actual del sector hídrico de Costa Rica ante el Cambio Climático, para contribuir a mejorar el desarrollo humano*. IMN, MINAET, PNUD. 98 pp.
- International Panel of Climate Change. (2013). *Annex III: Glossary [Planton, S. (Ed.)]. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA*. Recuperado de: [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5\\_SummaryVolume\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf).
- Kurz, M. (1998). *Synoptic Meteorology*. Offenbach and Main, 200 p.
- METED. (2015). *The COMET Program: Introduction to Tropical Meteorology, second edition. Synoptic Weather Systems, Tropical-Extratropical Interactions, Cyclones, Fronts, and Cold Surges*. Recuperado de: <https://www.meted.ucar.edu/>.
- Organización Meteorológica Mundial (1991). *Compendio de Meteorología para Uso del Personal Meteorológico de las Clases I y II Parte III*. OMM N°364, 295 pp.
- National Center for Environmental Prediction y National Center for Atmospheric Research, Climate Diagnostics Center. (Sf.). *NCEP/NCAR Reanalysis Project*. Recuperado de: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/composites/hour/>.
- Organización Meteorológica Mundial. (2010). *Manual del Sistema Mundial de Proceso de Datos y de Predicción Volumen I – Aspectos mundiales*. Recuperado de: [https://www.wmo.int/pages/prog/www/DPFS/documents/485\\_Vol\\_I\\_es.pdf](https://www.wmo.int/pages/prog/www/DPFS/documents/485_Vol_I_es.pdf).
- Reding, P. J. (1992). *The Central American Cold Surge: An Observational Analysis of the Deep Southward Penetration of North American Cold Fronts*. M.S. thesis, Department of Meteorology, Texas A&M University. 177 p.
- Rauber, R. M.; Walsh, J.E. & Charlevoix, D. J. (2002). *Severe and Hazardous Weather*. Kendall/Hunt Publishing Company. 616 p.
- Soley, F. J. y Alfaro, E. A. (2009). Descripción de dos métodos de rellenado de datos ausentes en series de tiempo meteorológicas. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 16, 60-75.
- Zárate, E. (2013). Climatología de masas invernales de aire frío que alcanzan Centroamérica y el Caribe y su relación con algunos Índices Árticos. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 12, 35-55 p.
- Zárate, E. (2014). Influencia de las masas invernales de aire frío sobre el Chorro de Bajo Nivel del Caribe y sus ramas. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 13, 19-40 p.

# Importancia de la interpretación e implementación de las regulaciones y procedimientos meteorológicos para la aviación internacional

JOSE PABLO VALVERDE MORA<sup>1</sup>

## Resumen

Determinar el valor que tiene prevenir incidentes en aviación antes que ocuparse de las consecuencias de no hacerlo, confirma la importancia que tiene todo lo relacionado con la seguridad aeroportuaria en general. Actualmente existen muchas normativas tanto de la OMM como de la OACI respecto a meteorología aeronáutica, entre estas están los avisos de cizalladura, de ciclones tropicales, de turbulencia y los mapas de tiempo significativo, entre otras. Cada oficina encargada debe estar al corriente de las últimas reglamentaciones y capacitar constantemente al personal a cargo de su implementación, con el propósito de asegurar la calidad de la información meteorológica suministrada para la protección de todos los involucrados en el proceso.

**PALABRAS CLAVE:** FENÓMENOS METEOROLÓGICOS, METAR, METEOROLOGÍA AERONÁUTICA, OMM.

## Abstract

To determine the value of prevent aviation security incidents before the consequences of not doing, confirm the importance of everything related to airport security in general. There is currently both WMO and ICAO regulations for aeronautical meteorology; these include warnings of wind shear, tropical cyclones, turbulence, significant weather maps, etc. Each office in charge must be in the stream of the latest regulations and constantly train personnel of its implementation, with the purpose of ensuring the quality of meteorological information provided for the protection of everyone involved in the process.

**KEY WORDS:** METEOROLOGICAL PHENOMENA, METAR, AERONAUTICAL METEOROLOGY, WMO.

## 1. INTRODUCCIÓN

La creciente evolución de la industria de la aviación y la correspondiente demanda de servicios en las últimas décadas, han incrementado los mecanismos de control y seguridad durante todo el proceso, desde que el pasajero paga su boleto y hace su reservación, hasta que sale de la terminal en su destino final. Como bien se sabe, el principal medio en el cual se desarrollan las operaciones aeronáuticas es la atmósfera, por lo tanto, conocer de forma precisa el comportamiento y la evolución

de la misma juega un papel transcendental en la seguridad de las operaciones, no solo para la tranquilidad y confianza de los clientes, sino también para la rentabilidad y estabilidad económica de las aerolíneas.

Los principales entes encargados de regular y dictaminar las normas de aviación en materia meteorológica son: la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). Algunos aspectos importantes de estas regulaciones y normas son

1 Licdo. en Meteorología. Departamento de Meteorología Sinóptica y Aeronáutica. Instituto Meteorológico Nacional. San José. Costa Rica. Correo electrónico: [jpvalverde@imn.ac.cr](mailto:jpvalverde@imn.ac.cr)



la estandarización de la información en materia aeronáutica, así como la constante vigilancia y transmisión de la información de fenómenos meteorológicos que podrían representar un riesgo a la aviación. Entre estos se pueden citar: la turbulencia, el engelamiento, los ciclones tropicales, las neblinas, la nubosidad y las nubes de ceniza volcánica, entre otros.

## 2. METODOLOGÍA

Se revisaron y recopilaron las principales normativas existentes referentes a meteorología aeronáutica, con el objeto de analizar las regulaciones establecidas como obligatorias para la prestación de los servicios en meteorología y navegación aérea internacional. Se analizaron algunas de ellas y se explicaron con el producto final desarrollado hasta el momento por las oficinas de meteorología aeronáutica (OMA) del país. Finalmente, se determinó la importancia de las mismas.

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE NORMATIVAS

### 3.1. Guía de sistemas meteorológicos de observación y distribución de información para los servicios meteorológicos aeronáuticos

Este documento trata del tipo de variables a observar y medir en un aeródromo, su forma de registro, el archivado y los controles de calidad que deben existir para estos. Además, la difusión y exposición de la información (figura 1) a los interesados y a las dependencias de tránsito aéreo (OMM, 2014-a).

Variables como el viento (dirección e intensidad) son útiles para determinar la pista en uso, ya que al presentarse ráfagas en la intensidad de esta variable se tendrán cuidados especiales en las maniobras de despegue y aterrizaje. En el caso de las temperaturas, estas son indispensables para el peso y balance de la aeronave, además de determinar las horas idóneas para el transporte de carga. Por su parte la presión expresada por QNH



Figura 1. Visualización de una estación meteorológica automática (EMA) y sus respectivas variables meteorológicas desplegadas en los servicios de tránsito aéreo (ATC, siglas en inglés).

(figura 1), es utilizada para referenciar la altitud de la aeronave al nivel del mar, o sea es la presión reducida al nivel de mar. Todas las anteriores variables son de uso cotidiano para los pilotos, el personal de despacho y los controladores aéreos.

### 3.2. Manual de claves

Este manual describe las claves alfanuméricas utilizadas para la transmisión internacional de datos, como es el caso de los reportes sinópticos de superficie realizados en cada estación OMA de Costa Rica. O sea, en nuestro país las estaciones aeronáuticas son a la vez estaciones sinópticas.

Un ejemplo de cómo se codifica el grupo 4 correspondiente a la presión a nivel medio del mar, se presenta en la figura 2, en el subrayado correspondiente a un valor de 1011.6 hPa, y es: “Grupo **4PPPP**: Cuando la presión atmosférica al nivel medio del mar puede calcularse con una precisión suficiente, esa presión se indicará por medio del grupo 4PPPP” (OMM, 2014-b).

En el reporte presentado en la figura 2, se muestran variables sinópticas como tales como: viento actual, temperaturas actuales, presión en la estación y a nivel del mar, tiempo presente, tipo, cantidad y altura de nubosidad, lluvia en 6 y 24 horas, estado del cielo en los trópicos, temperaturas extremas del día, estado del suelo y la dirección de desplazamiento de las nubes, entre otras variables.

### 3.3. Guía del sistema de gestión de la calidad, para el suministro de servicios meteorológicos para la navegación aérea internacional

Este es el documento rector que contiene los lineamientos referentes a las políticas, en materia de gestión de la calidad en el suministro de servicios en meteorología (SGC-MET). Por lo tanto, trata de las normas ISO, definición de calidad y su

AAXX 18004 78762 11360 83104 10209 20205  
39128 40116 50215 60271 75164 84620  
333 0/510 10268 20193 32/// 59001

Figura 2. Reporte sinóptico de las 18UTC para la estación 78762. Alajuela-Aeropuerto Internacional Juan Santamaría (Costa Rica).

aseguramiento, sistemas de gestión, gestión de los recursos, documentación del SGC-MET, procesos de auditoría, informes de no conformidad y acciones correctivas. También presenta las etapas de certificación del servicio (OMM, 2011).

Un ejemplo de este apartado es la actual Política de Calidad del SGC-MET del servicio meteorológico nacional, la cual direcciona el sistema en sí, e indica: “Suministrar productos y servicios meteorológicos para la navegación nacional e internacional con los más altos estándares de calidad, basados en la competencia e integridad de sus colaboradores y su compromiso con la mejora continua de los procesos, con la finalidad de satisfacer los requerimientos de los clientes con la información meteorológica aeronáutica clara precisa y oportuna” (IMN, 2016-b).

### 3.4. Manual de métodos meteorológicos aeronáuticos

La OACI tiene una gran cantidad de documentación en relación a la meteorología y este manual es uno de ellos. El mismo trata de generalidades de las Oficinas Meteorológicas para la Aviación, de los Centros Mundiales de Pronósticos de Área, de los Centros Mundiales de Avisos de Ciclones Tropicales, de los Centros Mundiales de Avisos de Ceniza Volcánica y observatorios de los volcanes en los Estados. Además, contiene los tipos de informes meteorológicos, informes de actividad volcánica, tipos de pronósticos, avisos de tiempo significativo en ruta (SIGMET), avisos de aeronaves o aero-notificaciones (AIRMET), además de las formas de difusión de la información (OACI, 2011).

### 3.5. Anexo 3 al Convenio sobre aviación civil internacional

Describe prácticamente lo mismo que el documento de OACI (2011), solo que lo hace a manera de compendio, es una síntesis de la mayor parte de la normativa en materia de meteorología aeronáutica, lo cual lo hace el documento más usado en la actualidad para regular y normar los servicios meteorológicos para la aviación. A continuación se describe con más detalle, algunos de los puntos importantes que establece esta norma.

#### 3.5.1 Reporte meteorológico de aeródromo

Existen dos clases de este reporte, los locales (MET REPORT y SPECIAL) y los de difusión internacional (METAR y SPECI). Ambos se difunden en formato de clave establecido en OMM (2014-b) y describen las variables meteorológicas de importancia para la aviación, por lo general en el siguiente orden: identificador de estación, día y hora de reporte, viento en superficie, visibilidad predominante y/o posible secundaria, fenómenos de tiempo presente, nubosidad, temperaturas, presión o altímetro, fenómenos recientes, información suplementaria (solo en MET REPORT) y por último pronóstico de tendencia (OACI, 2016). En cuanto a los reportes SPECIAL y SPECI, estos tienen la misma estructura solo que son reportes entre horas, producto del acaecimiento de algún fenómeno meteorológico establecido como criterio para este tipo. En la figura 3 se muestran dos reportes meteorológicos, un METAR y un SPECIAL.

Estos reportes de aeródromo son indispensables para las operaciones, ya que en ellos se incluyen variables como el viento en superficie que es utilizado para maniobras de aterrizaje y despegue, la visibilidad horizontal y el alcance visual en pista presentes en el aeródromo, los cuales varían dependiendo del tiempo presente. Otra variable que se debe reportar es el tiempo presente, que será el que impera en un radio de 8 km, estipulado como dentro del aeródromo y en el que se incluyen: lluvia (RA), niebla (FG), tormenta con lluvia (TSRA) y calima (HZ), entre otras. La nubosidad también es reportada con altura y cantidad, además del tipo de nube como es el caso de los cúmulos potentes (TCU) y nubes de tormenta o cumulonimbos (CB). Por último, dicho reporte incluye temperatura ambiente y de rocío, presión atmosférica y un pronóstico de tendencia para la próxima hora. Un ejemplo de esto se presenta en la figura 3 (TEMPO 0800 FG).

#### 3.5.2 Pronósticos

El pronóstico para el tipo despegue deberá contener: dirección y velocidad del viento, temperatura, presión (QNH) y cualquier otra variable conveniente local. Estos pronósticos se tienen a disposición, para consulta y se incluyen en la documentación de vuelo. Respecto a los pronósticos de aeródromo (TAF, siglas en inglés), estos se expiden una hora antes del inicio de su validez y consisten en la declaración concisa de las condiciones meteorológicas previstas más probables en el aeródromo, para un periodo determinado (OACI, 2016). En la figura 4 se presenta un ejemplo elaborado en la OMA-MROC

METAR MROC 172300Z 34007KT 3000 1200W +RA BR VCTS SCT005 BKN015 20/20 A3002 RETS  
TEMPO 0800 FG=

SPECIAL MROC 172035Z RWY 07 TDZ WIND 260/05KT VIS 8KM MOD TSRA CLD FEW 1000FT CB BKN  
2000FT T25 DP17 QNH 1014HPA TREND NOSIG=

Figura 3. Reportes meteorológicos de aeródromo para la estación MROC: Alajuela-Aeropuerto Internacional Juan Santamaría (Costa Rica).

```
MRLB 182300Z 1900/1924 28006KT 9999 SCT035 TX30/1918Z TN23/1911Z
FM190030 27005KT 9999 RA BKN020
TEMPO 1901/1904 5000
BECMG 1905/1907 13005KT BCFG
BECMG 1918/1920 26007KT
TEMPO 1919/1922 5000 SHRA SCT020TCU=
```

Figura 4. Pronóstico de Aeródromo del Aeropuerto Internacional Daniel Oduber de Liberia.

para el Aeropuerto Internacional Daniel Oduber de Liberia (MRLB).

En los grupos de cambio del pronóstico TAF, presentados con las siglas FM, TEMPO y BECMG en la figura 4, se describen los cambios más significativos en las condiciones meteorológicas por las cuales se podrían ver afectadas las operaciones, ya sea por viento, visibilidad, tiempo presente y/o nubosidad. Estas variables y parámetros son indispensables para la planificación de las operaciones en un periodo de 24 horas, pues determinan la pista en uso, visibilidades reducidas involucrando más consumo de combustible al estar en estados de espera, presencia de precipitación que determina el uso de cobertores en equipaje y/o posibilidad de que el aeropuerto se encuentre bajo mínimos operacionales (demoras), vientos fuertes que perjudican el desempeño de determinados tipos de aeronave y nubes de tipo convectivas asociadas a corrientes ascendentes/descendentes que involucran turbulencia, entre otras.

También se elaboran pronósticos de aterrizaje en el formato de tendencia, al final de los reportes meteorológicos locales e internacionales.

### 3.5.3 Información SIGMET

Esta información describe de forma concisa y clara la existencia real o prevista de fenómenos meteorológicos en ruta. Es proporcionada por la oficina de vigilancia meteorológica (WAO, siglas en inglés) que tiene a su cargo un área de

información en ruta (FIR, siglas en inglés). La FIR de Centroamérica está bajo la vigilancia de la WMO de Tegucigalpa (MHTG), Honduras. El tipo de información que contiene es: turbulencia, engelamiento, líneas de turbonada o áreas de convección profunda (figura 5), ciclón tropical y nube de ceniza volcánica.

```
MHTG SIGMET D1 VALID 190344/190744 MHTG-
MHTG CENTRAL AMERICAN FIR EMBD TS OBS AT
0215Z WI N1908 W08927 - N1725 W09000 - N1539
W09006 -
N1547 W08834 - N1730 W08816 -N1848 W08803
TOP FL500 MOV NE 05KT WKN=
```

Figura 5. Informe SIGMET de área de convección y tormentas. FIR de Centro América Tegucigalpa (MHTG).

Es importante conocer las áreas de turbulencia pues estas interfieren con la normalidad de un vuelo en los niveles que se presentan, además si son muy severas pueden ocasionar daños a la infraestructura de la aeronave, mientras que el engelamiento interfiere en la operatividad y la sustentación de la aeronave. Las líneas de turbonada o de convección profunda, así como las regiones donde existe un ciclón tropical representan una potencial amenaza para las aeronaves en vuelo, en lo que se refiere a turbulencia, cizalladura y fuertes corrientes de vientos, razón por la cual estas zonas son evitadas por la navegación, mediante la información del área delimitada en los informes SIGMET.

Otro aspecto importante, son las cenizas volcánicas que se dispersan en los diversos niveles



troposféricos e inclusive estratosféricos. Algunos daños en las aeronaves dependen de factores como el tiempo de exposición, las concentraciones de la nube de ceniza, la composición de la nube y el tipo de motor, entre otros. No obstante lo anterior, estudios realizados por Rolls-Royce en sus gráficos DEvAC (“Duration of Exposure versus Ash Concentration”), indican que la dosis máxima segura de ceniza se encuentra entre 0.4 mg/m<sup>3</sup> durante 10 horas, o lo que es lo mismo 4 mg/m<sup>3</sup> durante 1 hora. Aunque según Clarkson (2017), raramente las concentraciones en una nube de ceniza volcánica son constantes.

### 3.5.4 Avisos de Aeródromo

Estos avisos contienen información de determinados fenómenos que están y podrían afectar las aeronaves en tierra, las próximas en llegar y las instalaciones aeroportuarias. Por acuerdos nacionales, se tiene establecido la emisión de aviso de aeródromo en los siguientes casos: tormenta moderada y fuerte (MOD TS, HVY TS), vientos en superficie iguales o superiores a los 60 km/h (AD WRNG WS SPDS 30KT MAX 40KT), así como por ceniza volcánica dentro del perímetro de 8 km del aeródromo (VA). En la figura 6 se muestra un ejemplo emitido para una tormenta fuerte.

MROC AD WRNG 1 VALID 162000/162200 HVY TS  
OBS AT 2015Z INTSF=

Figura 6. Aviso de Aeródromo por tormenta eléctrica fuerte, OMA-MROC.

Este tipo de aviso se da con una validez de día y hora, el fenómeno por el cual se emite el aviso, la indicación de si es observado (OBS) o pronosticado (FCST) y la intensidad del mismo, ya sea debilitándose, sin cambios o intensificándose (WKN, NC, INTSF, respectivamente).

### 3.5.5 Avisos y alertas por cizalladura del viento

Por acuerdos nacionales se deben expedir avisos de cizalladura del viento para los aeródromos, que se consideren como un factor relevante y que pueden afectar adversamente las maniobras de despegue y aterrizaje, desde el nivel de pista hasta los 500 m (1500 ft) sobre esta. En la figura 7 se presenta un ejemplo reportado a la torre de control por un BOEING-737 de la aerolínea Aeroméxico.

MROC WS WRNG 4 111720Z VALID 120000Z HVY  
WS RWY 07 REP AT 111720 CONTROL TOWER BY 737  
AEROMEXICO 690 EIDRA SFC WIND 100/21G31KT  
+-20KT=

Figura 7. Aviso de cizalladura por viento fuerte sostenido de 21 nudos y ráfagas de 31, OMA-MROC.

Además, se tiene establecido por acuerdo nacional que las aeronaves deben reportar a ATC la presencia de cizalladura del viento, con el objetivo de que la oficina meteorológica emita el correspondiente aviso de la misma. También es posible la emisión de avisos pronosticados.

### 3.5.6 Pronósticos de área para vuelos de poca altura

Se expiden (si se decide en formato cartográfico) en la modalidad de fenómenos de tiempo significativo (SIG-WX), los sistemas y fenómenos meteorológicos significativos en la región cuando la demanda de vuelos por debajo los 10.000 pies (y hasta los 15.000 pies sobre las montañas) lo requieren. En la figura 8 se presenta un ejemplo elaborado en la OMA-MRPV: Aeropuerto Internacional Tobías Bolaños Palma de San José.

La principal información que lleva este tipo de pronóstico gráfico es: nubes cumuliformes del tipo

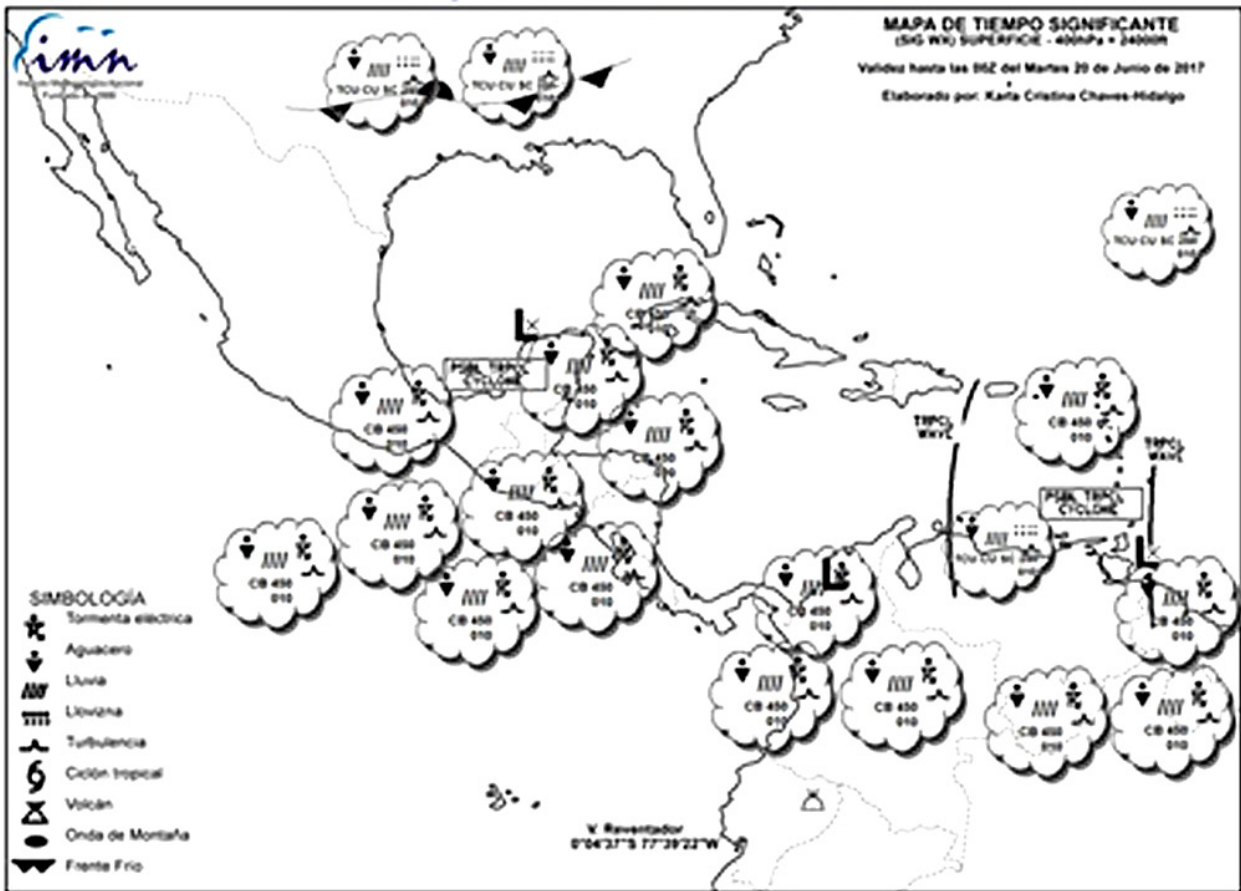


Figura 8. Tiempo Significante SIG-WX de superficie hasta los 24000 pies (IMN, 2017).

cúmulos potentes (TCU) y los cumulonimbos (CB) con sus respectivas alturas de base y topes, tipo de precipitación que generan, presencia de tormenta eléctrica y turbulencia asociada. También se establece espacialmente la posición más exacta de ciclones tropicales, ondas tropicales, frentes fríos, bajas presiones y además los volcanes activos en la región.

### 3.5.7 Información climatológica aeronáutica

Esta información es indispensable para la planificación de las operaciones de vuelo, y deberá basarse en observaciones realizadas en un periodo de cinco años como mínimo. En la figura 9

se presenta la distribución horaria-mensual de la lluvia en la OMA-MROC (IMN, 2016-a).

Las climatologías aeronáuticas también se describen horariamente, indicando cuáles son las horas de más alta probabilidad de ocurrencia de factores y las variables meteorológicas como: tormenta eléctrica, niebla, neblina, ráfagas de viento, temperaturas máximas y mínimas, horas de visibilidad reducida y techos nubosos bajos.

### 3.5.8 Información de actividad volcánica

Se debe comunicar a las dependencias de tránsito aéreo y a la oficina de vigilancia meteorológica a la mayor brevedad, la actividad previa a una erupción volcánica, actividad volcánica presente

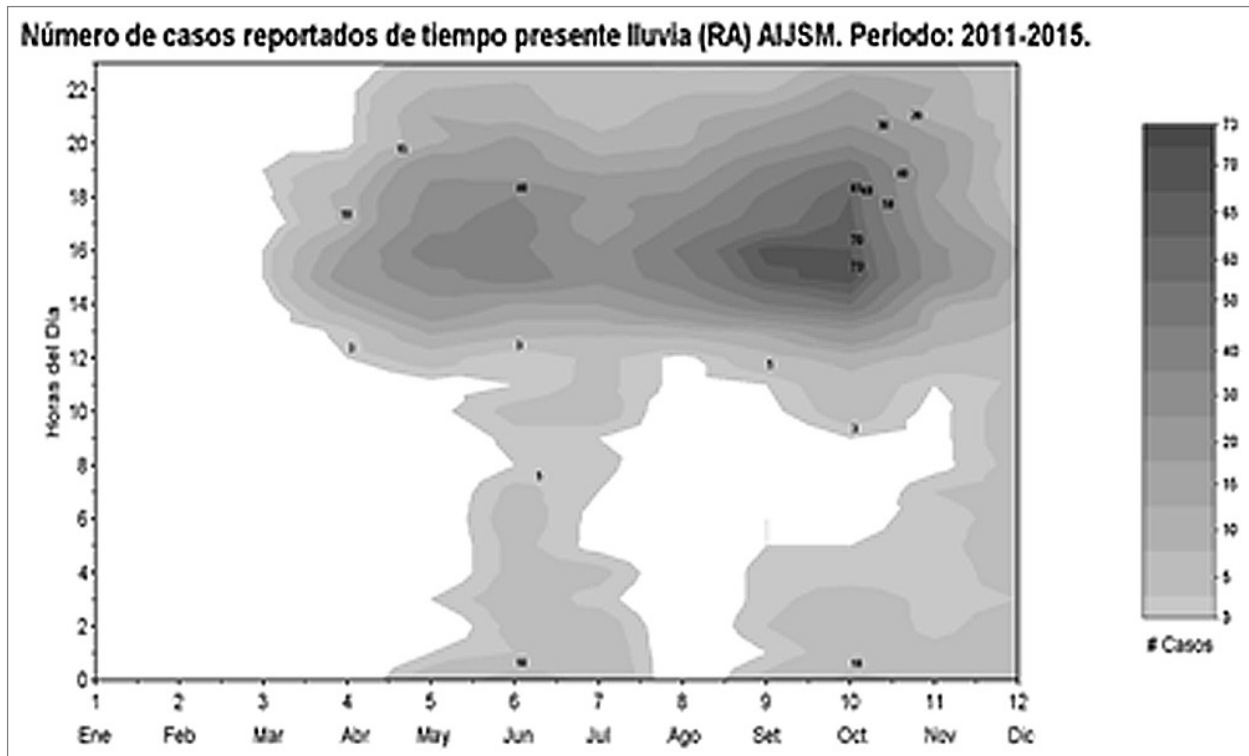


Figura 9. Climatología horaria para el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría.

y/o nubes de ceniza volcánica existentes en la atmósfera. Lo anterior mediante un informe, tal y como se presenta en la figura 10.

Dicho informe describe brevemente: la fecha y hora de emisión, el nombre del volcán activo, la descripción de la actividad, la dirección del viento sobre el volcán, la altura de la columna si se conoce y el estado de la actividad.

**INFORME DE ACTIVIDAD VOLCÁNICA MROC**  
29.03.2017 08:40 AM, VOLCAN TURRIALBA  
CONTINÚA EN ERUPCIÓN DE CENIZA. DIRECCIÓN  
DEL VIENTO PREDOMINANTEMENTE HACIA EL  
SUR/SURESTE, ALTURA DE LA COLUMNA 1000  
METROS Ó 4340 m.s.n.m. (14235.2 ft). ACTIVIDAD  
DÉBIL EN PROCESO.

Figura 10. Informe de actividad volcánica.

## 4. CONCLUSIONES

Es indispensable conocer las principales variables meteorológicas que se deben medir y que son necesarias para la operación aeronáutica, para así poder emitir la alerta sobre posibles variaciones que se produzcan en estas y que puedan afectar el seguro desempeño de las actividades aeronáuticas.

El personal a cargo de las labores en las oficinas de meteorología aeronáutica, debe conocer y tener experiencia en el manejo de las codificaciones existentes en materia aeronáutica, con el fin de homogenizar la transmisión de información y que esta sea pronta, precisa y veraz.

La planificación de las operaciones con antelación es prioritaria, si se desea maximizar la fluidez del tránsito aéreo y minimizar los tiempos de estancia del pasajero en las terminales aéreas. Además, el

impacto económico que conllevan las demoras por mal tiempo, hace necesario conocer a priori las condiciones climáticas sobre las cuales se operará en determinadas regiones y épocas del año.

La comunicación precisa y oportuna de fenómenos meteorológicos de importancia para las operaciones, ya sea en tierra o en ruta, repercute positivamente en la seguridad y satisfacción del cliente.

La calidad de la información generada es un aspecto que debe estar en mejora continua, esto por medio del establecimiento de controles y la concientización del personal involucrado en el proceso. Este personal debe comprender que esta información es de vital importancia, ya que permite el salvaguardar la ejecución de las operaciones, al menos bajo un riesgo mínimo aceptable.

## 5. REFERENCIAS

- Clarkson, R. (2017). *Volcanic Ash and Aviation – Rolls-Royce Position*. Rolls Royce. Recuperado de: [https://www.wmo.int/aemp/sites/default/files/VA\\_Brief\\_Summary\\_Rolls\\_Royce.pdf](https://www.wmo.int/aemp/sites/default/files/VA_Brief_Summary_Rolls_Royce.pdf)
- Instituto Meteorológico Nacional. (2016-a). *Climatología Aeronáutica*. Aeropuerto Internacional Juan Santamaría. IMN-MINAE. Recuperado de <https://goo.gl/dk59RX>.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2017). *Informe de Meteorología Aeronáutica*. Recuperado de <https://www.imn.ac.cr/informe-de-meteorologia-aeronautica>.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2016-b). *Sistema de Gestión de la Calidad para el Suministro de Servicios Meteorológicos para la Navegación Aérea Internacional (SGC-MET)*. San José, Costa Rica.
- Organización de Aviación Civil Internacional. (2016). *Anexo 3 Convenio sobre Aviación Civil Internacional. Servicio meteorológico para la navegación aérea internacional*. 19 ed. Montreal, Canadá. OACI.
- Organización de Aviación Civil Internacional. (2011). *Manual de Métodos Meteorológicos Aeronáuticos*. Doc-8896, 9 ed. Montreal, Canadá. OACI.
- Organización Meteorológica Mundial. (2014-a). *Guía de Sistemas Meteorológicos de Observación y Distribución de Información para los Servicios Meteorológicos Aeronáuticos*. OMM-Nº731. Ginebra, Suiza: OMM.
- Organización Meteorológica Mundial. (2011). *Guía del Sistema de gestión de la calidad para el suministro de servicios meteorológicos para la navegación aérea internacional*. OMM-Nº1001. Ginebra, Suiza: OMM.
- Organización Meteorológica Mundial. (2014-b). *Manual de Claves, Claves Internacionales*. OMM-Nº306. Ginebra, Suiza: OMM.



# Comparación y evaluación de diferentes esquemas de parametrización de cúmulos con el WRF EMS aplicadas al caso del huracán Otto

DANIEL POLEO<sup>1</sup>, CAMILO VINDAS<sup>2</sup>, WERNER STOLTZ<sup>3</sup>

## Resumen

Se evaluó el comportamiento de la lluvia, el viento y la trayectoria pronosticada, usando el modelo numérico del tiempo WRF EMS (Weather Research and Forecasting Environmental Model) de 2.64 km de resolución espacial, con 13 simulaciones del huracán Otto en el norte de Costa Rica. Para cada simulación se utilizaron diferentes esquemas de parametrizaciones de cúmulos (PC). Las 4 PC que generaron un mejor pronóstico de la trayectoria de Otto, fueron usadas para compararlas cualitativamente con la lluvia observada y el viento estimado de manera satelital. Se observó que la parametrización de cúmulos Grell-Freitas fue la que mejor estimó la precipitación, tanto las distribuciones espaciales como temporales. La PC desarrollada para pronóstico de huracanes (Arakawa-Schubert simplificado) presentó problemas sobrestimando las precipitaciones, aunque fue una de las que mejor simuló la trayectoria y la lluvia generada por el ciclón.

**PALABRAS CLAVES:** HURACÁN OTTO, WRF, EVALUACIÓN WRF, ESQUEMAS DE PARAMETRIZACIONES DE CÚMULOS, MODELOS NUMÉRICOS Y OTTO, MODELOS NUMÉRICOS CENTROAMÉRICA.

## Abstract

The behavior of the rain, the wind and the predicted trajectory was evaluated using the weather model WRF EMS (Weather Research and Forecasting Environmental Model) of 2.64 km of spatial resolution with 13 simulations of Hurricane Otto in the north of Costa Rica. For each simulation, different cumulus parameterization (PC) schemes were used. The 4 PCs that generated a better forecast of Otto's trajectory were used to compare them qualitatively with the observed rain and the estimated wind in a satellite way. It was observed that the parametrization of Grell-Freitas clusters was the one that best estimated the precipitation, both spatial and temporal distributions. The PC developed for hurricane forecasting (Arakawa-Schubert simplified) presented problems overestimating rainfall, although it was one that best simulated the trajectory and rain generated by the cyclone

**KEYWORDS:** WRF, WRF EVALUATION, CUMULUS PARAMETERIZATION SCHEMES, HURRICANE OTTO, NUMERICAL MODELS AND OTTO, NUMERICAL MODELS CENTRAL AMERICA.

## 1. INTRODUCCIÓN

El huracán Otto es el primero en su tipo que impacta directamente Costa Rica desde 1886, año en que se iniciaron los registros históricos

(Lizano y Fernández, 1996). De ahí la importancia de reanalizar la previsión del comportamiento de algunas variables meteorológicas, particularmente el viento y la lluvia, así como la trayectoria del ciclón tropical con el modelo numérico del tiempo

- 1 M.Sc. en Meteorología. Departamento de Meteorología Sinóptica y Aeronáutica. Instituto Meteorológico Nacional. Email: [dpoleo@imn.ac.cr](mailto:dpoleo@imn.ac.cr) o [dpoleob@gmail.com](mailto:dpoleob@gmail.com).
- 2 Bach. en Meteorología. Departamento de Meteorología Sinóptica y Aeronáutica. Instituto Meteorológico Nacional. Email: [rvindas@imn.ac.cr](mailto:rvindas@imn.ac.cr).
- 3 Especialista en Meteorología Aplicada. Departamento de Meteorología Sinóptica y Aeronáutica. Instituto Meteorológico Nacional. Email: [wstolz@imn.ac.cr](mailto:wstolz@imn.ac.cr).

utilizado por el Instituto Meteorológico Nacional en sus pronósticos meteorológicos.

Este huracán afectó a 10.831 personas, de las cuales 10 perdieron la vida, generando además pérdidas en diferentes sectores del país por una suma de 106.000 millones de colones (197 millones de dólares al tipo de cambio del 1 diciembre del 2016). Al mismo tiempo, se estima que se deberá realizar una inversión de 130.000 millones de colones para financiar la recuperación de las zonas afectadas (CNE, 2017).

El 15 de noviembre del 2016 se formó un sistema de baja presión en la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la cual estaba ubicada en el sur del mar Caribe. La intensificación de este sistema

se vio favorecida por las condiciones atmosféricas y oceánicas imperantes, tales como: valores altos de la temperatura superficial del mar Caribe (29°C), cortante vertical débil del viento y la difluencia del viento en las partes más altas de la atmósfera; al mismo tiempo, la presencia de un empuje frío en el sector noroccidental del mar Caribe determinó la particularidad en su trayectoria. El ciclón tropical se intensificó gradualmente hasta alcanzar la categoría de huracán el día 22 de noviembre, localizándose a 375 km al este de la ciudad de Limón y desplazándose hacia el oeste con una rapidez de 4 km/h (IMN, 2017).

El ojo del huracán (categoría 3) tocó tierra a las 1730 UTC (11:30 a.m. hora local) del día jueves 24, a 7 km al noroeste de San Juan del Norte



Figura 1. Trayectoria del huracán Otto desde sus inicios como baja presión (del 15 al 25 de noviembre). Fuente: Instituto Meteorológico Nacional, 2017.

en Nicaragua, con vientos sostenidos de 100 kt (185 km/h). Continuó su avance sobre territorio continental y se fue debilitando de manera paulatina, ingresando a territorio costarricense a las 2000 UTC (2:00 p.m.) por el cantón de Los Chiles (Alajuela), 4 km al este del poblado Las Delicias. Posteriormente, como tormenta tropical abandonó el país por playa Naranjo en el Golfo de Papagayo (ver figura 1), alrededor de las 2200 UTC (10:30 pm hora local), con vientos sostenidos de hasta 60 kt (111 km/h) (IMN, 2017). Tardó aproximadamente 12 horas trasladándose sobre el territorio nacional.

El desarrollo de nuevos esquemas de parametrización de cúmulos y la posibilidad de aumentar tanto la resolución espacial como la temporal de los modelos numéricos del tiempo, ha permitido una representación explícita de la convección, particularmente en simulaciones no hidrostáticas a escala convectiva, esto debido a que a mayor resolución espacial no se necesitan parametrizaciones de cúmulos, es decir, dado que la escala espacial de las nubes de tormentas más frecuentes es de alrededor de 5 a 10 km de diámetro promedio, entonces las simulaciones de 1 a 2 km de resolución no deberían necesitar esquemas de PC.

Existen varias investigaciones que se han realizado en este tema de estudio, por ejemplo Hu, Nielsen-Gammon & Zhang (2010), utilizaron varias parametrizaciones de la capa límite planetaria (PBL, por sus siglas en inglés) encontrando que existen variaciones importantes en las cantidades de lluvia debido a dichos cambios, siendo los mejores resultados los mostrados por la PBL de la Universidad de Yonsei, ya que fue la más estable y tuvo menos sesgo entre los montos de precipitaciones pronosticados y observados, razón por la cual fue la utilizada en la presente investigación.

Por otra parte, Mercader, Codina, Sairouni, & Cunillera (2010) estudiaron diferentes esquemas de parametrización de cúmulos (PC) y evaluaron

varios campos meteorológicos, determinando que la PC de Kain-Fritsch (KF) y el esquema de microfísica WSM5 fueron los que generaron los mejores resultados. Este esquema se utilizó en la presente investigación con el fin de evaluar su comportamiento en un evento extremo.

Poleo y Stolz (2013) realizaron un estudio sobre la respuesta de diferentes parametrizaciones de cúmulos a la precipitación, en un evento extremo en Costa Rica, sin embargo, en dicho estudio no se realizó una simulación de alta resolución para todo el país. Este estudio mostró, que para el evento extremo analizado habían parametrizaciones como KF que sobreestimaban la lluvia. Además, se determinó que para poder eliminar el ruido que podría haberse inducido por las montañas en el Valle Central, se tendría que simular todo el territorio nacional en el dominio de mayor escala.

De la misma forma, Dillon, García Skabar y Nicolini, (2015) trabajaron las diferencias entre tres tipos de PC, para un evento extremo en Argentina, evidenciando la necesidad de observaciones de radar, el uso de ensambles en los modelos numéricos y el aumento de la resolución espacial, para la mejora de los modelos numéricos de pronóstico.

También, Shepherd y Walsh (2016), estudiaron la sensibilidad de la trayectoria de huracanes a diferentes esquemas de parametrización de cúmulos, según el modelo WRF para tres ciclones tropicales intensos. Concluyeron que de cuatro esquemas de PC diferentes, Kain-Fritsch (KF), Betts-Miller-Janjić (BMJ), Grell-3D (G-3) y Tiedtke (TD), el esquema G-3 fue el más sensible en la convección superficial. Por otro lado, aunque el diagnóstico del número de onda suele ser bueno hay diferencias significativas entre cada una de las PC.

Finalmente, Mohan y Bhati (2011), realizaron un estudio con diferentes parametrizaciones de cúmulos utilizando el WRF en la región subtropical de la India, determinando que este modelo

es muy estable ante el esquema G-3. Dichos autores, no solo variaron las parametrizaciones de cúmulos, sino que también generaron cambios en la microfísica, PBL, coordenadas verticales y las capas de superficie.

## 2. METODOLOGÍA Y DATOS

El modelo numérico del tiempo Weather Research and Forecasting (WRF, por sus siglas en inglés) se utilizó para reanalizar la modelación de la trayectoria, el viento y la cantidad de lluvia generada por el ciclón. Se aplicaron diferentes parametrizaciones de cúmulos (PC), con el objetivo de dilucidar las de mejor resultado en comparación con los datos reales. Para realizar esta investigación se utilizó una Workstation Dell

con 64 Gb en RAM y 48 procesadores Intel Xeon(R) y CPU ES-2650 v4 a 2.20 GHz.

Se utilizaron los datos horarios de 131 estaciones meteorológicas del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), del 24 al 25 de noviembre de 2016. Del total de estaciones utilizadas cuatro son de tipo mecánicas (cuadro 1) y 127 automáticas, distribuidas a lo largo de todo el territorio costarricense (figura 2).

Cuadro. 1. Estaciones mecánicas utilizadas

| Número de estación | Nombre                |
|--------------------|-----------------------|
| 69579              | Santa Clara, ITCR     |
| 73048              | Dulce Nombre          |
| 74020              | Llano Grande, Liberia |
| 84111              | Santa Lucía, Heredia  |

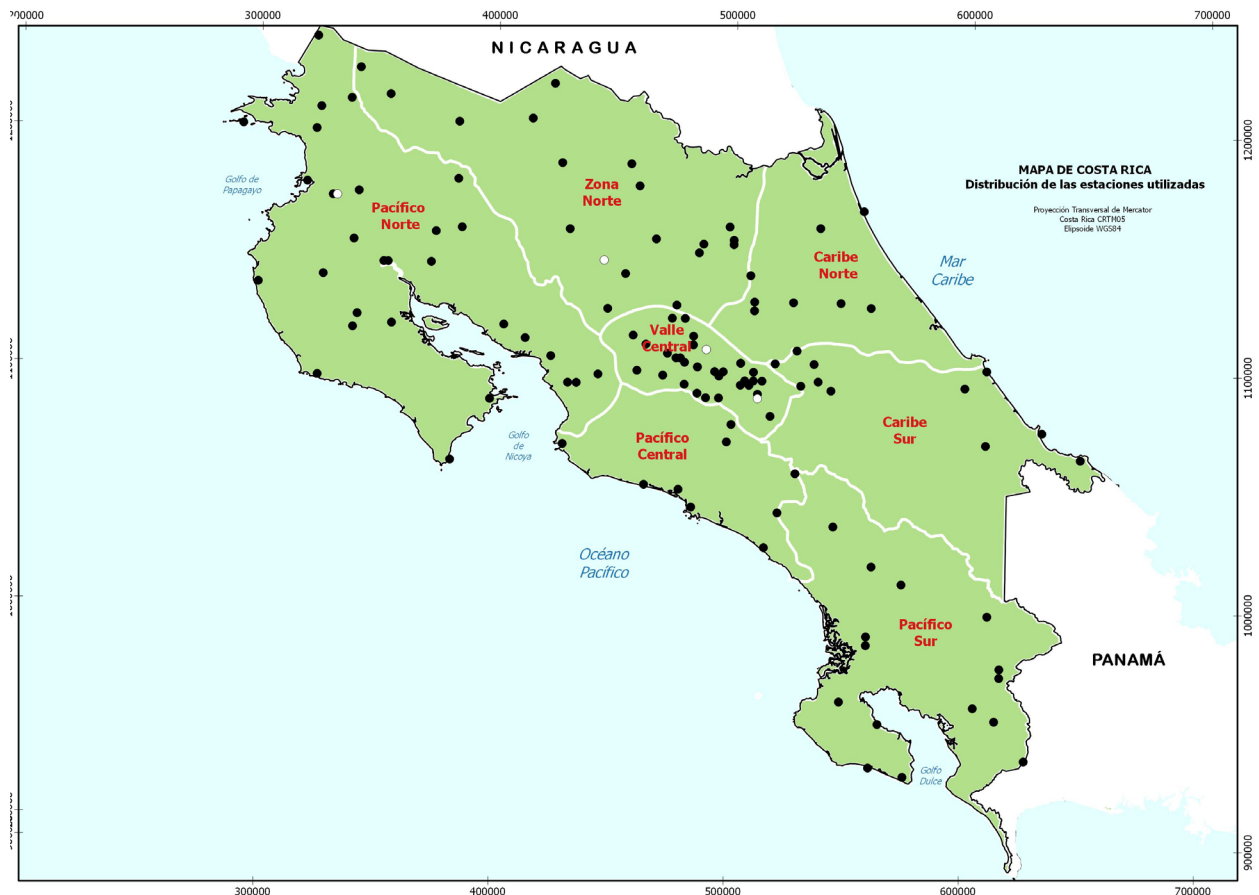


Figura 2. Distribución de las estaciones meteorológicas utilizadas para la elaboración de los mapas de lluvia acumulada. Los puntos indican la ubicación de las estaciones, negros automáticas y blancos mecánicas.



Las series de tiempo generadas por dichas estaciones meteorológicas, cuentan con un control de calidad realizado por el IMN (Araya y Soto, 2014). No se utilizaron series de tiempo con datos faltantes, ni se aplicaron métodos de relleno.

En relación a los datos de las estaciones mecánicas (cuadro 1), el IMN procesa los datos de estas estaciones utilizando criterios empíricos para la revisión. Para las estaciones automáticas, el control de calidad consta de: algoritmos de rangos, consistencia interna, pruebas de saltos, pruebas de anomalías, pruebas de persistencia y espaciales, utilizando programas estadísticos elaborados con el software de programación R y Python (Araya y Soto, 2014).

Para evaluar la previsión tanto de la trayectoria como de la cantidad de lluvia del huracán Otto, se utilizó el modelo de alta resolución WRF-EMS en periodos de 6 horas.

También, se utilizó el núcleo dinámico ARW del WRF-EMS y la opción no-hidroestática alimentado por el modelo Global Forecast System (GFS), de 25 km de resolución espacial GFS de la NOAA. Se implementaron tres dominios espaciales para realizar reducción de escala: a) 23.4 km, b) 7.8 km y, el de mayor resolución, c) 2.6 km (figura

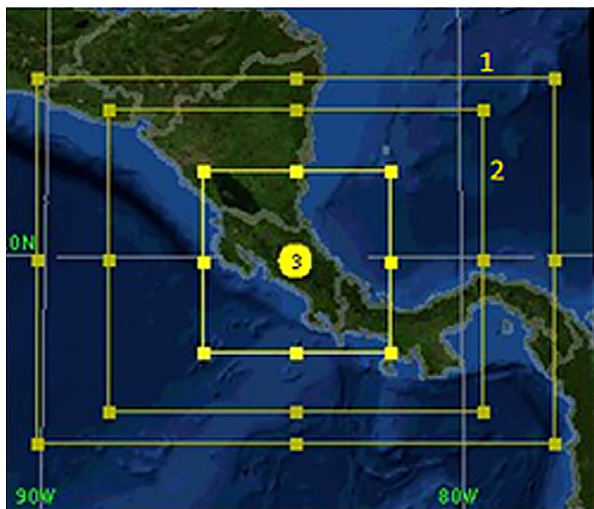


Figura 3. Dominios del WRF-EMS utilizados para correr el modelo. Los dominios están centrados en el dominio 3, el de mayor resolución.

3). Además se utilizaron los datos del GFS de las 06UTC del 22 de noviembre (00:00 hora local del mismo día), correspondientes a dos días antes de que el ciclón tropical llegara a tierra para hacer la previsión del mismo.

Se usó una resolución vertical de 45 capas entre la superficie del mar y 50 hPa, además de la coordenada sigma ( $\sigma$ ), la cual presenta un suavizado en relación con la orografía en las capas verticales. Se utilizó la parametrización de capa límite planetaria (PBL) de Yonsei University en los tres dominios, el esquema de superficie Noah 4-Layer LSM (land Surface model) (Mitchell, 2005) y la microfísica de Lin 5-class SM. Los esquemas de radiación de onda corta y larga son Goddard Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) y NOAA. La orografía utilizada en el dominio de mayor resolución (2.6 km) se presenta en la figura 4.

Se analizaron 13 esquemas diferentes de PC (cuadro 2), de los cuales se seleccionaron los mejores cuatro, elegidos debido a que mostraron mayor similitud entre las trayectorias simuladas y las observadas.

Las cuatro parametrizaciones utilizadas fueron: Betts-Miller-Janjić (BMJ), Grell-Freitas (GF), Arakawa-Shubert simplificada (AS-H) y Arakawa-Shubert (AS). BMJ ha mostrado buena habilidad para pronosticar el desarrollo y translación de tormentas severas, pero tiende a generar montos espurios de lluvia sobre aguas cálidas (Grell, G. A. and Freitas, S. R., 2014); (Han, Jongil and Hua-Lu Pan, 2011) y (Janjić, Z.I 1994).

La parametrización GF se usa principalmente para modelos de mesoescala no hidrostáticos, la parametrización de cúmulos AS-H versión simplificada de simulación de huracanes (HWRF), fue revisada para mejorar la difusión de la turbulencia en regiones con estratocúmulos, y la parametrización AS utiliza el concepto de flujo de masa para ajustar la temperatura atmosférica y el campo de humedad (Grell, y Freitas, 2014); (Han, Jongil y Hua-Lu Pan, 2011) y (Janjić, 1994).



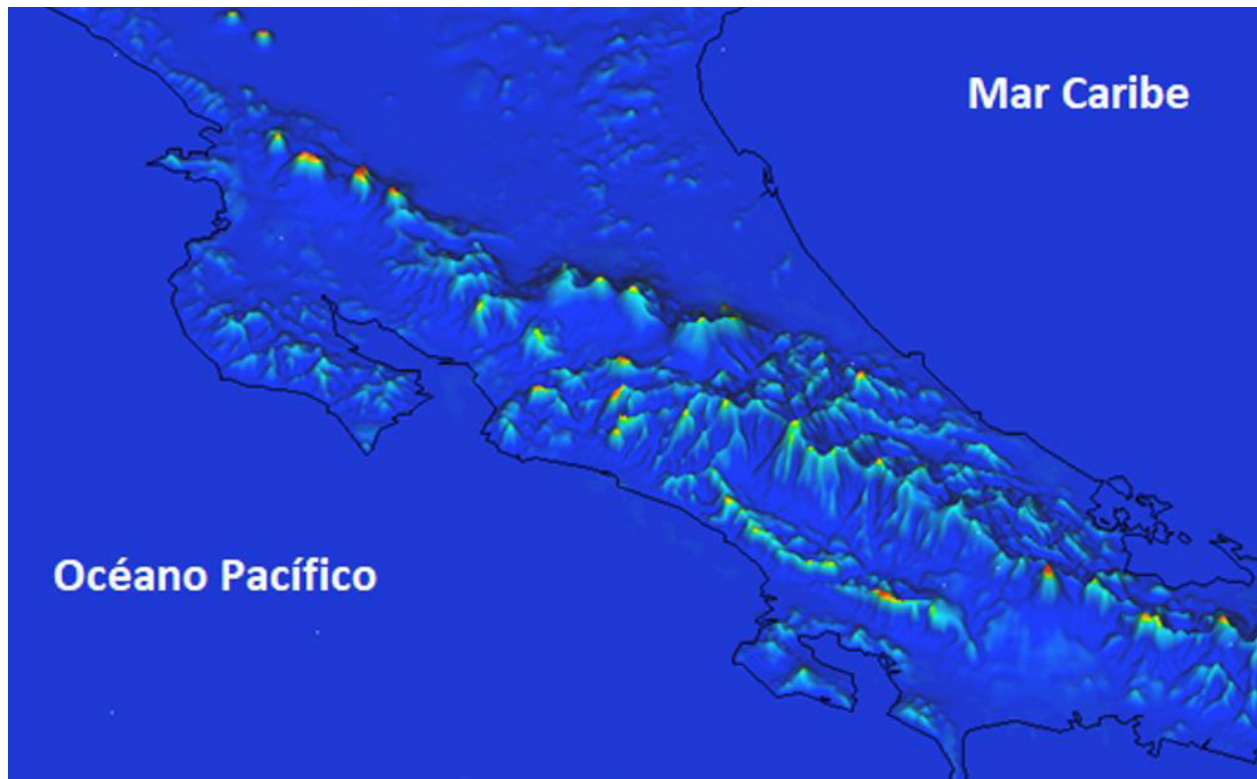


Figura 4. Orografía utilizada por el modelo WRF en el dominio de mayor resolución (2.64 km) en msnm.

Cuadro. 2. Esquema de parametrizaciones de cúmulos

| Número | Nombre                                         | Código |
|--------|------------------------------------------------|--------|
| 1      | Kain-Fritsch scheme                            | 1      |
| 2      | Betts-Miller-Janjic scheme                     | 2      |
| 3      | Grell-Freitas (GF) scheme (3)                  | 3      |
| 4      | Simplified Arakawa-Schubert scheme             | 4      |
| 5      | Grell 3D ensemble scheme                       | 5      |
| 6      | Modified Tiedtke scheme (U. of Hawaii version) | 6      |
| 7      | Zhang-McFarlane scheme                         | 7      |
| 8      | Multi-scale kain-Fritsch scheme                | 11     |
| 9      | New Simplified Arakawa-Schubert from YSU       | 14     |
| 10     | A never Tiedtke scheme (U. of Hawaii version)  | 16     |
| 11     | New Simplified Arakawa-Schubert HWRF version   | 84     |
| 12     | Grell-Devenyi ensamble scheme                  | 93     |
| 13     | Sin parametrización                            | -      |

El esquema utilizado operativamente por el IMN es el Betts-Miller-Janjić (BMJ), que ajusta el sondeo atmosférico a un perfil de energía potencial convectiva disponible de referencia (CAPE, por sus siglas en inglés), el cual está predeterminado y

es post-convectivo. BMJ genera convección si hay CAPE, si el espesor de la nube convectiva supera un determinado umbral climatológico de referencia y si los sondeos modelados muestran humedad relativa hasta al menos 700 hPa (Janjić, 1994).

Las simulaciones compararon los datos de estaciones meteorológicas observados, mediante la elaboración de mapas de lluvia acumulada cada tres horas. Sin embargo, para llevar a cabo un mejor análisis se presentan paneles promedios de lluvia y viento durante períodos de seis horas y acumulados de lluvia de 30 horas. Los mismos se generaron con Surfer10 y se realizaron interpolaciones de Kriging con barreras usando malla de 300x300 puntos (1km x 1km) y el programa QGIS 2.14.0 para la edición.

De las 131 estaciones meteorológicas utilizadas para elaborar estos mapas se escogieron 11 estaciones representativas del país y se realizó una comparación cuantitativa de la precipitación (cuadro 3). Se utilizaron acumulados de lluvia cada seis horas, para el análisis comparativo presentado en la investigación y aunque se calcularon 117 variables, en este estudio se presentan únicamente el viento y la lluvia. Además, se calculó el sesgo (BIAS) para determinar las diferencias en milímetros (mm), entre el pronóstico y la lluvia observada.

Se analizaron los eventos más lluviosos de las estaciones pluviométricas y se hizo la comparación estadística con los eventos extremos de ocurrencia diaria para el percentil 90, en cada

una de las 11 de las estaciones (cuadro 3), con el fin de determinar cuál era la habilidad del WRF para hacer pronósticos de eventos extremos.

Se calculó el sesgo de los modelos, definido como la diferencia entre el monto pronosticado y el observado, con el fin de comparar los montos de lluvia de las estaciones con el mayor registro durante el evento.

Se calculó el índice de falsas alarmas (FAR) y el índice de probabilidad de detección (POD), para los casos arriba de lo normal (AN) (Alfaro, E., Soley, J., & Enfield, D., 2003). Para ello se realizó la suma de la lluvia total registrada de las 06UTC del día 24 hasta las 12UTC del 25 de noviembre de 2016 (30 horas), así como los montos pronosticados por las simulaciones para cada esquema de cúmulos en el mismo rango horario.

Finalmente se calculó el índice de éxito crítico (CSI, por sus siglas en inglés) (Schaefer, 1990), para determinar cuál era la relación entre las falsas alarmas y los eventos extremos detectados en cada esquema de parametrización de cúmulos (ver ecuaciones 1, 2 y 3). Los estadísticos se calcularon a partir de una tabla de contingencia 3x3, tomando únicamente el evento arriba de lo normal (ver cuadro 4).

Cuadro 3. Estaciones pluviométricas utilizadas para el análisis cuantitativo

| Número de estación | Nombre de la estación                  | Región climática |
|--------------------|----------------------------------------|------------------|
| 200007             | Isla San José                          | Pacífico Norte   |
| 69677              | Laguna Caño Negro                      | Zona Norte       |
| 69679              | Upala                                  | Zona Norte       |
| 69647              | Finca Brasilia Del Oro                 | Zona Norte       |
| 81005              | Aeropuerto Internacional de Limón      | Caribe Sur       |
| 98103              | Estación Biológica Las Cruces San Vito | Pacífico Sur     |
| 84141              | Imn Aranjuez                           | Valle Central    |
| 90013              | Finca Damas                            | Pacífico Central |
| 69633              | Comando Los Chiles                     | Zona Norte       |
| 74051              | Aeropuerto de Liberia                  | Pacífico Norte   |
| 100633             | Finca El Patio Puerto Jiménez          | Pacífico Sur     |

Cuadro 4. Cuadro de contingencia 3x3 utilizada para el estudio estadístico

| Pronóstico/<br>Observado | BN    | N     | AN    | TOTAL |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|
| BN                       | a     | b     | c     | a+b+c |
| N                        | d     | e     | f     | d+e+f |
| AN                       | g     | h     | i     | g+h+i |
| TOTAL                    | a+d+g | b+e+h | c+f+i | m     |

$$POD(AN) = \frac{i}{c+f+i} \quad (1)$$

$$FAR(AN) = \frac{g}{g+h+i} \quad (2)$$

¿Qué es BN, N?

$$CSI = \frac{1}{\frac{1}{POD} + \frac{1}{1-FAR} - 1} \quad (3)$$

BN = Bajo lo normal y N = Normal

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Viento

Las comparaciones entre las diferentes parametrizaciones de cúmulos, mostraron cambios en la cantidad y la distribución de la lluvia, así como en la trayectoria del centro del ciclón tropical a su paso sobre el país.

Las parametrizaciones de cúmulos que produjeron cantidades similares a la lluvia real fueron GF, AS (YSU), AS-H y la simulación que no tenía (SP) (ver cuadro 5, figuras 5 y 6). La GF generó la mejor simulación de trayectoria, debido a que se acercó más el centro del ciclón según lo observado, con un desplazamiento menos zonal debido a que simuló la primera con un margen de error mucho menor que las otras parametrizaciones, pronosticando la salida del centro de Otto cerca al golfo de Papagayo.

BMJ, AS (YSU) y AS-H simularon la trayectoria más al norte del golfo de Papagayo, muy cercano a las costas de Nicaragua (ver figura 5), lo anterior debido a una subestimación de la alta presión al norte de Centroamérica asociada al empuje frío, condición observada en el dominio 1.

La corrida en la que no se utilizó parametrización de cúmulos produjo una trayectoria al norte del golfo de Papagayo (ver figura 5), pero más al sur que el resto de las simulaciones, acercándose un poco más a la trayectoria observada en comparación con la mayoría de las simulaciones (con excepción de la generada con GF).

Se observó una sobreestimación del arrastre de humedad (resultados no presentados en

Cuadro 5. Sesgo de la precipitación (mm) registrada en 30 horas de las parametrizaciones PC

| NOMBRE ESTACION                        | AS_H   | AS     | BMJ   | GF     | SP     |
|----------------------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|
| ISLA SAN JOSÉ                          | -293.5 | -329.7 | -308  | -214.2 | -285.2 |
| LAGUNA CAÑO NEGRO                      | 34.9   | 23.3   | -11.7 | -5.5   | -18.9  |
| UPALA                                  | -88.5  | -57.5  | -26.5 | -18.5  | -36    |
| FINCA BRASILIA DEL ORO                 | -56.9  | -69.3  | -67.8 | -51.6  | 12.3   |
| AEROPUERTO INTERNACIONAL DE LIMÓN      | -125.6 | -110.8 | -131  | -141.2 | -134.9 |
| ESTACIÓN BIOLOGICA LAS CRUCES SAN VITO | 76.3   | 29.5   | 161.5 | 107.2  | 175    |
| IMN ARANJUEZ                           | 75.3   | 88.3   | 129.4 | 7.2    | 104.7  |
| FINCA DAMAS                            | 83.5   | 215.5  | 143.3 | -0.2   | 154.2  |
| COMANDO LOS CHILES                     | 227.9  | 59.8   | 165.6 | 79.5   | 118.5  |
| AEROPUERTO INTERNACIONAL DE LIBERIA    | -32.8  | -30.9  | -68.4 | -38.6  | 24.2   |
| FINCA EL PATIO PUERTO JIMÉNEZ          | -24.3  | -57.2  | -22.6 | -2.5   | 19.1   |

Nota: En color amarillo se destacan los valores de menor sesgo (BIAS).

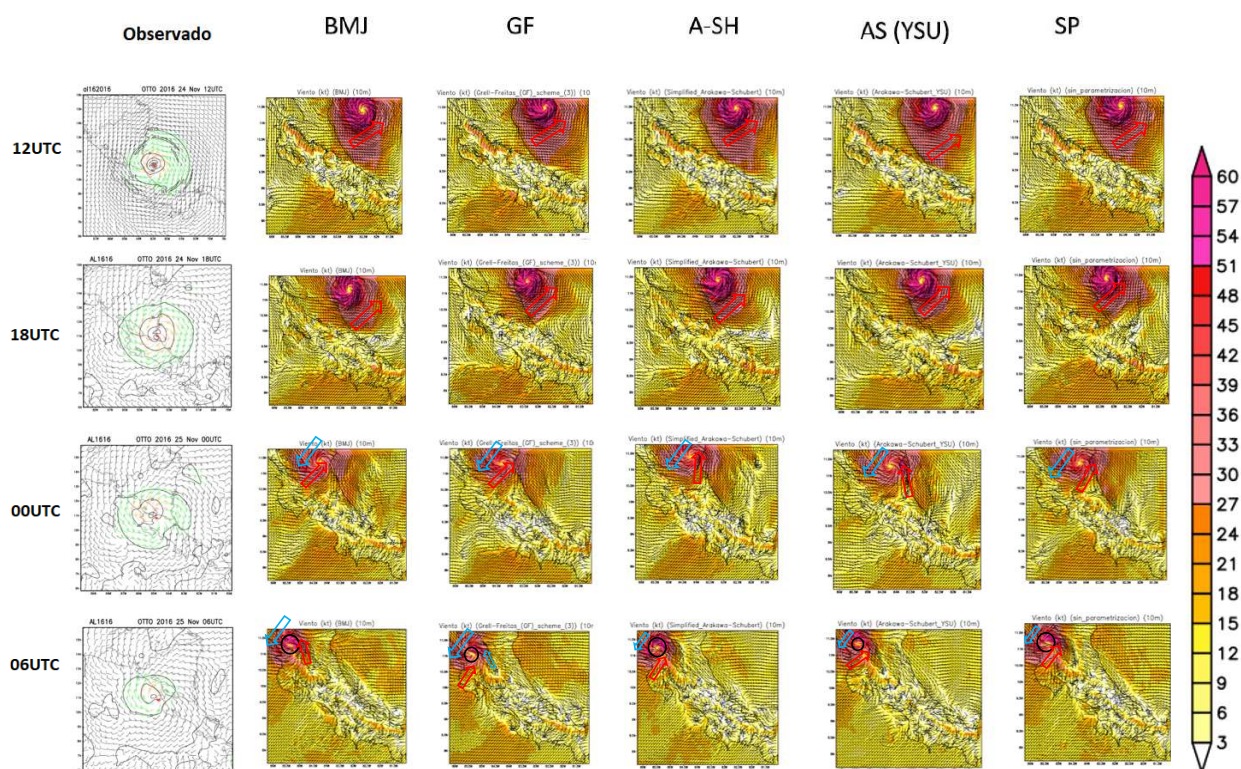


Figura 5. Velocidad y dirección del viento en nudos (kt) durante del huracán Otto entre el 24 de noviembre 12 UTC hasta el 25 de noviembre 06 UTC (cada 6 horas). Los mapas observados con los vectores e isotacas (líneas que unen puntos con igual velocidad) del viento a nivel de superficie. Colores amarillos y rojos son vientos más intensos. Fuente observada: RAMMB-CIRA.

esta investigación) de la región del Pacífico costarricense en la mayoría de los esquemas de PC, predominando sin embargo una mejor dinámica simulada por el viento de GF a las 00 UTC (ver figura 5), no obstante ese mismo esquema mantiene fuertes vientos luego a las 06 UTC, manteniendo así el arrastre de humedad al Pacífico. Las otras PC no presentan ese comportamiento de vientos oestes intensos, incluso AS a esa misma hora (06UTC), la cual es la PC con la menor velocidad de vientos del oeste en el Pacífico, subestimando en comparación con lo observado.

### 3.2. Precipitaciones

En la figura 6 se muestra la manera como GF es la única simulación que no sobrestima las precipitaciones en la región del Pacífico Central y

Valle Central, algo que sí hicieron el resto de las corridas pronosticando más lluvia en el Pacífico Central y Valle Central, donde las precipitaciones fueron más aisladas y la nubosidad predominante fue tipo cirrus y estratocúmulos.

Los montos máximos de precipitación que ocurrieron en la región norte de Guanacaste al final del 24 de noviembre, fueron mejor pronosticados por AS-H y SP. Hubo una tendencia en la mayoría de las parametrizaciones, a simular el desplazamiento del ciclón al norte de la trayectoria observada, acercándose a la distribución y cantidad de lluvia en la Fortuna de Bagaces y zonas aledañas.

Se observó un retraso en el movimiento del centro u ojo del ciclón, posiblemente debido a que las parametrizaciones se realizaron con condiciones



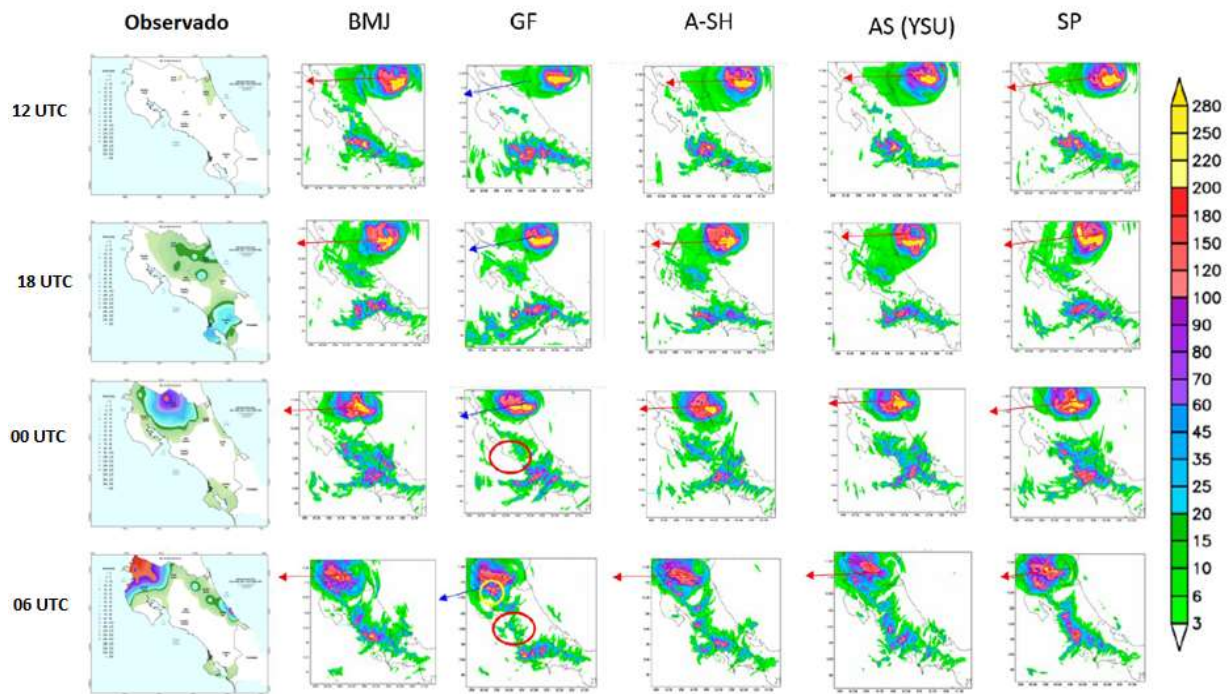


Figura 6. Simulaciones de la lluvia en milímetros (mm) durante del huracán Otto entre el 24 de noviembre 12 UTC y el 25 de noviembre 06 UTC. (Cada 6 horas). Las flechas indican el movimiento de la convección y los círculos indican menos (rojos) o más (amarillo) convección y lluvia detectada solamente por ese esquema de cúmulos. Las flechas en azul muestran el desplazamiento de la simulación que más se acerca a lo observado.

iniciales de 60 horas antes del arribo de Otto a tierra y los resultados fueron generados 52 horas antes de que Otto impactara el continente (al modelo le toma ocho horas generar los resultados).

La lluvia del Caribe Sur que se presentó en la noche del 24 y madrugada del 25 de noviembre (00UTC y 06 UTC) fue subestimada por la mayoría de las simulaciones; sin embargo, BMJ pronosticó montos de 70-100 mm en la noche, adelantando en un período de seis horas las precipitaciones caribeñas en comparación con lo ocurrido (ver figura 5).

Aunque la mejor parametrización en cuanto a lluvia fue GF, se observó que esta no fue acertada en la región del Caribe.

En el análisis cuantitativo los resultados del sesgo (BIAS) de las diferentes simulaciones, mostraron

a GF como la parametrización con mayor cantidad de casos con menos diferencia en la lluvia observada, de las 11 estaciones meteorológicas analizadas (ver cuadro 5). Los esquemas AS y SP fueron los que mejores resultados tuvieron en los eventos de precipitación del Caribe Sur y Pacífico Sur.

En la figura 7 se muestran las cuatro estaciones meteorológicas, con las mayores cantidades de lluvia durante la presencia del huracán Otto. Comparando con los esquemas PC, se evidencia un adelanto en la convección de alrededor de tres horas en comparación con lo observado, es decir, la ubicación del centro del huracán se presenta en promedio tres horas retrasado en comparación con lo ocurrido en la mayoría de las estaciones y con casi todas las PC. Esto ocurre probablemente debido a que hay una respuesta más rápida de la convección durante el día y la variación en

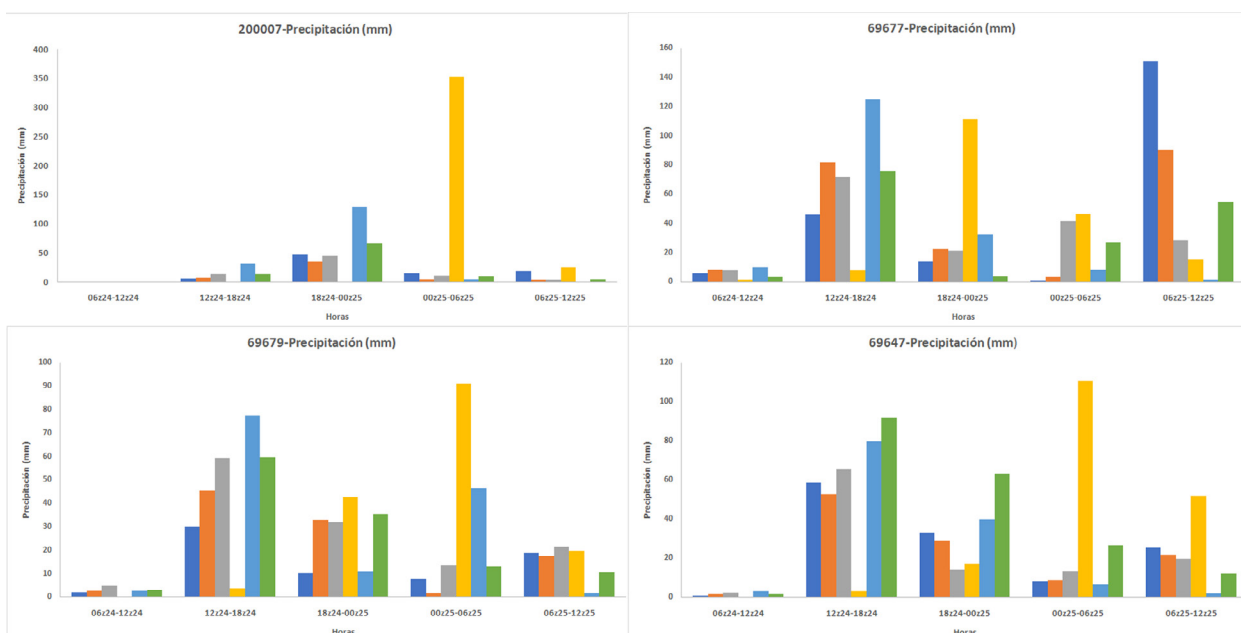


Figura 7. Comparación de la lluvia en las estaciones con mayor acumulado de precipitación durante el evento de Otto.

la temperatura en la noche tiene un efecto de menos precipitaciones, por lo que la microfísica estará generando la diferencia de lluvia durante el período nocturno.

Los resultados POD mostraron a AS\_H, GF y SP como las parametrizaciones con mejores calificaciones para la lluvia (ver cuadro 6). El esquema que se alejó más de lo observado para los totales diarios fue el de AS. Por otro lado la FAR con la mejor calificación fue la GF, obteniendo

de esta manera la puntuación más alta del CSI con 0.88. Esto se debió a que el esquema GF no sobreestimó las precipitaciones en las regiones del norte del país y en el Pacífico Central.

## 4. CONCLUSIONES

Se observó un buen pronóstico en la mayoría de las simulaciones con dos días de antelación a la ocurrencia del evento, muy posiblemente relacionada con la resolución de menos de 3 km para el dominio interior, lo que facilita tener un buen pronóstico del ojo del huracán cuyo diámetro era de entre 45 y 50 km.

Los acumulados de lluvia durante el período de 30 horas se acercaron más a lo observado en períodos de 24 horas, en comparación con los pronósticos cada tres y seis horas, en los cuales hubo un adelanto de la convección de entre 3 y 6 horas con todos los esquemas de cúmulos. Por otro lado, la cantidad de falsas alarmas de extremos lluviosos durante 30 horas fueron

Cuadro. 6. Comparación de las FAR, POD y CSI para los diferentes esquemas de cúmulos para la lluvia pronosticada durante el 24-25 noviembre 2016 para períodos de 30 horas de afectación del huracán

| Parametrización | POD(AN)     | FAR(AN) | CSI         |
|-----------------|-------------|---------|-------------|
| AS_H            | <b>0.88</b> | 0.1     | 0.80        |
| AS              | 0.67        | 0.14    | 0.60        |
| BMJ             | 0.78        | 0.13    | 0.70        |
| GF              | <b>0.88</b> | 0       | <b>0.88</b> |
| SP              | <b>0.88</b> | 0.1     | 0.80        |

muy pocas para todos los esquemas de cúmulos analizados, siendo el esquema GF el único que no presentó falsas alarmas.

Todos los esquemas de PC utilizados sobrestimaron las cantidades de lluvia en el Pacífico y Valle Central, con excepción de GF. La trayectoria más similar a la real fue pronosticada por GF, debido a que presentó el menor sesgo en la mayoría de las estaciones.

La GF fue la mejor parametrización, debido probablemente a que generó un mayor impacto en el flujo del viento. Esto ocurre ya que el esquema de convección de GF hace que en la base de la nube el flujo de masa varíe cuadráticamente, en función de la fracción de corrientes ascendentes convectivas, es decir, se parametriza cambiando directamente la dinámica del modelo y no a través de una comparación de variables como en los otros esquemas de PC.

Hubo un retraso de alrededor de dos horas en lo que se refiere a la ubicación del ojo del huracán. Si se hubieran utilizado simulaciones más cercanas a la fecha de la afectación del huracán, se hubiesen obtenido mejores resultados. La confiabilidad más alta para este evento fue la de GF.

La GF fue la que simuló mejor en una escala de 30 horas la lluvia acumulada por el huracán, con un CSI superior al 0.88; incluso no presentó falsas alarmas para eventos extremos ubicados en el percentil 90, superando a la simulación que no tenía parametrización y era la recomendada para dominios menores a 5 km.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Rodolfo Dávila Picado funcionario de la Unidad de Informática del IMN por su colaboración en la obtención y organización de los datos utilizados para la elaboración de esta investigación.

## 6. REFERENCIAS

- Alfaro, E.; Soley, J. y Enfield, D. (2003). *Uso de una Tabla de Contingencia para Aplicaciones Climáticas (Use of a Contingency Table for Climatic Applications)*. Editado por ESPOL y FUNDESPOL. Guayaquil, Ecuador.
- Araya, J. y Soto, D. (2014). Desarrollo de un software para el procesamiento y control de calidad semi-automático de datos meteorológicos horarios. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos* y. 13 (1), 27.
- Comisión Nacional de Emergencias. (2017). *Plan general de la emergencia ante la situación provocada por el paso del huracán Otto por el territorio costarricense*. San José, Costa Rica.
- Dillon, M. E.; García Skabar, Y. y Nicolini, M. (2015). *Sensibilidad a la activación de parametrizaciones de cumulus en el modelo WRF*. Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad de Buenos Aires. CONGREGMET XII, Mar del Plata, Argentina. 26 al 29 de mayo. Resumen en actas del Congreso.
- Grell, G. A. & Freitas, S. R. (2014). A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. *Atmos. Chem. Phys.* 14, 5233-5250, doi:10.5194/acp-14-5233-2014.
- Han, J. & Hua-Lu, P. (2011). Revision of convection and vertical diffusion schemes in the NCEP Global Forecast System. *Wea. Forecasting*, 26, 520-533.
- Hu, X. M., Nielsen-Gammon, J. W. & Zhang, F. (2010). Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 49(9), 1831-1844.
- Instituto Meteorológico Nacional. (s.f). *Los huracanes y sus efectos en Costa Rica*. Recuperado de: <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/31306/9-LOS+HURACANES+Y+LOS+EFECTOS+EN+COSTA+RICA/dce06c47-915f-4517-a001-30cbf6f890d9>.

- Instituto Meteorológico Nacional. (2017). *Huracán Otto*. Informe Técnico. San José, Costa Rica.
- Janjić, Z.I. (1994). The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927-945.
- Lizano, O. y Fernández, W. (1996). Algunas características de las tormentas tropicales y de los huracanes que atravesaron o se formaron en el caribe adyacente a Costa Rica durante el período 1886-1988. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. 3(1) 3-10.
- Mercader, J., Codina, B., Sairouni, A. & Cunillera, J. (2010). Results of the meteorological model WRF-ARW over Catalonia, using different parameterizations of convection and cloud microphysics. *Weather Clim. West. Med.* 7, 75-86.
- Manju, M. & Shweta, B. (2011). Analysis of WRF Model Performance over Subtropical Region of Delhi, India. *Advances in Meteorology*. Vol. 2011, Article ID 621235, 13 pages, 2011. doi:10.1155/2011/621235.
- Mitchell, K. (2005). *The community Noah land-surface model (LSM)*. User's Guide. Recovered from ftp: //ftp. emc. ncep. noaa. gov/mmb/gcp/ldas/noahlsn/.
- Poleo, D. y Stolz, W. (2013). Evaluación comparativa de un evento hidrometeorológico extremo en el Valle Central de Costa Rica, utilizando diferentes parametrizaciones de cúmulos del modelo numérico del tiempo WRF-EMS. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*. 12 (1), 56.
- Shepherd, T. J., & Walsh, K. J. (2016). *Sensitivity of hurricane track to cumulus parameterization schemes in the WRF model for three intense tropical cyclones: impact of convective asymmetry*. Meteorology and Atmospheric Physics, 1-30.
- Schaefer, J. (1990). The Critical Success Index as an Indicator of Warning Skill. *Weather and Forecasting*. Vol. 5, issue 4, pp. 570-575.







Instituto Meteorológico Nacional

Sitio web:  
[www.imn.ac.cr](http://www.imn.ac.cr)

Teléfono: (506) 2222 5616

Apartado postal: 5583-1000  
San José  
Costa Rica

