



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES A ESCALA LOCAL PARA EL PRONÓSTICO DE NIEBLA O NEBLINA EN EL AERÓDROMO “ERNESTO ESGUERRA CUBIDES”**

**Alvaro Rafael Martínez Mancera**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias  
Bogotá, Colombia

2015

# **ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES A ESCALA LOCAL PARA EL PRONÓSTICO DE NIEBLA O NEBLINA EN EL AERÓDROMO “ERNESTO ESGUERRA CUBIDES”**

**Alvaro Rafael Martínez Mancera**

Tesis presentada como requisito para optar al título de:

**Magíster en Ciencias – Meteorología**

Directora

Dr. rer.nat Astrid Baquero Bernal

Línea de Investigación:

Predicción numérica del tiempo y el clima

Grupo de Investigación:

Grupo de Simulación del Sistema Climático Terrestre

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias

Bogotá, Colombia

2015

*A mi mamá, mi hermano y a Lina María mi esposa, los mejores seres humanos que existen.*

## Agradecimientos

Al llegar a este punto y después de haber pasado por muchas cosas, es difícil escribir y dar las gracias a todas las personas que contribuyeron a que este trabajo llegara a buen término.

A Dios, porque me acompañó en cada segundo de la realización de este trabajo poniéndome en mi vida la mejor oportunidad de mi vida.

A Astrid Baquero, directora de este trabajo, quien con su sabiduría, apoyo y paciencia me ayudó a crecer como investigador y a querer aún más la meteorología; nunca dejó de estar atenta a direccionar mi rumbo.

A Luis Raúl Sánchez por sus invaluable consejos, voces de aliento y colaboración desinteresada, solucionando dudas y procedimientos necesarios para elaborar esta investigación.

A Jorge Jiménez y Richard Cáceres, porque gracias al apoyo que me brindaron con sus conocimientos, me impulsaron a dedicarle las fuerzas y energía necesaria para cumplir esta meta.

A mi mamá por su preocupación e impulsarme en todo momento para no desfallecer.

A Jesús Sanabria y Julián Pantoja por el apoyo recibido en la extracción de los datos del modelo y demás información, de corazón muchas gracias.

## Resumen

Se utilizaron reportes METAR y SPECI generados para el aeródromo “Ernesto Esguerra Cubides” (EEC), ubicado en Tres Esquinas-Caquetá, entre el 01 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011, simulaciones del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) en su versión 2.1.1 con resolución para el mismo período de tiempo mencionado anteriormente, imágenes satelitales de los satélites GOES12 y GOES13 en los canales infrarrojo y vapor de agua, cartas de superficie de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y radiosondeos realizados en el aeródromo EEC. El análisis de estos datos permitió establecer las condiciones a escala local que favorecieron la ocurrencia de niebla o neblina en el EEC y los meses en horas de mayor ocurrencia de estos fenómenos, y a partir de ese análisis se establecieron tres casos de estudio para los cuales se analizan las diferentes variables (temperatura, dirección e intensidad del viento, flujos de energía). De esta manera se contribuye con el avance en el conocimiento de los factores de riesgo causantes de accidentes aéreos, mejorando así la seguridad, regularidad y eficiencia de las operaciones aéreas en Colombia.

**Palabras claves:** Niebla, neblina, reportes METAR-SPECI, WRF 2.1.1, GOES12, GOES13, aeródromo, fenómenos meteorológicos.

## Abstract

We used data from METAR and SPECI reports generated between January 1 2009 and December 31 2011 for the "Ernesto Esguerra Cubides" (EEC) aerodrome, located in Tres Esquinas – Caquetá, data from simulations obtained with the Meteorological Research and Forecasting (WRF) model, version 2.1.1, for the same period mentioned above, from the we also used data from the infrared and water vapor channels of the GOES12 and GOES13 satellites, charts of Surface Oceanic and atmospheric National Administration (NOAA ) and soundings made in the EEC airfield. The analysis of these data allowed to establish the local scale conditions that favored the occurrence of fog or mist in the EEC aerodrome of greater frequency and months and hours of these phenomena. Three case studies we established and for which different variables (temperature, wind direction and intensity, energy flows). Were analyzed thus it contributes to advancement of knowledge and the months and of greater frequency hours of these phenomena of knowledge of risk factors causing air accidents, improving safety, regularity and efficiency of air operations in Colombia.

**Keywords:** Fog, mist, METAR, SPECI, WRF 2.1.1, GOES12, GOES13 meteorological phenomena.

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>IX</b>
<b>Listas de figuras</b> .....	<b>X</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XIV</b>
<b>Lista de abreviaturas</b> .....	<b>XV</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Motivación</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 ¿Qué son niebla y neblina?</b> .....	<b>7</b>
<b>1.2.1 Niebla</b> .....	<b>7</b>
<b>1.2.2 Neblina</b> .....	<b>7</b>
<b>1.3 Estado del arte del de estudio pronóstico la niebla y neblina</b> .....	<b>8</b>
<b>1.4 Objetivos</b> .....	<b>10</b>
<b>1.4.1 Objetivo general</b> .....	<b>10</b>
<b>1.4.2 Objetivos específicos</b> .....	<b>10</b>
<b>2 Aspectos teóricos</b> .....	<b>11</b>
<b>2.1 Aspectos generales del tiempo atmosférico en Colombia</b> .....	<b>11</b>
<b>2.2 La visibilidad</b> .....	<b>13</b>
<b>2.3 Reglas de vuelo y condiciones meteorológicas</b> .....	<b>14</b>
<b>2.4 Fenómenos meteorológicos adversos para la operación de un aeródromo</b> .....	<b>15</b>
<b>2.5 Descripción de variables y reportes meteorológicos</b> .....	<b>17</b>
<b>2.5.1 Temperatura del aire en superficie</b> .....	<b>18</b>

---

<b>2.5.2</b>	Temperatura del punto de rocío.....	18
<b>2.5.3</b>	Humedad relativa.....	19
<b>2.5.4</b>	Viento.....	19
<b>2.5.5</b>	Reportes METAR y SPECI.....	20
<b>2.5.5.1</b>	METAR.....	20
<b>2.5.5.2</b>	SPECI.....	21
<b>2.6</b>	Modelo WRF 2.1.1.....	23
<b>2.6.1</b>	Módulos del WRF 2.1.1.....	24
<b>2.6.1.1</b>	WRFSI.....	24
<b>2.6.1.2</b>	3DVAR.....	25
<b>2.6.1.3</b>	WRF.....	26
<b>3</b>	Análisis y Resultados.....	27
<b>3.1</b>	Área de pronóstico y mediciones disponibles.....	27
<b>3.1.1</b>	Análisis METAR y SPECI.....	28
<b>3.1.1.1</b>	Temperatura del aire y temperatura del punto de rocío de los reportes METAR y SPECI.....	28
<b>3.1.1.2</b>	Dirección e intensidad del viento en los reportes METAR y SPECI.....	33
<b>3.2</b>	Ocurrencia de eventos relacionados con niebla y neblina.....	34
<b>3.3</b>	Análisis de la ocurrencia de los fenómenos bruma, llovizna, lluvia y tormenta.....	42
<b>3.3.1</b>	Bruma.....	42
<b>3.3.2</b>	Llovizna.....	43
<b>3.3.3</b>	Lluvia.....	44
<b>3.3.4</b>	Tormenta.....	45
<b>3.4</b>	Análisis inter-anual y casos ocurrencia de niebla y neblina.....	46
<b>3.5</b>	Casos de Estudio.....	49
<b>3.5.1</b>	Episodio 1, enero 24 de 2009.....	50
<b>3.5.2</b>	Episodio 2, 10 de julio de 2010.....	58

---

<b>3.5.3</b>	Episodio 3, 25 de noviembre de 2011.....	67
<b>4</b>	Conclusiones y recomendaciones.....	79
<b>4.1</b>	Conclusiones.....	79
<b>4.2</b>	Recomendaciones.....	80
<b>A</b>	<b>Anexo Cartas de superficie usadas para el análisis de información meteorológica de superficie.....</b>	<b>82</b>
	<b>Bibliografía.....</b>	<b>85</b>

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1: ZCIT junio 2014. Imagen del canal infrarrojo tomada del satélite GOES-13 para el 04 de julio de 2014 obtenida a través de SIMFAC.....	12
Figura 2: Tipos de visibilidad.....	14
Figura 3: Dominio # 2 de 15 km X 15 km las coordenadas de los puntos en las esquinas inferior izquierda y superior derecha son:-4.567352 S y -81.48895 W y 13.95193 N y -65.15788 W.....	25
Figura 4: Promedios mensuales de la T2 mínima, media y máxima en el aeródromo EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011.....	29
Figura 5: Valores medios de la temperatura del punto de rocío en el aeródromo EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011.....	30
Figura 6: Datos faltantes de T2 y DP2 en los METAR del EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011.....	31
Figura 7: Valores mensuales promedio de T2 provenientes del modelo WRF 2.1.1 y de los reportes METAR y SPECI para el aeródromo EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011.....	32
Figura 8: Número de reportes METAR y SPECI que reportaron, en cada hora del día, el fenómeno niebla (FG) en el aeródromo EEC en el período 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011 .....	35
Figura 9: Número de reportes METAR y SPECI que reportaron, en cada mes del año, el fenómeno de niebla (FG) en el EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011 .....	36
Figura 10 Número de reportes METAR y SPECI que reportaron, por hora del día la presencia del fenómeno neblina (BR) en el aeródromo EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011 .....	37
Figura 11: Número de reportes METAR y SPECI que reportaron, en cada mes del año el fenómeno neblina (BR) en el EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011. ....	38

---

Figura 12: Número de reportes METAR y SPECI que reportaron, por hora del día la presencia del fenómeno niebla (BCFG) en el aeródromo EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011. ....	39
Figura 13: Número de reportes METAR y SPECI que reportaron, en cada mes del año el fenómeno bancos de niebla (BCFG) en el EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011.....	40
Figura 14: Número de reportes METAR y SPECI que reportaron, por hora del día la presencia del fenómeno niebla en las vecindades (VCFG) en el aeródromo EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011.....	41
Figura 15: Número de METAR y SPECI que reportaron, por mes del año la presencia del fenómeno de niebla en las vecindades (VCFG) en el aeródromo EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011 .....	41
Figura 16: Número de METAR y SPECI que reportaron, por mes del año, la presencia del fenómeno bruma (HZ) en el EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011 .....	43
Figura 17: Número de METAR y SPECI que reportaron, por mes del año, la presencia del fenómeno de llovizna (DZ) en el EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011 .....	44
Figura 18: Número de METAR y SPECI que reportaron, por mes del año, la presencia del fenómeno de lluvia (RA) en el EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011 .....	45
Figura 19: Número de METAR y SPECI que reportaron, por mes del año, presencia del fenómeno de tormenta (TS) en el EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011.....	46
Figura 20: Datos de temperatura simulada por el WRF 2.1.1 y de METAR-SPECI en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011, y (inferior) de los casos de niebla y neblina ocurridos en el mismo lapso.....	47
Figura 21: Datos del punto de rocío simulado por el WRF 2.1.1 y de METAR-SPECI en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011, y (inferior) de los casos de niebla y neblina ocurridos en el mismo lapso.....	48
Figura 22: Datos de presión simulados por el WRF 2.1.1 y de METAR-SPECI en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011, y (inferiores) de los casos de niebla y neblina ocurridos en el mismo lapso.....	48
Figura 23: Datos intensidad del viento simulados por el WRF 2.1.1 y de METAR-SPECI en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011, y (inferiores) de los casos de niebla y neblina ocurridos en el mismo lapso.....	49

---

Figura 24: Análisis de superficie para el 24 de enero de 2009, 12 UTC (NWS DIFAX Weather Map Archive, 2014).....	50
Figura 25: Imágenes de los canales: infrarrojo a) y vapor de agua b). Tomadas por SIMFAC del satélite GOES-12 el 24 de enero de 2009 a las 11:15 UTC (06:15 HLC) ...	52
Figura 26: Evolución horaria de la visibilidad observada en el EEC. Iniciando el 22 de enero de 2009 a las 00:00 UTC (19:00 HLC) hasta el 25 de enero de 2009 a las 22:00 UTC (17:00 HLC).....	53
Figura 27: Evolución horaria de la intensidad del viento observado en el EEC. Iniciando el 22 de enero de 2009 a las 00:00 UTC (19:00 HLC) hasta el 25 de enero de 2009 a las 22:00 UTC (17:00 HLC) .....	54
Figura 28: Series de tiempo de variables de flujos de energía arrojadas por el modelo WRF 2.1.1 cada tres horas de los días 22 al 25 de enero del 2009 para el aeródromo EEC. Downward short wave flux at ground surface (SWD), Downward long wave flux at ground surface (GLW), Upward heat flux at the surface (HFX) y Latent heat flux at the surface (LH) .....	55
Figura 29: Temperatura del aire a 2 m de los reportes METAR-SPECI y del modelo WRF 2.1.1 cada tres horas de los días 22 al 25 de enero del 2009 para el aeródromo EEC...	56
Figura 30: Sección temporal generada con las variables Presencia de Nubosidad [binaria] (verde), Agua en nubes [g/Kg] (roja), Agua precipitable [g/Kg] (azul) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas. ....	57
Figura 31: Análisis de superficie del 10 de julio de 2010, 12:00 UTC / 07:00 HLC (NWS DIFAX Weather Map Archive, 2014) .....	60
Figura 32: Imágenes satelitales de los canales infrarrojo y vapor de agua tomadas del satélite GOES-13, del 10 de julio de 2010 a las 12:15 UTC (07:15 HLC).....	61
Figura 33: Evolución horaria de la visibilidad observada en el EEC. Iniciando el 09 de julio de 2010 a las 00:00 UTC (19:00 HLC) hasta el 12 de julio de 2009 a las 22:00 UTC (17:00 HLC).....	62
Figura 34: Evolución horaria de la intensidad del viento observado en el EEC. Iniciando el 09 de julio de 2010 a las 00:00 UTC (19:00 HLC) hasta el 12 de julio de 2010 a las 22:00 UTC (17:00 HLC). ....	63
Figura 35: Flujos de energía del WRF 2.1.1 de los días 09 a las 00:00 UTC al 12 de julio a las 00:00 UTC del 2010 para el aeródromo EEC. ....	64
Figura 36: Temperatura a 2 m del WRF 2.1.1 cada tres horas de los días 09 al 12 de julio del 2010 para el aeródromo EEC.....	65
Figura 37: Radiosondeo realizado en el EEC con el Sistema de Sondeo Atmosférico (código OMM 80371), del 10 de julio de 2010 a las 12 UTC (07:00 HLC).....	66

Figura 38: Sección temporal generada con las variables Presencia de Nubosidad [binaria] (verde), Agua en nubes [g/Kg] (roja), Agua precipitable [g/Kg] (azul) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas. ....	67
Figura 39: Análisis de superficie del 25 de noviembre de 2011, 12:00 UTC (07:00 HLC) (NWS DIFAX Weather Map Archive, 2014) .....	71
Figura 40: Imágenes satelitales de los canales infrarrojo y vapor de agua tomadas del satélite GOES-13, para el 25 de noviembre de 2011 a las 09:15 UTC (04:15 HLC).....	72
Figura 41: Evolución horaria de la visibilidad observada en el EEC. Iniciando el 23 de noviembre de 2011 a las 00:00 UTC (19:00 HLC) hasta el 26 de noviembre de 2011 a las 22:00 UTC (17:00 HLC).....	73
Figura 42: Evolución horaria de la intensidad del viento observado en el EEC. Iniciando el 23 de noviembre de 2011 a las 00:00 UTC (19:00 HLC) hasta el 26 de noviembre de 2011 a las 22:00 UTC (17:00 HLC).....	74
Figura 43: Flujos de energía del WRF 2.1.1 de los días 23 al 26 de noviembre del 2011 para el aeródromo EEC .....	75
Figura 44: Temperatura a 2 m del WRF 2.1.1 cada tres horas de los días 23 al 26 de noviembre del 2011 para el aeródromo EEC.....	76
Figura 45: Radiosondeo realizado en el aeródromo EEC, con el Sistema de Sondeo Atmosférico código OMM 80371, del 25 de noviembre de 2011 a las 12 UTC (07:00 HLC), diagrama Skew-T tomado de Universidad de Wyoming, 2011.....	77
Figura 46: Sección temporal generada por la simulación de las 00:00 UTC del modelo WRF 2.1.1 el día 24 de noviembre de 2011 .....	78
Figura 47: Carta del análisis de superficie para el 24 de enero de 2009 a las 00 UTC (19:00 HLC) (NOAA, 2014) .....	82
Figura 48: Carta del análisis de superficie para el 24 de enero de 2009 a las 06 UTC (01:00 HLC) (NOAA, 2014) .....	82
Figura 49: Carta del análisis de superficie para el 10 de julio de 2010 a las 00 UTC (19:00 HLC) (NOAA, 2014) .....	83
Figura 50: Carta del análisis de superficie para el 10 de julio de 2010 a las 06 UTC (01:00 HLC) (NOAA, 2014) .....	83
Figura 51: Carta del análisis de superficie para el 25 de noviembre de 2011 a las 00 UTC (19:00 HLC) (NOAA, 2014) .....	84
Figura 52: Carta del análisis de superficie para el 25 de noviembre de 2011 a las 06 UTC (01:00 HLC) (NOAA, 2014) .....	84

## Lista de tablas

	Pág
Tabla 1. Variables utilizadas para el análisis de las condiciones de escala local.	28
Tabla 2: Datos de Dirección del viento de los reportes METAR y SPECI en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011.....	33

## Lista de abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
ATC	Air Traffic Control
BC	Bancos aislados
BCFG	Bancos de niebla aislados
BKN	Fragmentado
BR	Neblina
CB	Cumulonimbus
CFIT	Controlled Flight Into Terrain
DU	Polvo
DZ	Llovizna
EEC	Ernesto Esguerra Cubides
EMA	Estación Meteorológica Automática
FAC	Fuerza Aérea Colombiana
FG	Niebla
FU	Humo
ft	Pies
FZ	Engelamiento
GR	Granizo
GTS	Global Telecommunication System
HLC	Hora local colombiana
HZ	Calima
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IFR	Reglas de vuelo por instrumentos

---

IMC	Condiciones meteorológicas de vuelo por instrumentos
inHg	Pulgadas de mercurio
km	Kilómetros
kt	Nudos
m	Metros
METAR	Informe Meteorológico de rutina para la aviación
MI	Baja
NCEP	National Center for Environmental Prediction
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OVC	Cubierto
PR	Parcial
QNH	Presión barométrica ajustada al nivel del mar.
RA	Lluvia
RVR	Alcance visual en pista
SH	Chubasco
SIMFAC	Sistema de Información Meteorológico de la Fuerza Aérea Colombiana
SPECI	Informe meteorológico especial
SKTQ	Sur América Colombia Tres Esquinas (Aeródromo Ernesto Esguerra Cubides)
TS	Tormenta
TCU	Cúmulos en forma de torre (Torrecúmulos)
UTC	Tiempo universal coordinado
VC	Vecindades
VCFG	Niebla en las vecindades
VFR	Reglas de vuelo visual
VMC	Condiciones Meteorológicas de Vuelo Visual
WRF	Weather Research and Forecasting
ZCIT	Zona de Confluencia Intertropical

# Capítulo 1

## 1.Introducción

### 1.1 Motivación

En el aeródromo “Ernesto Esguerra Cubides” (EEC), ubicado en Tres Esquinas Caquetá, la niebla y la neblina son fenómenos meteorológicos frecuentes que demuestran la inestabilidad de la atmósfera y constituyen un peligro latente para la aeronavegación ya que reducen los mínimos visuales de operación como el techo de nubes y la visibilidad horizontal, sin embargo, hasta ahora no se había hecho ningún estudio sobre la ocurrencia de estos fenómenos para el mencionado aeródromo que permitan conocer las características con las que pueden presentarse.

La ocurrencia de estos fenómenos meteorológicos en cualquier aeródromo son unas de las causas más comunes del denominado concepto de seguridad aérea, Vuelo Controlado Contra el Terreno (Controlled Flight Into Terrain) o CFIT (FAC, 1998). Un CFIT se genera cuando aeronaves, que volando en condiciones mecánicas y aerodinámicas correctas, impactan y se accidentan contra el terreno, agua u obstáculo sin ninguna razón aparente para un observador en tierra; generando pérdidas humanas y materiales por daños en equipos e instalaciones.

(Jiménez y Zea, 2001) afirman que: “en términos aeronáuticos, las condiciones de un vuelo dependen directamente de la situación meteorológica actual y se encuentran determinadas por la visibilidad (horizontal y vertical) y por la distancia de la aeronave a las nubes (horizontal y vertical)”.

La comparación de datos modelados con información de superficie de los años 2009 al 2011, llevada a cabo en este trabajo, tiene como fin contribuir al incremento de la seguridad aérea y la optimización de los recursos para el desarrollo de las operaciones aéreas que se realizan en el aeródromo EEC. La comparación implica el análisis de días específicos en los cuales el aeródromo fue cerrado o restringido por condiciones meteorológicas adversas, debido a la presencia de niebla o neblina. La comparación también implica el análisis de información de superficie dada a través de los Informes Meteorológicos de Rutina para la aviación (METAR) y la arrojada por el modelo numérico Weather Research and Forecasting (WRF) en su versión 2.1.1.

Así mismo, al probar la capacidad que tiene el modelo WRF 2.1.1 de pronosticar a corto plazo la ocurrencia de los fenómenos de niebla y neblina, no solo se pretende disminuir el riesgo de accidentes aéreos, sino que se procura hacer más eficiente la programación y desarrollo de vuelos, con el propósito de hacer correcto uso de las horas donde meteorológicamente se facilite la aeronavegación en cada una de las operaciones a realizar.

En relación al aeródromo EEC, la mayor preocupación para la aeronavegación son los cierres o restricciones de operaciones del mismo, los cuales se producen en un gran porcentaje por la ocurrencia de los fenómenos meteorológicos niebla y neblina, los cuales, aumentan el riesgo de accidentalidad y ocasionan demoras en el desarrollo de las operaciones aéreas. Hasta ahora no se han realizado estudios para este aeródromo que determinen las características con las que se presentan estos fenómenos en cuanto a duración, intensidad, épocas del año y horas del día en las que se presentan con mayor frecuencia.

Al no encontrarse determinadas estas épocas del año, se dificulta la planeación de los vuelos hacia y desde este aeródromo y se hace necesario que el personal

---

de controladores aéreos tenga la pericia suficiente para orientar a las tripulaciones y realizar de procedimientos aeronáuticos con baja visibilidad.

Según (Moreno y Gilaguinaliu, 1999), en un estudio realizado sobre accidentes aéreos por baja visibilidad representan un 15% del total, con la particularidad de que a partir de la década de los 80's se ha presentado un fuerte descenso del

número de casos. Para la FAC el peligro de baja visibilidad ha causado el 39% de los accidentes producidos por causas meteorológicas en el país, convirtiéndose en el mayor peligro. El 87% de estos accidentes a nivel mundial ocurren en el aterrizaje, pudiéndose atribuir todos ellos de error humano de decidir aterrizar en condiciones de visibilidad mínimas o por debajo del mínimo.

La baja visibilidad afecta las operaciones aéreas en las fases de aproximación y despegue pues en estas fases las aeronaves están obligadas a realizar maniobras muy cerca al terreno. La decisión de aterrizar puede darse por factores como escasez de combustible, mala planeación, presión por cumplir la misión, cansancio, afán por llegar al destino, demostración de un falso sentido de valor, exceso de confianza, etc.

De acuerdo a lo mencionado por Sánchez, 2009 en el "Programa de Prevención de Accidentes por CFIT", material de consulta y archivo del departamento de seguridad Aérea de la Fuerza Aérea en mencionado año:

- Debido a que: primero las condiciones eran adversas para aterrizar en Taraira (Vaupés), la Macarena (Meta), Mapiripán (Meta), Tres Esquinas (Caquetá) y

Peñas Coloradas (Caquetá), y 2) no se contaban con las radioayudas ideales para la aproximación en estas condiciones: las tripulaciones hacían caso omiso a los estándares de operación y seguían procedimientos no establecidos.

- El 100% de accidentes se presentó en condiciones adversas, previamente conocidas por las tripulaciones quienes aceptaron el riesgo de efectuar la misión. Estos accidentes causaron 73 muertes, que corresponden al 58% de la fatalidad CFIT y el 40% de la fatalidad total de los accidentes ocurridos en la FAC durante los años 1985 y 2004.
- El 83% de los destinos no disponían de radioayudas, ni procedimientos, ni instrumentos, el 66% de los destinos no disponían de Controladores de Tránsito Aéreo (ATC), el 16% de la tripulación no estaba familiarizado con su destino y el 50% de las aeronaves impactaron a muy baja altura, con el avión estabilizado contra cerros ubicados en cercanías a la pista.

El pronóstico del tiempo se puede definir como la utilización de tecnologías para predecir el comportamiento futuro de la atmósfera en un lugar y momento determinados, conocer la mayor cantidad de variables meteorológicas y tener un conocimiento de los procesos atmosféricos a diferentes escalas son algunos de los requisitos para que un pronóstico sea acertado.

En la actualidad existen diversos métodos de pronóstico, la selección de alguno de estos depende de la habilidad y experiencia del pronosticador; uno de los tipos de pronóstico es el “método de la persistencia”, siendo uno de los más sencillos, ya que, supone que las condiciones meteorológicas de un día serán las mismas o muy similares a las del día anterior. Este método funciona en sitios en los cuales no se presentan cambios significativos en el comportamiento meteorológico general.

Otro de los métodos que se conocen para realizar pronósticos es el de “tendencia”, en el cual se usan mapas y se tiene en cuenta el comportamiento de los centros de baja y alta presión y de los diferentes tipos de frentes. Gracias a esta información, el pronosticador puede predecir donde se espera el mal tiempo

o el buen tiempo. Cabe aclarar que por la ubicación geográfica de Colombia los frentes no influyen en el comportamiento de la ocurrencia de niebla y neblina. El empleo de simulaciones hechas por modelos físicos o provenientes de modelos estadísticos, son otro tipo de herramientas que ayudan a generar pronósticos del tiempo.

En el año 2007 se desarrolló el Sistema de Información Meteorológico de la Fuerza Aérea Colombiana (SIMFAC), el cual nació por la necesidad de suministrar pronósticos meteorológicos a corto plazo, los cuales son requeridos para que el planeamiento y desarrollo de las operaciones aéreas cuenten con información meteorológica acertada. Actualmente, este sistema cuenta con un grupo de trabajo capacitado y de gran experiencia. De igual forma cuenta con una infraestructura robusta tanto de hardware como de software, la cual permite generar productos meteorológicos de calidad.

Dentro de esta infraestructura se cuenta con el modelo Weather Research and Forecasting (WRF) (NCEP, 1990), implementado por la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) en la versión 2.1.1 dentro del SIMFAC. La adaptación del modelo involucra también alta resolución temporal y espacial al territorio nacional, incluyó la modificación del modelo digital de elevación, la cobertura y uso de suelos, así mismo se aprovechó su sistema de asimilación mejorado para incluir los datos meteorológicos capturados por las redes de observación y vigilancia meteorológica nacionales. La adaptación del modelo involucra también altas resoluciones temporal y espacial.

El modelo físico WRF 2.1.1 es una herramienta esencial para realizar, por ejemplo, pronósticos de precipitación sobre zonas específicas del territorio colombiano. Pero si bien, el modelo WRF 2.1.1 es conocido y utilizado ampliamente por los pronosticadores, hasta ahora no se han hecho

investigaciones para evaluar y comparar el desempeño de este modelo en cuanto al acierto en relación a la ocurrencia de fenómenos meteorológicos como niebla o neblina en un aeródromo colombiano.

Este trabajo se realiza con el fin de analizar si el modelo WRF 2.1.1 identifica la ocurrencia de niebla o neblina en el aeródromo “Ernesto Esguerra Cubides” en los años 2009 a 2011, y se compara la información del WRF con datos reales de superficie en el mismo período de tiempo. Debido a estos fenómenos el aeródromo se cierra, causa accidentes, demoras en el transporte aéreo de víveres, elementos necesarios para la sobrevivencia del personal que habita en la base aérea y las operaciones aéreas se ven afeadas.

A continuación se nombran casos de incidentes aéreos por los cuales se justifica este estudio:

El 04 de diciembre de 2000 el avión C-212 de matrícula FAC-1251 realizaba los procedimientos establecidos para aterrizar en el aeródromo EEC, las condiciones meteorológicas eran desfavorables y durante el momento de la aproximación a la cabecera 24 entra en Condiciones Meteorológicas de vuelo por Instrumentos (IMC) perdiendo la referencia visual con el aeródromo. La tripulación trató de mirar hacia fuera con el fin de ubicar la pista, al no obtener contacto visual sufren un descenso inadvertido ocasionó un CFIT a tan solo 2.5 millas náuticas (NM) de la pista. Otro caso sucedió el día 16 de enero del 2009 a las 12:00 pm HLC. El aeródromo fue cerrado por visibilidad reducida a 100 m por niebla hasta las 05:00 am HLC del 17 de enero (FAC, 2009). Este cierre generó retraso en el planeamiento de las operaciones aéreas. Otro evento similar sucedió desde el día 10 de julio de 2010 a las 11:00 pm HLC hasta las 06:00 am HLC del 11 de julio de 2010, cuando se cerró el aeródromo debido a baja visibilidad por presencia de niebla en el aeródromo (FAC, 2010).

## **1.2 ¿Qué son niebla y neblina?**

### **1.2.1 Niebla (FG)**

Este fenómeno meteorológico lo constituyen gotitas muy pequeñas, generalmente de agua microscópica suspendida en el aire, reduciendo la visibilidad horizontal y vertical en la superficie de la Tierra (OMM, 1992), lo que puede afectar por ejemplo las operaciones aéreas. Se considera que las gotas de agua en la niebla tienen un diámetro entre 5 y 50 micras (Pruppacher y Klett, 1997) y se asientan a velocidades no superiores a 5 cm s<sup>-1</sup> (OMM, 1996). Comúnmente, la mayoría de los episodios de niebla tienen un contenido de agua líquida (LWC) que oscila entre 0,01 y 0,3 gm<sup>-3</sup> (Masbou, 2008). De forma más clara se puede decir que la formación de niebla se da cuando el vapor de agua condensado como partículas de tipo aerosol, está a baja altura.

La niebla se puede clasificar en varios tipos dependiendo de su proceso de formación. Un tipo se presenta cuando existe enfriamiento radiativo de la tierra y las masas de aire cercanas a la superficie y es conocido como niebla de radiación. Otro tipo es la niebla de advección, la cual es inducida por el movimiento de masas de aire húmedo sobre superficies frías. El enfriamiento adiabático de masas de aire debido a accidentes geográficos se conoce como niebla pendiente ascendente y al presentarse una interacción tierra-océano en superficie se conoce como niebla del mar o niebla frontal por turbulencia.

### **1.2.2 Neblina (BR)**

La neblina es un fenómeno meteorológico que oscurece la atmósfera en superficie y es producido por gotitas de agua microscópicas que se encuentran suspendidas y generan una capa muy delgada de color gris sobre el terreno. Las

partículas inmersas en la neblina están en el orden de pocas decenas de micrómetros (Rojas, 2012).

### **1.3 Estado del arte del estudio de pronóstico la niebla y neblina**

El querer conocer y tener oportunamente un pronóstico confiable, particularmente de la ocurrencia en un lugar determinado de niebla o neblina, ha llevado a que se desarrollen diferentes estudios y métodos de predicción basados en observaciones, modelos numéricos de pronósticos y desarrollos estadísticos.

Los modelos numéricos se han utilizado desde hace varios años para pronosticar la niebla. Se diferencian en su configuración y complejidad de la microfísica que describe el comportamiento termodinámico. Los procesos que no son resueltos por el modelo numérico deben ser parametrizados. Esto implica añadir términos adicionales en las ecuaciones de la atmósfera (conservación del momento, conservación de la energía y ecuación de continuidad). Los procesos de pequeña escala como por ejemplo la niebla y la neblina no están resueltos por los modelos de gran escala, debido a que su tamaño es inferior al tamaño de la rejilla que utilizan dichos modelos. *Fisher y Caplan* (1963) desarrollaron uno de los primeros modelos de simulación para la evolución de niebla, pero no tienen en cuenta el enfriamiento radiativo de la atmósfera, lo que si consideraron (*Musson y Genon* 1987), (*Turton y Brown*, 1987) quienes mencionaron el transporte turbulento en la capa límite en noches con poca nubosidad.

Las agencias de Estados Unidos NOAA y el National Center Environmental Prediction (NCEP) crearon en el año 1996 el Short-Range Ensemble Forecast System (SREF), siendo implementado operativamente y con fines investigativos a partir de 2001 por Du y Tracton. Su objetivo principal fue mejorar la seguridad aérea y evitar accidentes por la influencia de la niebla y la neblina antes, durante y después del vuelo de las aeronaves.

---

Luego de varios años el NCEP-SREF se convirtió en un sistema de pronóstico generado por múltiples modelos numéricos (Eta, WRF, RSM) ensamblados y conformado por múltiples esquemas físicos y matemáticos. En el 2009 el Aviation Weather Center (AWC) configuró el sistema para el dominio espacial Continental US (CONUS), abarca Alaska y Hawaii, enfocando el uso del sistema en la previsión en disminución de visibilidad y techo de nubes, causas de la restricción en la operación de aeropuertos del área de interés.

Ji-Woo Lee publicó el 22 de enero de 2009, un artículo científico hecho con el objetivo principal de evaluar y mejorar la capacidad del WRF en la simulación y detección de niebla y baja visibilidad en aeropuertos de Corea. Se evaluaron estadísticamente varios casos de ocurrencia de niebla presentados entre los años 2003 al 2006 y se revisaron coeficientes y algoritmos de visibilidad configurados en el WRF, y se calcularon regresiones lineales entre la visibilidad observada y la simulación de hidrometeoros.

Un evento grave y de larga duración de niebla por radiación ocurrido bajo condiciones de baja temperatura ocurrido en Holanda entre el 24 y 25 de noviembre de 2004 motivó a Steeneveld, Wichers Schreur y Holtslag, meteorólogos holandeses a investigar sobre la ocurrencia de estos fenómenos. En el año 2010 publicaron un artículo científico que describe los modelos WRF y High-Resolution Limited-Area Model (HIRLAM) como herramientas principales para evaluar, simular y pronosticar el inicio y duración del mencionado evento de estudio. Es interesante el análisis que realizan de las condiciones sinópticas presentadas sobre el área de estudio durante el caso de estudio y la comparación de datos observados disponibles como: temperatura a 2 m, punto de rocío, dirección e intensidad del viento con los datos generados por WRF-HIRLAM. Por otra parte, tratan flujos de energía (flujos de onda corta y onda larga) generados por los modelos numéricos los cuales muestran valores entre de 250 y 300 W/m<sup>2</sup>

que coinciden con ciertos patrones en imágenes satelitales, y también con bajas temperaturas, nubosidad baja y la ocurrencia de niebla.

En Colombia, el estudio de la ocurrencia de niebla y neblina se ha abordado mediante trabajos basados en la exploración estadística de reportes METAR y SPECI, climatología de aeródromos y el planteamiento de modelos estadísticos de pronóstico para aeropuertos como “El Dorado” de Bogotá, el “José María Córdova” de Rionegro Antioquia y el aeródromo “Germán Olano” de Puerto Salgar Cundinamarca. Estos trabajos en su mayoría utilizan análisis de regresión logística, involucraron variables meteorológicas observadas en superficie y en altura, y determinaron ciclos de los fenómenos meteorológicos adversos para la operación bajo reglas de vuelo visual por instrumentos (VFR).

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

- Analizar la capacidad del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) para el pronóstico de niebla y neblina en el aeródromo “Ernesto Esguerra Cubides”.

### **1.4.2 Objetivos específicos:**

- Determinar y analizar el grado de acierto del modelo WRF en la detección de niebla o neblina.
- Analizar y comparar la información arrojada por el modelo WRF y los reportes METAR y SPECI.
- Establecer las características con que se presentaron los fenómenos.

## **Capítulo 2**

### **2. Aspectos teóricos**

#### **2.1 Aspectos generales del tiempo atmosférico en Colombia**

El tiempo atmosférico en Colombia está influenciado por la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) (Zea, 2000), la cual se define como zona de baja presión en sentido oriente-occidente. En la ZCIT los vientos Alisios del Noreste, que se

originan como un flujo alrededor de la alta presión del Atlántico Norte, se reúnen con los vientos Alisios del Sureste, los cuales son generados como un flujo alrededor de las altas del Pacífico Sur y Atlántico Sur. Debido al flujo convergente, la ZCIT es la zona de máxima nubosidad y precipitaciones sobre el continente (Figura 1). Los datos de superficie demuestran que en las áreas oceánicas dentro de la ZCIT, las lluvias sobrepasan en gran proporción la humedad suministrada por la evaporación desde el océano, parte esencial para mantener y favorecer la detonación de la convección sobre la ZCIT, suministrando flujo convergente de los alisios en la baja tropósfera y a gran escala proporcionando el calor latente necesario para la convección. La ZCIT sobre los océanos en pocas ocasiones se visualiza como una continua y larga banda de nubes de desarrollo vertical.

La ZCIT es un número de distintos conglomerados de nubes con escalas del orden de los cientos de kilómetros, que están separadas por regiones de cielos relativamente despejados. La intensidad de la ZCIT es también muy variable, tanto en el espacio como en el tiempo. Dado que los vientos alisios convergen el aire húmedo que se encuentra en la zona, éste asciende y se genera gran cantidad de nubes de tipo cumuliforme y fuertes precipitaciones. Por esto la región está caracterizada como una de la más nublada del planeta.

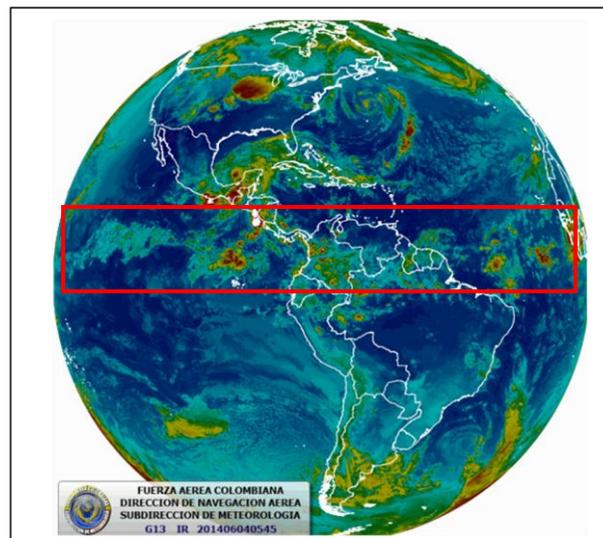


Figura 1: ZCIT junio 2014. Imagen del canal infrarrojo tomada del satélite GOES-13 para el 04 de junio de 2014 obtenida a través de SIMFAC

El Fenómeno El Niño-Southern Oscillation (ENOS) y la depresión tropical en la bahía de Panamá (baja anclada de Panamá) también afectan las condiciones meteorológicas de Colombia. Los vientos alisios del noreste interactúan con las características geográficas de la bahía de Panamá y la cordillera occidental del territorio colombiano, favorecen la circulación ciclónica característica de la baja anclada de Panamá, formando nubosidad de desarrollo vertical principalmente frente a la costa Pacífica de Colombia. Por otro lado, los vientos alisios del sureste al cruzar el ecuador tienden a curvarse gracias al efecto de la fuerza de Coriolis, tomando una componente del suroeste. Todo esto favorece la formación

---

de una región de baja presión e intensa convección que se manifiesta durante gran parte del año, ocasionando altos valores de precipitación (León et al., 2000). Uno de los puntos más lluviosos del planeta es el municipio de Lloró, en el departamento del Chocó, esta característica se le atribuye en gran parte al sistema sinóptico asociado con la baja anclada de Panamá.

## **2.2 La Visibilidad**

Se entiende como la distancia máxima a la cual un objeto negro de tamaño especificado puede ser visto y reconocido contra el horizonte por un observador normal a plena luz del día; o durante la noche, si la iluminación general fuese equivalente al nivel normal de luz de día (WMO, 1992). La visibilidad depende no sólo de la transparencia de la atmósfera, sino también de factores tales como la naturaleza del objeto y su contraste con el fondo, el tamaño del objeto y la iluminación (IDEAM, 2004).

En la Figura 2 se muestran los tipos de visibilidad. Se observa que el piloto de la aeronave tiene contacto visual con los árboles que están debajo de él a través de la neblina presente en la superficie, pero le sería más difícil ver la casa debido a que los rayos deberían atravesar mayor cantidad del aire oscurecido, de igual forma la persona ubicada en el suelo no podrá ver el bosque con facilidad.

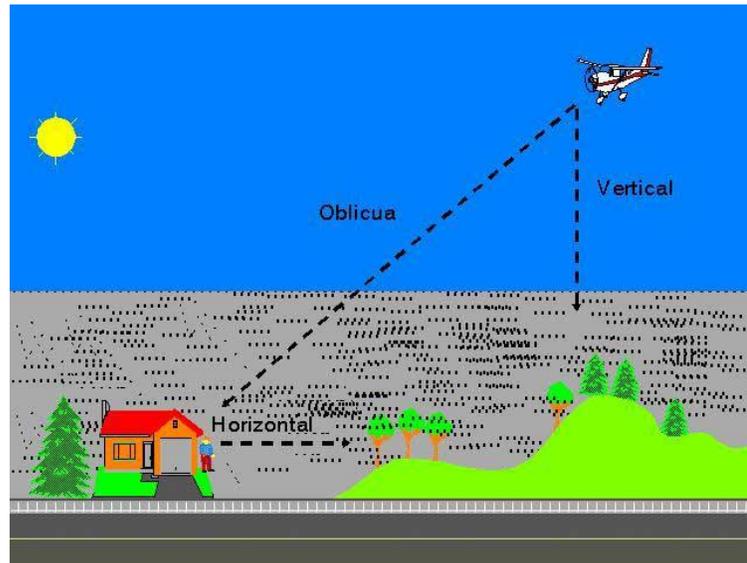


Figura 2: Tipos de visibilidad (Llorente, 2003)

### 2.3 Reglas de vuelo y condiciones meteorológicas

Las operaciones aéreas de un aeródromo están determinadas en un gran porcentaje por las condiciones meteorológicas reinantes, dichas condiciones en un instante dado pueden ser tan adversas para la navegación aérea, que se deben suspender todas las operaciones del aeródromo y declararlo cerrado con el fin de mantener los índices de seguridad (UAEAC, 2005). Los parámetros con los cuales el aeródromo se declara operando o cerrado se denominan “mínimos de utilización de aeródromo” y se definen como las limitaciones de un aeródromo, bien sea para despegue o para aterrizaje, corrientemente expresadas en términos de visibilidad o de alcance visual en la pista y de las condiciones de nubosidad (OACI, 1991).

Estos mínimos se definen de acuerdo a la infraestructura del aeropuerto, la topografía y el tipo de reglas de vuelo que se están realizando ya sean de operación visual o por instrumentos y están determinadas por la autoridad aeronáutica en cada país (OACI, 2004b).

---

La Organización de la Aviación Civil Internacional (OACI) estableció dos conjuntos de reglas para efectuar vuelos de acuerdo con las condiciones meteorológicas: Uno de estos conjuntos de normas se denomina Reglas de Vuelo Visual (VFR) el cual se realiza bajo Condiciones Meteorológicas de Vuelo Visual (VMC). Esto implica que en un aeródromo, dentro de una zona de control y sus inmediaciones, no se despegará ni se aterrizará, ni se entrará en la zona de tránsito de aeródromo o en el circuito de tránsito de dicho aeródromo si el techo de nubes es inferior a 450 m (1500 pies) o si la visibilidad en tierra es inferior a 5000 m, a menos que la autoridad aeronáutica del país defina otros parámetros (OACI, 2000).

El segundo conjunto de reglas se denomina Reglas de Vuelo por Instrumentos (IFR) y se sigue bajo Condiciones Meteorológicas de Vuelo por Instrumentos (IMC) que son las condiciones meteorológicas expresadas en términos de visibilidad, distancia desde las nubes y techo de nubes, inferiores a los mínimos especificados para las condiciones meteorológicas de vuelo visual (OACI, 1991). Las reglas IFR se deben realizar con unos equipos especiales de navegación, que la aeronave debe tener instalados a bordo.

#### **2.4 Fenómenos meteorológicos adversos para la operación de un aeródromo**

Se consideran fenómenos meteorológicos adversos para la operación de un aeródromo los siguientes:

De acuerdo a OACI, 2004 los fenómenos que reducen la visibilidad en la pista del aeródromo o en sus inmediaciones pero no a una distancia superior a 8 km aproximadamente desde el perímetro del aeródromo son llamados fenómenos meteorológicos de tiempo presente, los cuales pueden ser de:

- Oscurecimiento: Niebla (FG), neblina (BR). Bancos aislados de niebla (BCFG): Bancos aislados de niebla dispersos por el aeródromo.

Niebla en la proximidad (VCFG): Se reporta niebla en la proximidad o en las vecindades (VCFG), cuando el fenómeno se presenta a una distancia no mayor a 8 km tomando como referencia el punto medio de la pista.

Niebla parcial (PRFG): Gran parte del aeródromo cubierto por niebla mientras el resto está despejado.

- Precipitación: Llovizna (DZ), lluvia (RA), nieve (SN), cinarra (SG), hielo granulado (PL), cristales de hielo (IC), granizo (GR), granizo menudo (GS).
- Oscurecimiento por litometeoros: Arena (SA), polvo (DU), calima o bruma (HZ), humo (FU), ceniza volcánica (VA).
- Otros fenómenos de tiempo presente son: Remolinos de polvo (PO), turbonada (SQ), nubes de embudo (Tornado o tromba marina) (FC), tempestad de polvo (DS), tempestad de arena (SS), tormenta (TS), chubasco (SH), engelamiento (FZ), ventisca alta (BL), ventisca baja (DR).

Otros tipos de fenómenos de tiempo presente se producen:

- Cuando la altura de la base de la capa de nubes más baja de extensión fragmentada (BKN) o cubierta (OVC) sea inferior a determinados valores.
- Cuando la dirección y la velocidad del viento estén dentro de una determinada gama de valores que impida la navegación aérea. Estos valores dependen de la orientación, ancho y largo de la pista, los tipos de aeronaves que operen en el aeródromo y el equipo instalado para medir las variaciones del viento tanto en la horizontal como en la vertical. Además, cuando se produce la combinación de dos o más elementos nombrados anteriormente.

La decisión de cerrar un aeródromo por condiciones meteorológicas está basada en los reportes METAR y SPECI. La generación de estos reportes son responsabilidad de cada aeródromo. El METAR es el nombre de la clave correspondiente a un informe meteorológico aeronáutico de rutina para la aviación. Los informes METAR de un aeropuerto se difunden a intervalos de una hora de acuerdo a lo que haya establecido la autoridad aeronáutica de cada país. El SPECI es el informe de un aeropuerto sobre cambios meteorológicos significativos para la seguridad aérea que hayan ocurrido y pueden difundirse en cualquier momento si se cumplen determinados criterios.

Tanto el reporte METAR como el SPECI presentan la misma forma de clave (OACI, 2004a), la cual reúne las variables meteorológicas de mayor relevancia para la aeronavegación como son: dirección e intensidad del viento en superficie, visibilidad, techo de nubes en capas bajas, medias o altas, temperatura, punto de rocío, presión atmosférica. Estos reportes incluyen comentarios adicionales si se requieren.

Entre los vuelos con reglas VFR e IFR existe otra clase de vuelos llamados VFR especiales los cuales se definen como vuelos VFR al que el control de tránsito aéreo ha concedido autorización para que se realice dentro de una zona de control en condiciones meteorológicas inferiores a las VMC (OACI, 2000). Las condiciones mínimas de operación del EEC son: 500 pies de techo y 1500 metros de visibilidad y los mínimos para la regla IMC son 830 pies de techo y 1200 pies de visibilidad (FAC, 2013).

## **2.5 Descripción de variables y reportes meteorológicos**

Los elementos meteorológicos que se describen a continuación forman parte de las variables en superficie tenidas en cuenta para el análisis de las condiciones a escala local del EEC.

### **2.5.1 Temperatura del aire en superficie**

La temperatura es una variable termodinámica que determina el estado de los cuerpos y es proporcional a la energía cinética media interna de los mismos (Lexis 22, 1982).

De lo que se deriva el concepto de calor, el cual se refiere al flujo de energía entre dos cuerpos a diferentes temperaturas.

A causa que la mayoría de la energía de la atmósfera se origina en la radiación procedente del sol, la temperatura del aire en superficie medida a máximo 2 m sobre el nivel del suelo (OMM, 2000) es determinante en el balance energético y por lo tanto en la formación de niebla y neblina.

### **2.5.2 Temperatura de punto de rocío**

Para el análisis de la niebla y neblina, el punto de rocío es una variable de interés para lograr determinar y confirmar la ocurrencia de estos fenómenos, debido a que es la temperatura a la cual el aire se satura por enfriamiento, al suceder este enfriamiento se observa condensación. Por ejemplo, a medida que el aire alrededor del vidrio de un vaso de agua helada se enfría hasta el punto de rocío, se forman gotas de agua en el exterior del vaso (condensación), o cuando con nuestro aliento empañamos un espejo. El punto de rocío es una de las variables más confiables para determinar el contenido de humedad presente en la atmósfera

La temperatura del punto de rocío siempre es igual o menor, pero nunca de mayor valor que la temperatura del aire.

### **2.5.3**

#### **2.5.4 Humedad relativa**

Es una variable que asigna medida a la cantidad de vapor de agua contenido en un volumen de aire en términos meteorológicos, define la relación que hay entre la masa de vapor de agua contenida en un volumen determinado de aire y la que se podría contener en el mismo volumen si estuviese saturado a la misma temperatura; dando como resultado un porcentaje. El valor de la humedad relativa puede variar incluso si el contenido de agua permanece constante, debido a cambios en la temperatura (Eslava, 1994). El vapor de agua es uno de los factores que influyen en la formación de nubes.

#### **2.5.5 Viento**

El viento es el movimiento de las masas de aire de forma horizontal. El viento es un vector, de modo que tiene dirección, sentido e intensidad. Meteorológicamente la dirección y sentido del vector del viento se reporta haciendo referencia al punto cardinal o, al ángulo en grados, medido a partir del norte geográfico en sentido de las manecillas del reloj (azimut), de donde sopla (Jiménez, 2004).

La intensidad o rapidez del viento depende directamente de la diferencia de presión y es medido por instrumentos como el anemómetro reportándolo en nudos, kilómetros por hora o metros por segundo. Cuando la intensidad del viento es menor que dos nudos, los anemómetros son poco sensibles, conociéndose como viento en calma (OMM, 1991)

## **2.5.6 Reportes METAR-SPECI**

### **2.5.6.1 METAR**

Los reportes METAR son reportes meteorológicos aeronáuticos que, de acuerdo con el *Anexo 3, 2013* de la Organización de la Aviación Civil Internacional (OACI), se generarán en los aeródromos mediante observaciones durante las 24 horas de cada día, a menos, que se acuerde otra cosa entre la autoridad meteorológica, que en el caso de Colombia es la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (UAEAC). Tales observaciones se harán a intervalos de una hora o, si se determinara por acuerdo regional de navegación aérea, a intervalos de media hora. En el caso del EEC se realizan observaciones horarias. La serie de reportes meteorológicos del tipo METAR del aeródromo EEC utilizados para este estudio corresponden al período del 01 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011, y fueron obtenidos de la base de datos del SIMFAC.

Los reportes METAR son expedidos para su difusión a otros aeródromos fuera del aeródromo del cual se originan, esto para que las aeronaves que lleguen o salgan del mismo conozcan las condiciones meteorológicas en las cuales se encuentra el aeródromo.

Los reportes METAR utilizados en este estudio contienen la siguiente información:

- Identificador del tipo de informe.
- Designador OACI del aeródromo (SKTQ)
- Día de elaboración del reporte.
- Hora de observación la cual corresponde al Tiempo Universal Coordinado (UTC).
- Dirección (grados) y velocidad (nudos) del viento en superficie y sus respectivas variaciones cuando proceda;

- Visibilidad horizontal (m) reportada de acuerdo con la observación del controlador aéreo y se reporta el alcance visual en la pista (m) cuando el aeródromo cuenta con instrumentos de medición como el alcance visual de pista o por sus siglas en inglés Runway Visual Range (RVR).
- Fenómenos de tiempo presente, cuando se presenten.
- Cantidad de nubes medida en octas, tipo de nubes. En caso de presentarse nubes de tipo cumulonimbus (CB) o cúmulos en forma de torre (TCU) se debe reportar y especificar de forma mandatoria. La altura de la base de nubes se mide en unidades de pies (ft).
- Temperatura del aire en grados Celsius (°C) y temperatura del punto de rocío en grados Celsius (°C).
- Presión atmosférica en pulgadas de mercurio (inHg).
- Información suplementaria que se disponga como: fenómenos de tiempo presente, cizalladura del viento y estado de la pista

A continuación se muestra un METAR del EEC a modo de ejemplo:

SKTQ 152100Z 21005KT 8000 +RA BKN040 28/23 A2976 (SIMFAC, 2009)

### **2.5.6.2 SPECI**

Los reportes meteorológicos especiales (SPECI) contienen la misma estructura y codificación de un METAR, la única diferencia es que los reportes de tipo SPECI se pueden generar de acuerdo a algunas de las siguientes condiciones:

- a) Todo aumento de temperatura de 2 °C o más, con respecto al último reporte, u otro valor de umbral convenido con las autoridades meteorológicas.

- b) La información suplementaria de que se disponga respecto a la ocurrencia de condiciones meteorológicas significativas en las áreas de aproximación y ascenso inicial de las aeronaves, tales como aviones Hércules, Cassa y helicópteros entre otros.
- c) Cuando la dirección media del viento en la superficie haya cambiado en 60° o más respecto a la indicada en el último reporte, siendo la intensidad media de 10 kt (5 m/s) o más medida antes o después del cambio.
- d) Cuando la velocidad media del viento en la superficie haya cambiado en 10 kt (5 m/s) o más con respecto a la indicada en el último informe.
- e) Cuando la variación respecto a la velocidad media del viento en la superficie (ráfaga) haya cambiado en 10 kt (5m/s) o más con respecto a la indicada en el último informe, siendo de 15 kt (7,5 m/s) o más la velocidad media antes o después del cambio.
- f) Cuando irrumpa, cese o cambie de intensidad cualquiera de los siguientes fenómenos meteorológicos:
- Precipitación engelante.
  - Precipitación (incluyendo chubascos) moderada o fuerte.
  - Tormentas (con precipitación).
- g) Cuando irrumpa o cese cualquiera de los siguientes fenómenos :
- Niebla engelante
  - Tormentas (sin precipitación)
- h) Cuando la cantidad de nubes de una capa de nubes por debajo de los 450 metros (1500 pies) cambie:
- De disperso (SCT) o menos a fragmentado (BKN) o cubierto (OVC) o;
  - De BKN u OVC a SCT o menos.

- 
- i) Cuando la altura de la base de la capa de nubes más baja de extensión BKN u OVC esté descendiendo y pase por uno o más de los siguientes valores:
- 30, 60, 150, ó 300 metros (100, 200, 500 ó 1000 pies)
  - 450 metros (1500 pies), en los casos en que un número importante de vuelos se realice conforme a las reglas de vuelo visual.
- j) Cuando la visibilidad esté empeorando o disminuyendo y pase por uno o más de los siguientes valores:
- 800, 1500 ó 3000 metros
  
  - 5000 metros, cuando haya una cantidad considerable de vuelos que operen por las reglas de vuelo visual.

A continuación se muestra un reporte SPECI del EEC a modo de ejemplo:

```
SKTQ 051125Z 07004KT 2000 DZ OVC020 20/20 A2988 APLSM (SIMFAC, 2009)
```

## **2.6 Modelo WRF 2.1.1**

El Weather Research and Forecasting (WRF) es un modelo numérico atmosférico de mesoescala, euleriano, no hidrostático, considera las condiciones geográficas en situ como la topografía, la vegetación, las superficies de agua y los suelos. Este modelo es empleado para realizar cambios de escala en el modelamiento del tiempo atmosférico y del clima, tomando como referencia una escala global hacia escalas menores con áreas limitadas, herramienta práctica para derivar variables meteorológicas necesarias para el pronóstico de niebla o neblina.

En el año 2006 se implementó el SIMFAC como sistema principal de información meteorológica, se instaló dentro de este sistema en el mismo año, el modelo

WRF con el núcleo dinámico ARW (Advanced Research WRF) en su versión 2.1.1, para que operara con el objetivo principal de generar pronósticos del tiempo dos veces por día de manera operacional.

### **2.6.1 Módulos WRF 2.1.1**

El modelo consta de tres módulos principales:

#### **2.6.1.1 WRFSI**

Este módulo define la rejilla tridimensional específica la extensión del dominio espacial, su ubicación geográfica, la resolución espacial, el número y la ubicación de los niveles en la vertical.

Por ser un modelo regional, se requieren datos globales que definen las condiciones de frontera en los bordes de la rejilla tridimensional (definida por el dominio espacial) y las condiciones iniciales dentro de la rejilla tridimensional. Estos datos globales son obtenidos del modelo de circulación atmosférica global GFS (Global Forecast System). Para indicar las condiciones del terreno se deben introducir datos de topografía, uso del suelo y suelo. Estos datos son estáticos ya que generalmente se procesan una sola vez durante la simulación. Para esta versión 2.1.1 se obtienen datos del de topografía y uso del suelo del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y del National Center for Atmospheric Research (NCAR).

Los datos del modelo GFS se dividen en: 1) Datos Iniciales, los cuales alimentan el volumen de la rejilla tridimensional regional del WRF con las condiciones atmosféricas presentes en el momento inicial de la simulación y 2) Datos de frontera, los que definen las condiciones geográficas presentes durante todo el período a simular.

El WRF 2.1.1 tiene configurados tres dominios espaciales. El primero tiene una resolución (distancias entre celdas de rejilla) de 45 km x 45 km, el segundo de 15 km x 15 km (Figura 3), utilizado para este estudio y el tercero de 5 km x 5 km (Manual de Usuario SIMFAC, 2009)



Figura 3: Dominio # 2 de 15 km X 15 km las coordenadas de los puntos en las esquinas inferior izquierda y superior derecha son:-4.567352 S y -81.48895 W y 13.95193 N y -65.15788 W

Fuente: SIMFAC, 2011

### 2.6.1.2 3DVAR

Para mejorar las condiciones iniciales con más detalles y en vez utilizar solamente los datos iniciales del modelo global, se puede alimentar el modelo con datos observados a la hora para la cual se inicia la simulación.

Mediante este módulo se interpolan datos de observación meteorológica sobre los puntos de la grilla del modelo WRF. Los datos iniciales provenientes de un modelo global están en una resolución más baja de la que usualmente se usa en un modelo regional. Por lo tanto estos datos modelados no presentan las condiciones locales en el área regional con mucho detalle. Al introducir datos de observación a la rejilla del modelo regional se enriquecen los datos iniciales con información local (Manual WRF, 2008).

### **2.6.1.3 WRF**

El módulo con el mismo nombre del sistema total realiza los cálculos numéricos para el pronóstico mediante un gran número de esquemas que describen los múltiples sistemas atmosféricos. Mientras los módulos anteriores sirven para preparar los datos de entrada, el módulo WRF con base en los datos de entrada realiza la simulación. Al configurar este módulo se da la posibilidad de elegir entre diferentes parametrizaciones para las simulaciones de la atmósfera y otros procesos relacionados.

La mayoría de modelos mesoescalares usan distintas parametrizaciones para resolver aquellos fenómenos de escala espacial inferior a la resolución del modelo, encontramos algunas como: de cúmulos, microfísica, capa límite, etc.

## **Capítulo 3**

### **3. Análisis y resultados**

#### **3.1 Área de pronóstico y mediciones disponibles**

El aeródromo “Ernesto Esguerra Cubides” (EEC) ubicado en los 00° 44’ latitud norte y 75° 13’ longitud oeste y a una elevación de 178 m (585 pies) sobre el nivel medio del mar (FAC, 2014). El aeródromo EEC recibió su nombre en 1937, en memoria del señor Capitán Ernesto Esguerra Cubides pionero de la aviación colombiana. Es un aeródromo que brinda apoyo y seguridad a los departamentos del suroccidente del territorio colombiano. Se ubica a 2 km del casco urbano del municipio de Solano (Caquetá).

Se utilizaron reportes METAR y SPECI del aeródromo EEC para el período del 01 de enero de 2009 al 31 de enero de 2011, datos de la caja de rejilla correspondiente al aeródromo proveniente de simulaciones del modelo WRF 2.1.1 para este mismo período de tiempo iniciadas a las 00 UTC (19:00 HLC), imágenes satelitales de los días previos y posteriores a los casos de estudio y radiosondeos de los días de estudio.

Los datos simulados por el modelo WRF 2.1.1, fueron utilizados con condiciones iniciales y de frontera de las simulaciones del modelo GFS correspondiente a la hora 00:00 UTC (19:00 HLC) y 12:00 UTC (07:00 HLC) y tienen una resolución espacial de 1° de latitud x 1° de longitud.

### 3.1.1.1 Análisis de reportes METAR Y SPECI

#### 3.1.1.1 Temperatura del aire y temperatura del punto de rocío de los reportes METAR y SPECI

En la Tabla 1 se muestran las variables meteorológicas que se miden in situ y que se tienen en cuenta en este estudio para el análisis de superficie y de escala local para el diagnóstico de niebla o neblina.

Tabla 1. Variables de reportes METAR y SPECI utilizadas para el análisis de las condiciones de escala local. Las variables marcadas con \* fueron medidas por una Estación Meteorológica Automática (EMA).

Nombre de la variable	Tipo de evaluación
Intensidad del viento (*)	Horaria
Dirección del viento (*)	Horaria
Niebla y Neblina	Horaria
Techo de nubes	Horaria
Temperatura (*)	Horaria
Punto de rocío (*)	Horaria

La Figura 4 muestra el ciclo anual de la temperatura del aire medida a 2 metros (T2). Allí se muestra un comportamiento casi constante de la T2. En la temperatura máxima media se observan dos valores máximos, uno en marzo de aproximadamente 35,67°C y otro en septiembre con un valor de 34,67°C. En la temperatura media mínima se observa el mismo valor mínimo en los meses de septiembre y octubre de 16 °C. Las variaciones de las T2 mínima, media y máxima, son en general pequeñas, de modo que en el aeródromo EEC, las T2 no muestran un ciclo anual marcado, la T2 mínima fluctúa alrededor de los 18°C, la T2 media fluctúa alrededor de los 25°C y la T2 máxima alrededor de los 36°C. Las fluctuaciones de las tres T2 no exceden los 5°C.

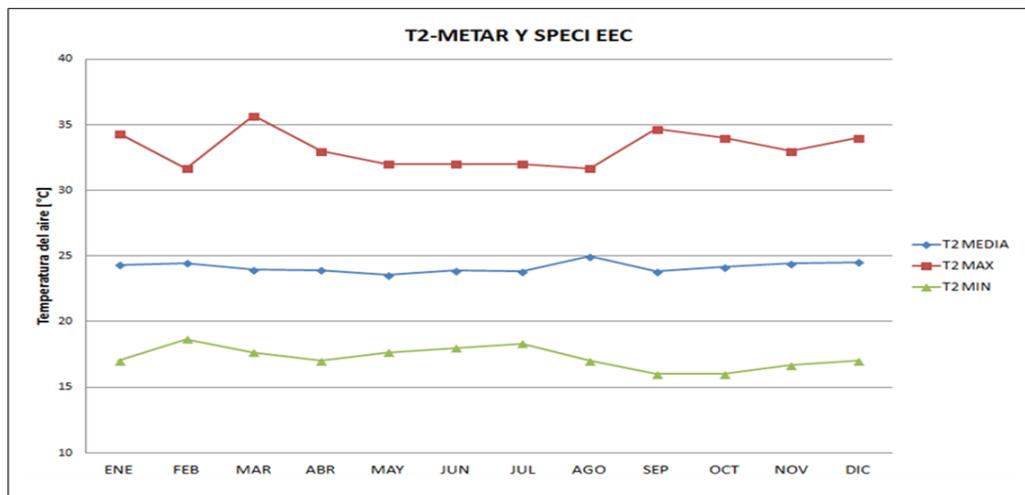


Figura 4: Promedios mensuales de la T2 mínima, media y máxima en el aeródromo EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011

La figura 5 muestra el ciclo anual de la temperatura del punto de rocío medida a 2 metros (DP2). Allí se muestra un comportamiento casi constante del DP2 medio.

En la temperatura máxima del DP2 medio, se observa un valor máximo en febrero de aproximadamente 28,33°C. En la temperatura media mínima se observa un valor mínimo de aproximadamente 13,67°C en el mes de marzo.

Las variaciones del DP2 mínimo, medio y máximo, son en general pequeñas, de modo que en el aeródromo EEC, los DP2 no muestran un ciclo anual marcado, el DP2 mínimo fluctúa entre los 18,0°C y los 13,9°C, el DP2 medio fluctúa entre los 20,2°C y los 22,1°C y el DP2 máximo entre los 28,2°C y los 24,1°C.

La temperatura del punto de rocío reportada en los informes METAR y SPECI, es un buen indicativo para el pronóstico de niebla o neblina ya que en cuanto más cerca esté de la temperatura del aire actual más próxima estará la masa de aire de la saturación indicando que la humedad relativa está cercana al 100%.

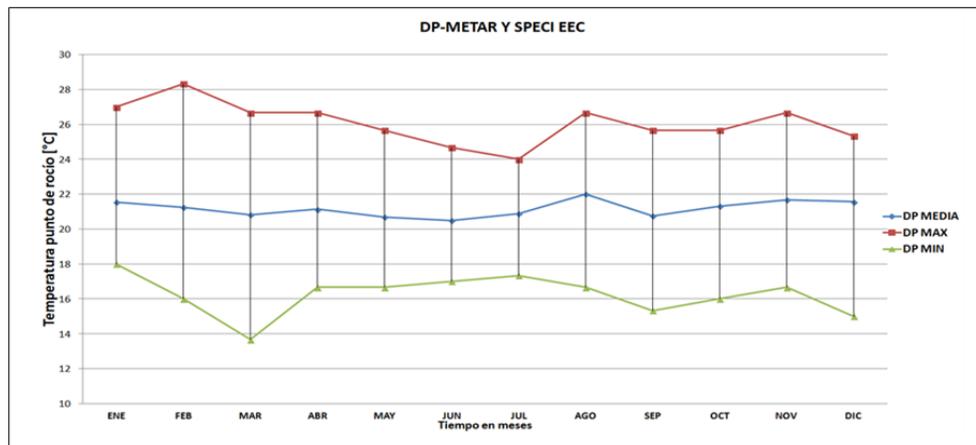


Figura 5: Valores medios de la temperatura del punto de rocío en el aeródromo EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011

Una dificultad encontrada durante el análisis de los reportes METAR y SPECI se debió a que entre los años 2009 y 2011 la Estación Meteorológica Automática (EMA) instalada en el EEC operaba intermitentemente por fallas en la alimentación eléctrica, de modo que se perdió la información de T2 y del DP2. Ya

que la información plasmada en los reportes METAR y SPECI debe cumplir con ciertos requerimientos aeronáuticos (OACI, 2006), debe ser generada por instrumentos de medición que se encuentren en las cabeceras de las pistas y/o en el centro de la misma donde esta información es representativa para las cabeceras y procedimientos de despeje y aproximación. En este trabajo no se realizó relleno de datos en ninguna de las series de tiempo de T2 y DP2 y se trabajó con los datos disponibles.

La Figura 6 muestra los datos faltantes de T2 y DP2 en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011. En el año 2010 los meses de enero a agosto y en el año 2011 del mes de mayo a diciembre presentan la mayor cantidad de datos faltantes, aproximadamente un 90%.

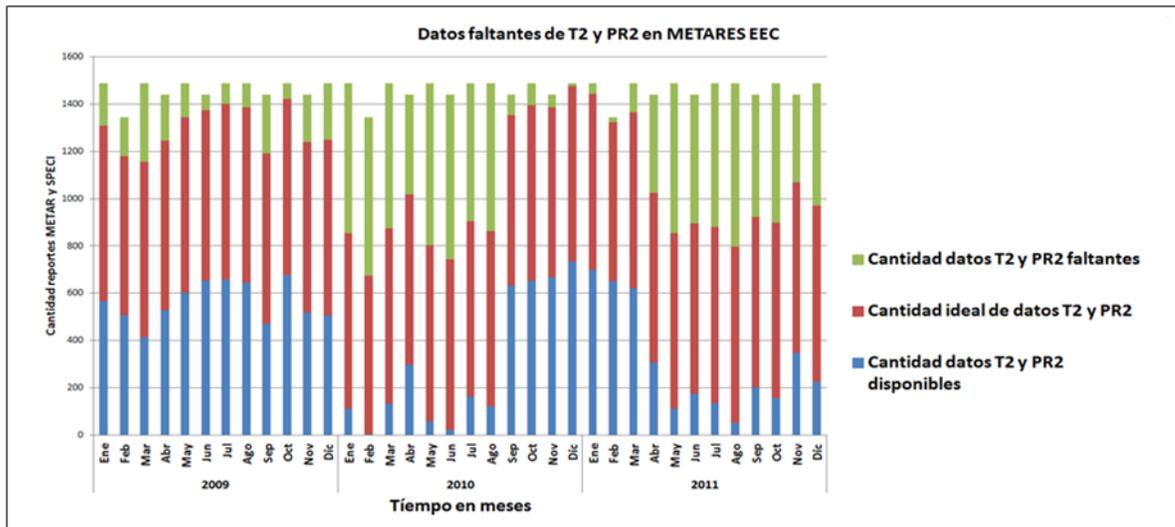


Figura 6: Datos faltantes de T2 y DP2 en los METAR del EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011.

Para el pronóstico de niebla o neblina en el EEC, la temperatura cumple un papel de gran importancia. De acuerdo a la comparación de los datos disponibles de temperatura del aire de los reportes METAR-SPECI y a los datos de T2 simulados

por el modelo WRF 2.1.1 (Figura 7), se puede afirmar que el modelo sobrestima la temperatura observada en superficie entre 2°C y 3°C, lo que dificulta observar las disminuciones de temperatura previas a la ocurrencia del fenómeno.

En el rango de enero a agosto del 2010, los datos de T2 del WRF están por debajo de la temperatura de los reportes METAR y SPECI. Esto puede deberse a que en este lapso de tiempo se perdió gran parte de los datos de temperatura en superficie medidos por la EMA. De igual forma de marzo a agosto de 2011 hubo pérdida significativa de información de temperatura del aire observada en superficie.

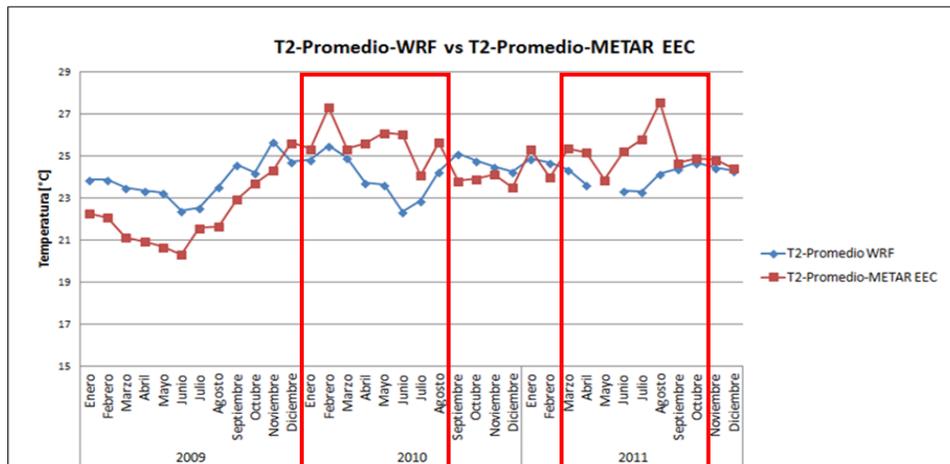


Figura 7: Valores mensuales promedio de T2 provenientes del modelo WRF 2.1.1 y de los reportes METAR y SPECI para el aeródromo EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011.

Por problemas de ejecución del modelo en mayo de 2011 no se generaron las respectivas simulaciones, por esta razón no se cuenta con datos para este mes (SIMFAC, 2011).

### 3.1.1.2 Dirección e intensidad del viento en los reportes METAR y SPECI

De los 23605 reportes METAR y SPECI disponibles por el período de tiempo del 01 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011, 17248 indican viento en calma, esto es un 73% del total, mostrando las intensidades de viento en calma, representadas con direcciones del norte. Los números dentro de la gráfica indican la cantidad de datos de dirección del viento.

La Tabla 2 presenta la cantidad de datos de dirección del viento con respecto a los diferentes cuadrantes, confirmando la presencia constante de viento en calma sobre el aeródromo EEC en la serie de tiempo analizada.

Tabla 2: Datos de Dirección del viento de los reportes METAR y SPECI en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011.

Dirección del Viento	Cantidad Reportes
viento en calma	17248
NNE	484
NE	385
ENE	871
E	622
ESE	197
SE	116
SSE	256
S	575
SSW	308
SW	248
WSW	871
W	395
WNW	293
NW	103
NNW	148

La condición de viento en calma se presentó en 5766 reportes METAR-SPECI de los 6507 METAR-SPECI en los que se presentaron los fenómenos de niebla y neblina. Por otra parte un 3% del total reportaron intensidades del viento superiores a 2 nudos. Dentro de este porcentaje de reportes de viento en calma se encuentran los eventos de niebla y neblina ocurridos en el EEC, encontrando como resultado que esta condición es esencial para que facilite la ocurrencia de los fenómenos de niebla y neblina.

### **3.2 Ocurrencia de eventos relacionados con niebla y neblina**

Los reportes de tipo METAR para el período de estudio (2009-2011) en el aeródromo EEC fueron emitidos durante las 24 horas del día con intervalos de una hora y los del tipo SPECI cuando se presentaron variaciones significativas en las condiciones meteorológicas.

De los 23.605 METAR y SPECI reportados para el EEC del 2009 al 2011 y almacenados en la base de datos del SIMFAC, se extrajeron los que reportaban los fenómenos de niebla o neblina (FG, BR, VCFG, BCFG) y se determinaron los días y horas en las que se presentaron estos fenómenos.

A partir de esta selección, se generaron histogramas en los cuales se muestra el número de eventos con los fenómenos de interés. Previo a esta selección, se escogió la información de los reportes METAR y SPECI que reportaron cierres y restricciones de operación del aeródromo por condiciones meteorológicas. Se encontró que los fenómenos de tiempo presente que con más frecuencia produjeron el cierre del EEC fueron niebla y neblina.

En la Figura 8, se muestra el acumulado anual de reportes por horas comunicando la presencia del fenómeno de niebla (FG). Se concluyó que las

horas en las que se producen más de 20 reportes están entre las 07:00 UTC (02:00 HLC) y las 12 UTC (07:00 HLC).

El año en el cual se presentó la mayor cantidad de reportes de niebla fue el 2010. Esto se tendrá en cuenta más adelante para seleccionar los casos de estudio. Se tendrán en cuenta primordialmente los fenómenos de niebla ya que generan cierres y restringen la operación del EEC pues hacen que la visibilidad esté por debajo de 1000 m y nubosidad por debajo de 500 pies de altura o ambas condiciones.

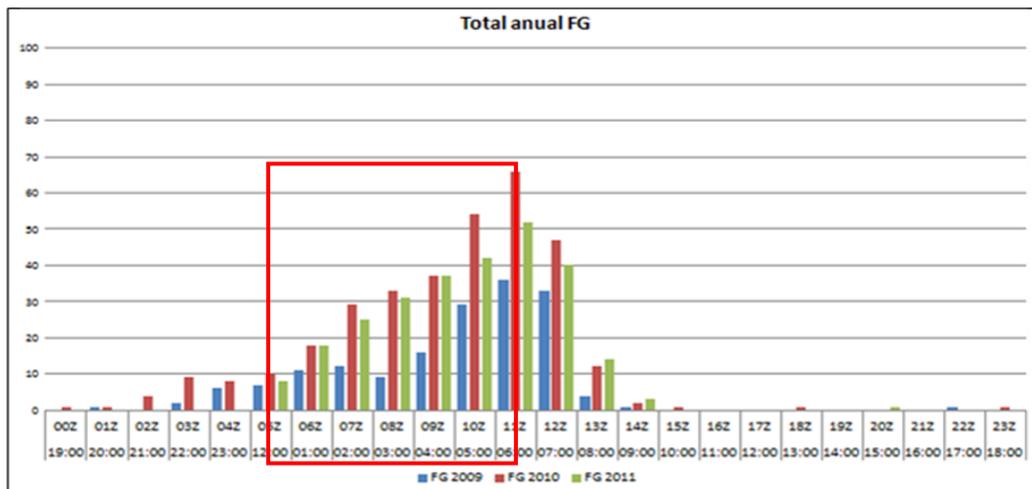


Figura 8: Número de reportes METAR y SPECI que reportaron, en cada hora del día, el fenómeno niebla (FG) en el aeródromo EEC en el período 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011.

La franja horaria de mayor ocurrencia del fenómeno de neblina, de 07:00 UTC (02:00 HLC a 12:00 UTC (07:00 HLC), es un indicativo para el personal que planea las operaciones aéreas lo tenga en cuenta y no programe vuelos en este lapso de tiempo. Las operaciones aéreas que inician desde Bogotá, por ejemplo, hacia el EEC pueden ser ejecutadas luego de las 12:00 UTC (07:00 HLC).

La niebla se presenta durante los dos semestres del año en el EEC pero con mayor frecuencia el segundo semestre (julio a diciembre) como se observa en la Figura 9. Para el período 2009 a 2011 los meses con mayor número de horas con neblina fueron abril, julio, septiembre y diciembre. Por esto se toma como caso de estudio un evento del mes de julio del 2010.

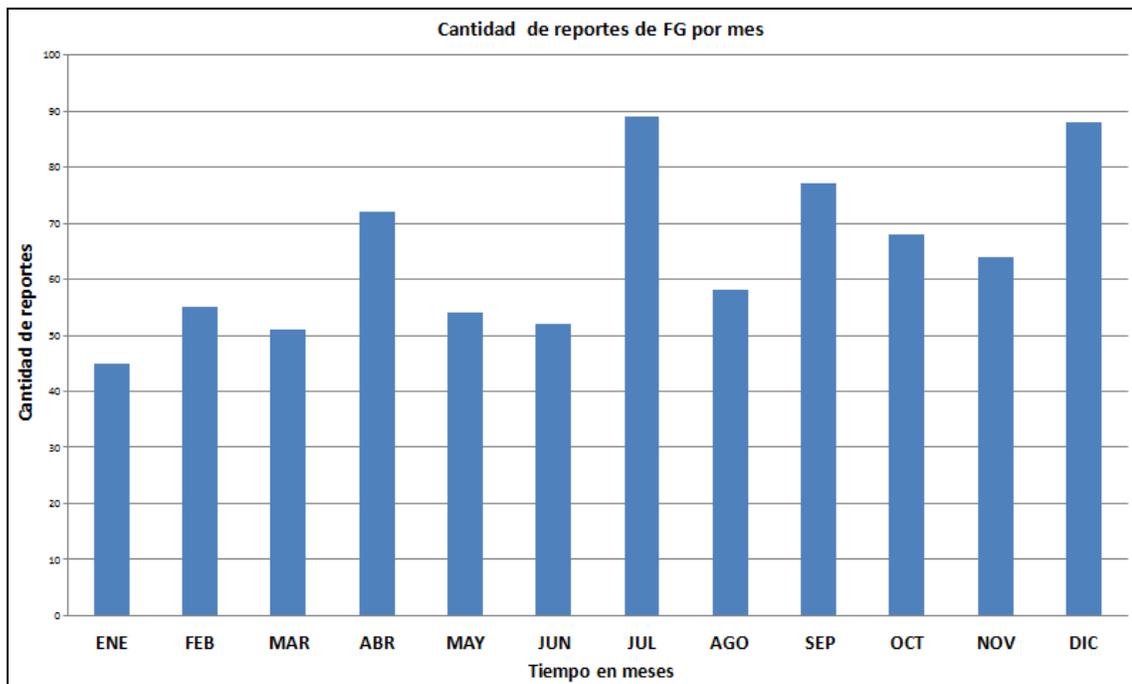


Figura 9: Número de reportes METAR y SPECI que reportaron, en cada mes del año, el fenómeno de niebla (FG) en el EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011.

La niebla produjo el cierre o restricción del EEC 601 veces, siendo un riesgo latente para el correcto desarrollo de las operaciones aéreas y produciendo demoras en el itinerarios de los vuelos programados.

La neblina, reportada como BR (brouillard en francés) en los reportes METAR y SPECI, ocurrió en mayor cantidad en el año 2010 (Figura 10). En el año 2010 se produjo La Niña.

El año de menor cantidad de reportes fue el 2009, año El Niño. Se aprecian reportes de este fenómeno en casi todas las horas del día durante los 3 años de estudio, pero las horas en que más reportes se producen (más de 20 reportes) están entre las 04:00 UTC (23:00 HLC) y las 15 UTC (10:00 HLC). La neblina restringe la operación del EEC por la disminución de la visibilidad y el techo de nubes, sin embargo las restricciones son menos severas que las debidas a niebla. Esto debido a las características de cada fenómeno y que fueron descritas antes.

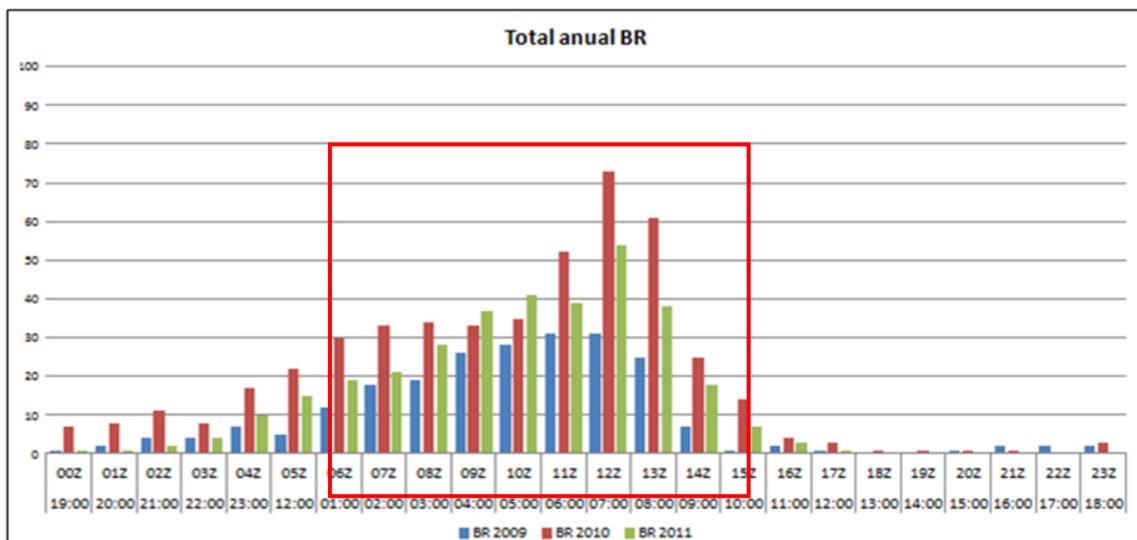


Figura 10 Número de reportes METAR y SPECI que reportaron, por hora del día la presencia del fenómeno neblina (BR) en el aeródromo EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011.

Al igual que la niebla, la neblina se presenta durante todo el año en el aeródromo EEC pero con mayor frecuencia en el primer semestre (enero a junio), como se observa en la Figura 11. Para el período 2009 a 2011 los meses con mayor número de reportes de neblina fueron febrero, mayo, agosto, septiembre y diciembre. Los meses en los que se reportaron menos de 60 horas con neblina fueron julio, octubre y noviembre.

El fenómeno de neblina produjo un total de 558 horas entre cierres y restricciones del aeródromo EEC por deteriorar las condiciones meteorológicas y no permitir el desarrollo normal de las operaciones aéreas.

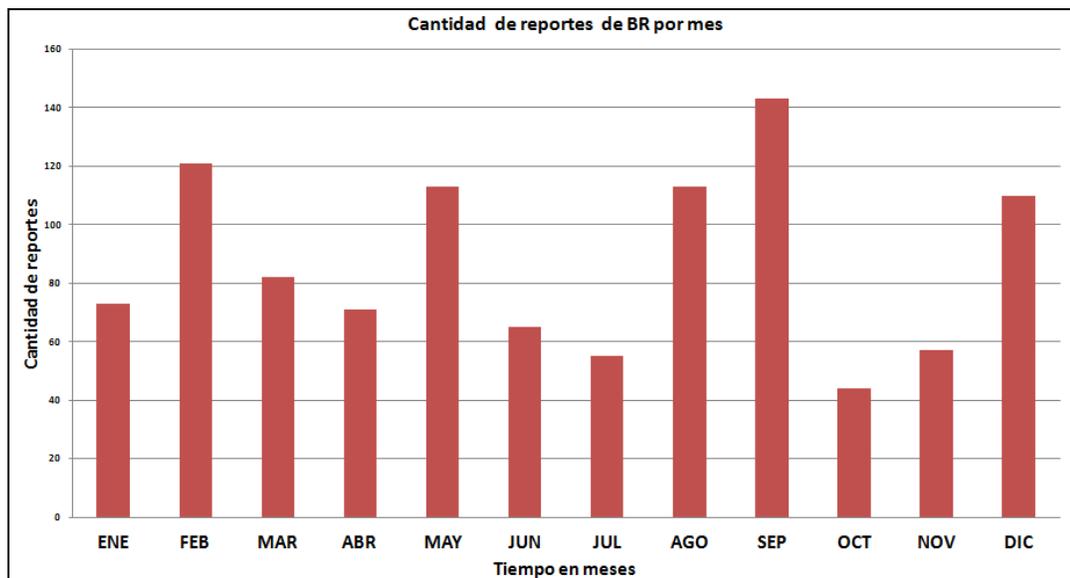


Figura11: Número de reportes METAR y SPECI que reportaron, en cada mes del año el fenómeno neblina (BR) en el EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011.

También se tomaron los reportes en los cuales se reportaron bancos o parches de niebla (BCFG), mostrando su ocurrencia horaria en la Figura 12. Cuando se produce este tipo de reportes, el funcionamiento del aeródromo no se ve afectado debido a que el fenómeno no se posiciona sobre la pista sino que se presenta en parches o porciones pequeñas aisladas y adyacentes al EEC. Debido al medio ambiente selvático en el que está inmerso el aeródromo, hay un alto contenido de humedad y esto favorece la ocurrencia de fenómeno. Las horas que presentan mayor frecuencia de ocurrencia de BCFG son desde las 04:00 UTC (23:00 HLC) hasta las 15:00 UTC (10:00 HLC). Al igual que para los fenómenos de niebla (FG) y neblina (BR), el 2009 (año El Niño) es el año que tuvo el menor número de

ocurrencias del fenómeno. En 2010 (año La Niña) es el año con predominio de reportes después de las 11:00 UTC (06:00 HLC) y el 2011 es el año con predominio de eventos que se dan antes de las 11:00 UTC (06:00 HLC).

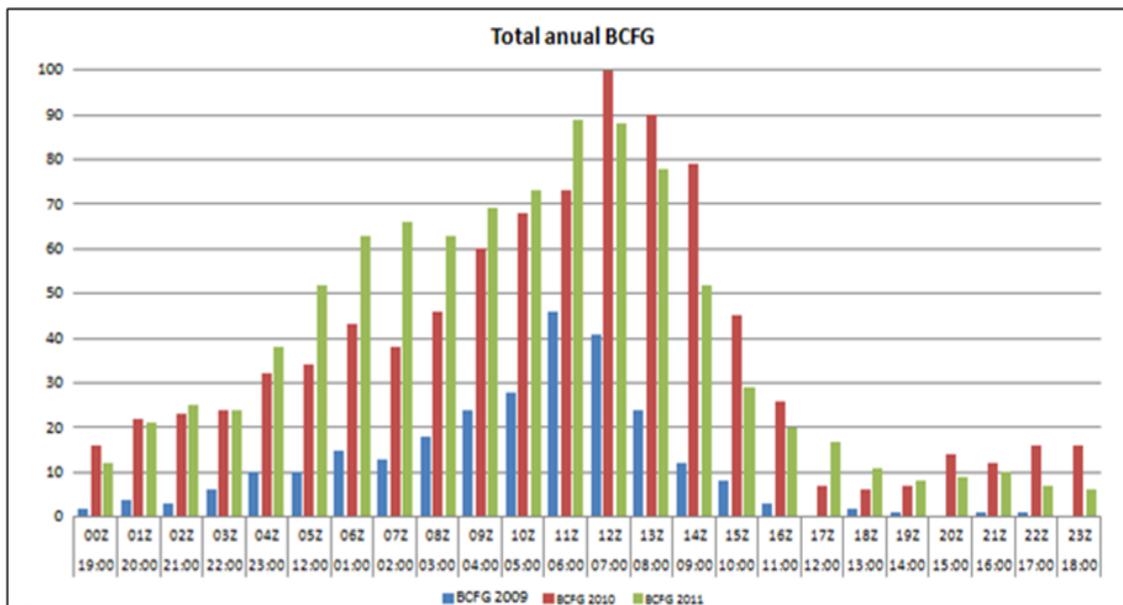


Figura 12: Número de reportes METAR y SPECI que reportaron, por hora del día la presencia del fenómeno niebla (BCFG) en el aeródromo EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011.

La Figura 13 muestra la ocurrencia mensual del fenómeno de bancos de niebla ocurridos en el EEC en el período del 01 de enero del 2009 al 31 de diciembre de 2011. Se identifica un comportamiento monomodal en el cual los meses de mayor presencia de este fenómeno son abril, junio y julio superando los 240 eventos. A diferencia de los fenómenos anteriormente descritos (FG, BR y VCFG) el fenómeno bancos de niebla es el que mayor cantidad de reportes (2099) presenta el lapso de estudio (2009-2011). Sin embargo, solamente en 70 ocasiones causaron el cierre de operaciones del EEC ya que redujeron el techo de nubes entre 300 pies (91 m) y 1000 pies (305 m).

Es importante aclarar que los bancos de niebla son fenómenos independientes al techo de nubes, se asocian a la visibilidad horizontal y el techo de nubes a la visibilidad vertical.

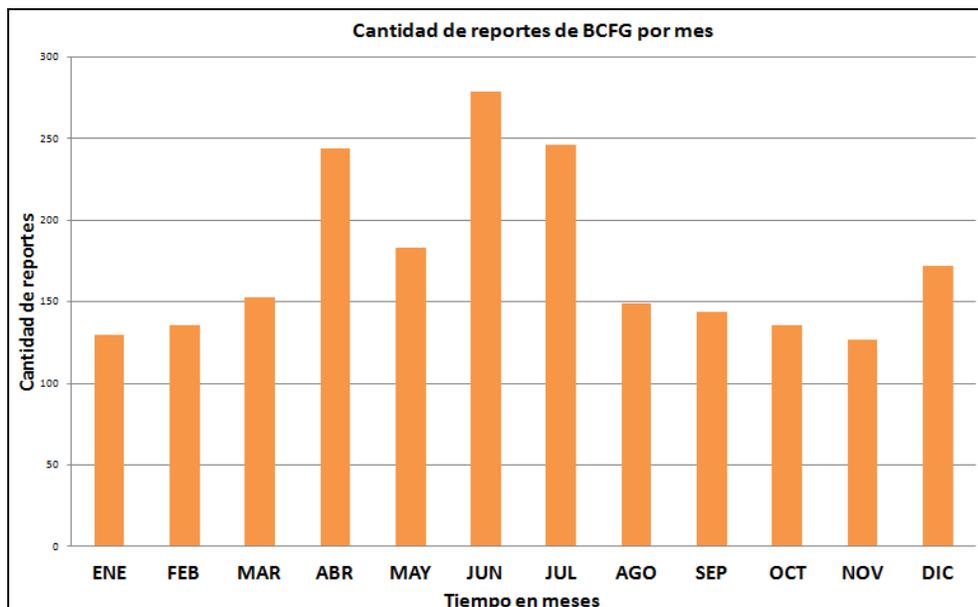


Figura 13: Número de reportes METAR y SPECI que reportaron, en cada mes del año el fenómeno bancos de niebla (BCFG) en el EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011.

La Figura 14 muestra la frecuencia con la que se reportó niebla en las proximidades o en las vecindades (VCFG) del EEC. En los tres años considerados todas las horas del día tuvieron al menos 4 reportes. Este comportamiento es distinto al de los demás fenómenos niebla y bancos de niebla, mostrado en las Figuras 8, 10 y 12. La ocurrencia de VCFG se dio con mayor frecuencia en el año 2009 y entre las 01:00 UTC (20:00 HLC) y las 16:00 UTC (11:00 HLC). Es importante aclarar que por la distancia a la que se presentan con respecto al EEC, los fenómenos VCFG no restringen la operación del aeródromo, pero su presencia debe ser tomada en cuenta por las tripulaciones al realizar los procedimientos de aterrizaje.

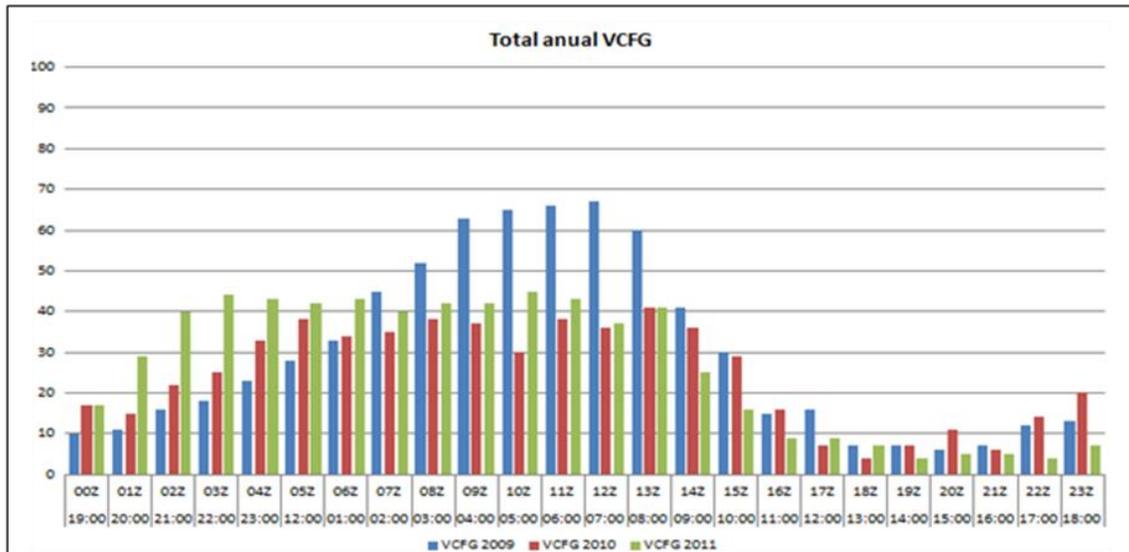


Figura 14: Número de reportes METAR y SPECI que reportaron, por hora del día la presencia del fenómeno niebla en las vecindades (VCFG) en el aeródromo EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011.

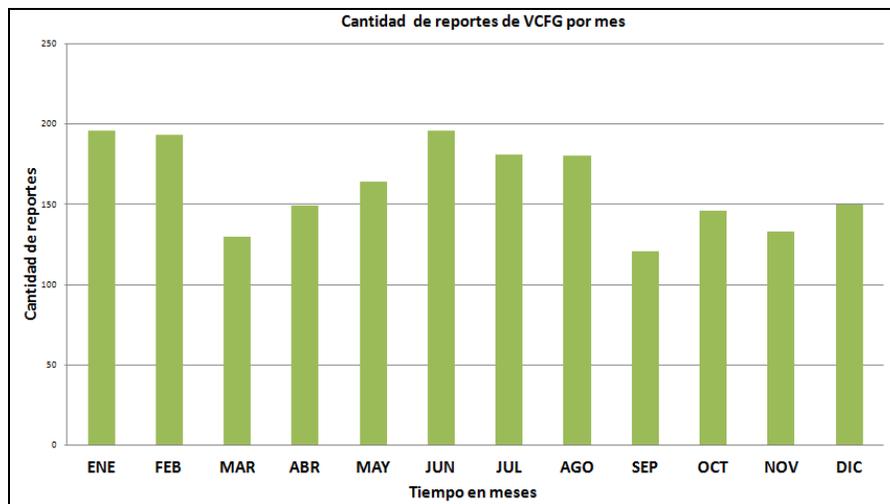


Figura 15: Número de METAR y SPECI que reportaron, por mes del año la presencia del fenómeno de niebla en las vecindades (VCFG) en el aeródromo EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011.

El fenómeno niebla en las vecindades, se presenta constante durante todo el año sobre el aeródromo EEC como se observa en la Figura 15. Los meses con mayor número de horas con este fenómeno son enero, febrero y junio pero no exceden los 200 informes.

Para el aeródromo EEC la niebla se presenta mayormente por procesos de enfriamiento radiativo. Normalmente en las noches anteriores a la ocurrencia del fenómeno las noches son despejadas y el viento en calma. Se presenta en las horas de la madrugada cuando generalmente ocurren las temperaturas más bajas acompañadas de humedades relativas cerca de la saturación, condiciones que favorecen su formación, y según su grado de desarrollo, puede limitar en forma importante la visibilidad horizontal del aeródromo.

### **3.3 Análisis de la ocurrencia de los fenómenos bruma, llovizna, lluvia y tormenta**

#### **3.3.1 Bruma**

Después de analizar los 23605 reportes METAR y SPECI correspondientes a los 3 años de la serie de tiempo (2009 al 2011), se encontró que aparte de los fenómenos de niebla o neblina, la operación del aeródromo EEC se ve afectada en menor proporción por los siguientes fenómenos de tiempo presente que reducen la visibilidad vertical y la visibilidad horizontal: la bruma (HZ), la llovizna (DZ), la lluvia (RA) y las tormentas (TS).

La bruma se notifica solamente cuando la visibilidad horizontal esta entre 5000 m, y 1500 m (OACI, 2005) y de acuerdo a la Figura 16 se presenta con mayor frecuencia los meses de febrero, marzo, agosto y septiembre, durante el mes de julio no hubo registro de la ocurrencia de este fenómeno.

De los 23605 reportes METAR y SPECI, en solamente 55 reportes (0,23%) la información suplementaria (RMK) informaba a las tripulaciones que el aeródromo EEC se encontraba restringido por condiciones meteorológicas.

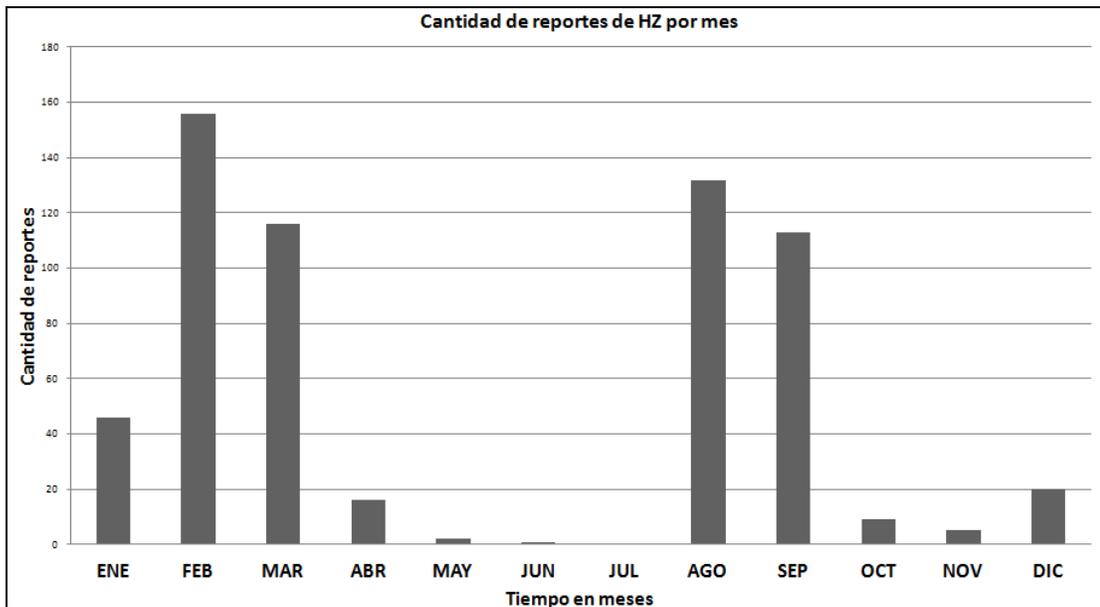


Figura 16: Número de METAR y SPECI que reportaron, por mes del año, la presencia del fenómeno bruma (HZ) en el EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011.

### 3.3.2 Llovizna

Un fenómeno de precipitación identificado luego del análisis de los reportes METAR y SPECI del aeródromo EEC en el lapso del 1 de enero del 2009 al 31 de diciembre de 2011 fue la llovizna (DZ), este fenómeno de acuerdo a la Figura 17 muestra un comportamiento monomodal y se presenta durante todo el año, sus valores máximos de ocurrencia están en los meses de mayo y junio en los cuales se reportaron aproximadamente 60 horas en cada mes.

La llovizna tan solo generó 45 reportes de cierres del aeródromo EEC en los años 2009 a 2011, casos en los cuales

las condiciones meteorológicas como la visibilidad horizontal y visibilidad vertical se vieron afectadas.

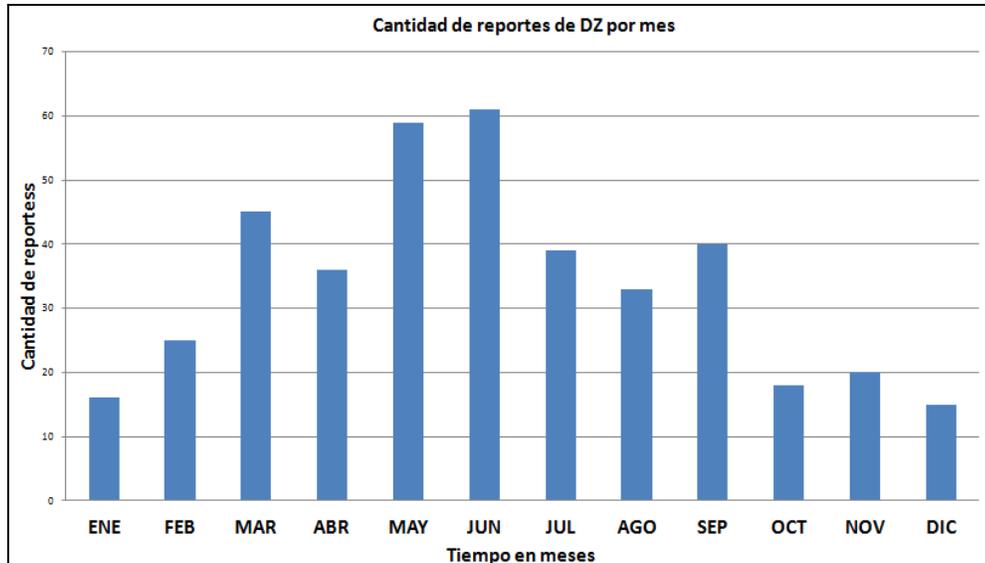


Figura 17: Número de METAR y SPECI que reportaron, por mes del año, la presencia del fenómeno de llovizna (DZ) en el EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011.

### 3.3.3 Lluvia

La Figura 18 indica la variabilidad de lluvia durante el año, la cual se presenta durante todos los meses del año pero con mayor frecuencia en los meses de abril, mayo, junio y julio. Luego de analizar los reportes METAR y SPECI del aeródromo EEC de 2009 a 2011 se encontró que la lluvia causó 84 reportes de cierre del EEC por condiciones meteorológicas desfavorables para la aeronavegabilidad, cubriendo el techo de nubes entre una altura de 100 pies (30,5 m) y 3500 (1067 m). El 08 de mayo de 2011 se presentaron 6 horas consecutivas de lluvia, evento ocurrido entre las 04:00 UTC (23:00 HLC) hasta las 09:00 UTC (04:00 HLC)

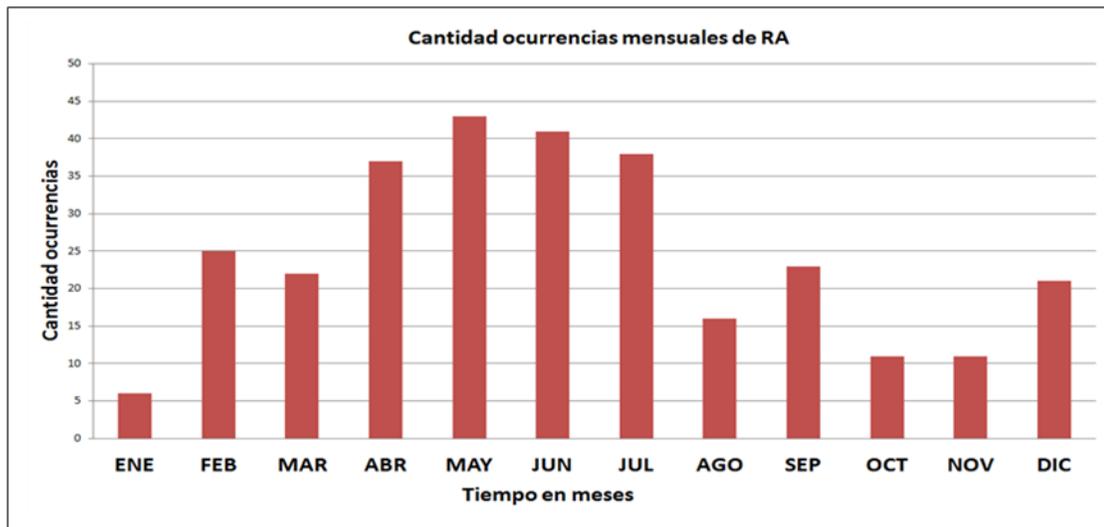


Figura 18: Número de METAR y SPECI que reportaron, por mes del año, la presencia del fenómeno de lluvia (RA) en el EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011.

### 3.3.4 Tormenta

Otro fenómeno de tiempo presente que afecta la operación del aeródromo EEC es la tormenta, debido a que están asociadas a la presencia de nubes convectivas y la mayoría de las veces la acompañan precipitaciones (OMM, 1993). Este fenómeno genera cierres del aeródromo, que normalmente en promedio no superan las 25 ocurrencias por mes (Figura 19), se presenta con mayor frecuencia en los meses de marzo, mayo, octubre y noviembre.

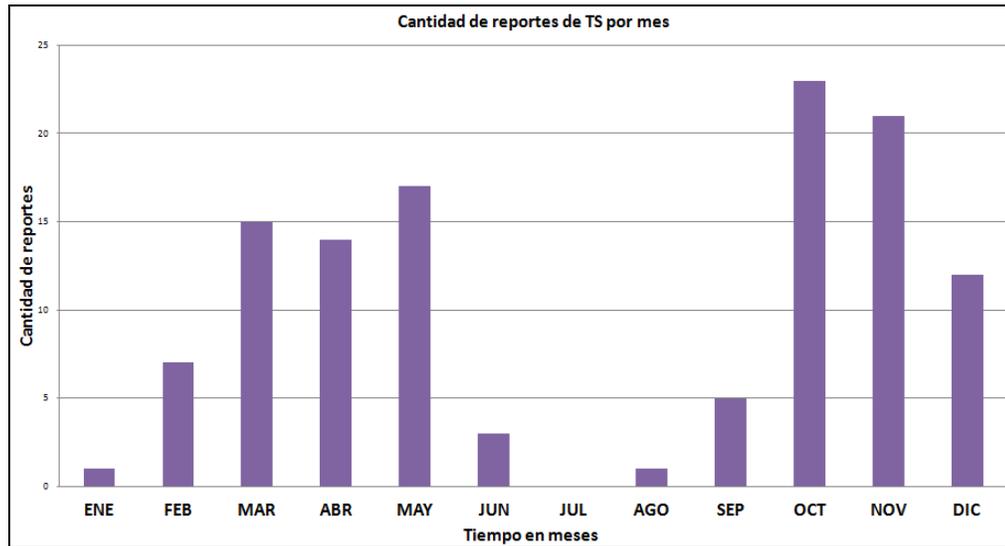


Figura 19: Número de METAR y SPECI que reportaron, por mes del año, presencia del fenómeno de tormenta (TS) en el EEC en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011.

### 3.4 Análisis interanual y casos ocurrencia de niebla y neblina, variables del modelo WRF 2.1.1 temperatura, punto de rocío, presión y velocidad del viento

Con el fin de analizar la capacidad del modelo WRF 2.1.1 para el pronóstico de niebla y neblina en el aeródromo EEC, se tomaron las simulaciones obtenidas del modelo WRF 2.1.1 (00:00 UTC y 12:00 UTC) del lapso de estudio, sustrayendo las variables meteorológicas como temperatura, punto de rocío, presión y velocidad del viento. Esto con el fin de compararlas con los datos observados en superficie plasmados en los METAR o SPECI.

De igual forma se analizaron y compararon las simulaciones del modelo con los datos de superficie en los cuales específicamente se presentaron fenómenos de niebla y neblina, esto con el fin de verificar la acertabilidad de la información arrojada por el modelo en el pronóstico de estos fenómenos.

Como se muestra en la Figura 20, las tres imágenes superiores representan el análisis inter-anual del comportamiento de la variable temperatura simulada por el WRF 2.1.1 en su horizonte de pronóstico (48 horas). En la esquina superior izquierda se aprecia una grafica de dispersión en la cual la línea roja representa los datos obtenidos de los METAR y SPECI, encontrando una marcada sobrestimación en los datos simulados. De igual forma se compararon los diferentes días de las simulaciones y hora a hora de acuerdo al delta  $t$  del modelo con los datos observados.

Este mismo análisis se realizó con los eventos de niebla y neblina con el fin de confirmar y verificar el la detección de estos fenómenos por parte del modelo WRF 2.1.1, evidenciando una diferencia de dos grados.

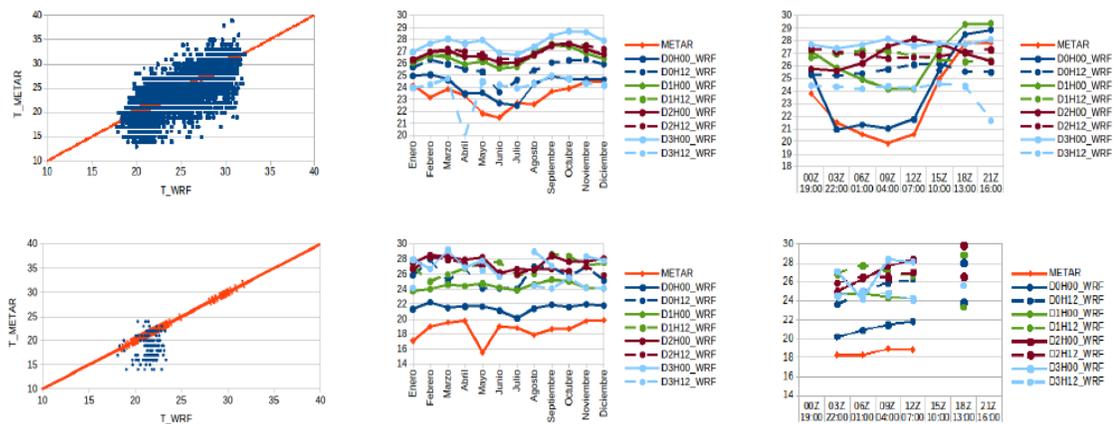


Figura 20: Datos de temperatura simulada por el WRF 2.1.1 y de METAR-SPECI en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011, y (inferior) de los casos de niebla y neblina ocurridos en el mismo lapso.

En la Figura 21, el comportamiento del punto de rocío en las simulaciones del lapso de estudio es similar a la temperatura, sobrestimación por parte del modelo WRF 2.1.1 en la gráfica de dispersión con respecto a los METAR-SPECI. De igual forma, en el análisis inter-anual de esta variable se aprecia que en entre mayo y junio se presentaron los menores valores de esta variable.

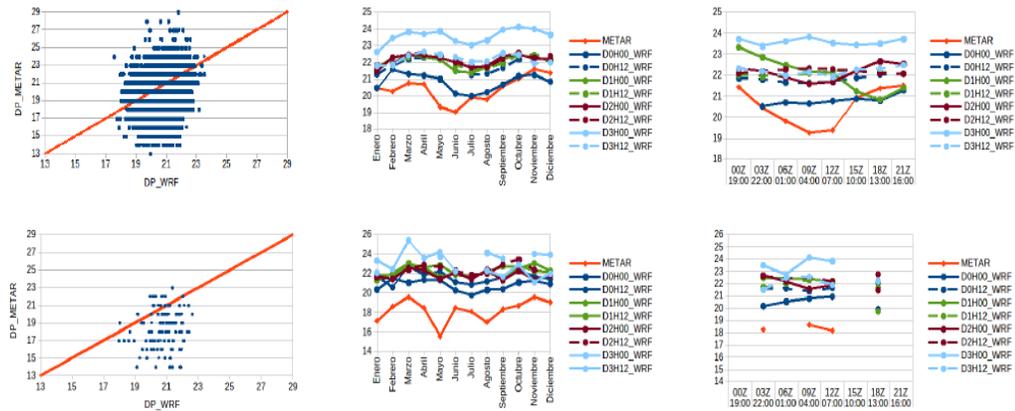


Figura 21: Datos del punto de rocío simulado por el WRF 2.1.1 y de METAR-SPECI en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011, y (inferior) de los casos de niebla y neblina ocurridos en el mismo lapso.

De acuerdo al análisis, la presión es subestimada por parte del modelo, en la Figura 22 se evidencia como en todas las horas de pronóstico la presión muestra valores inferiores a los reportados en los METAR y SPECI. La simulación del día 0 en la simulación de las 00:00 UTC es la que se acerca a los datos de superficie con por lo menos 3 hectopascales.

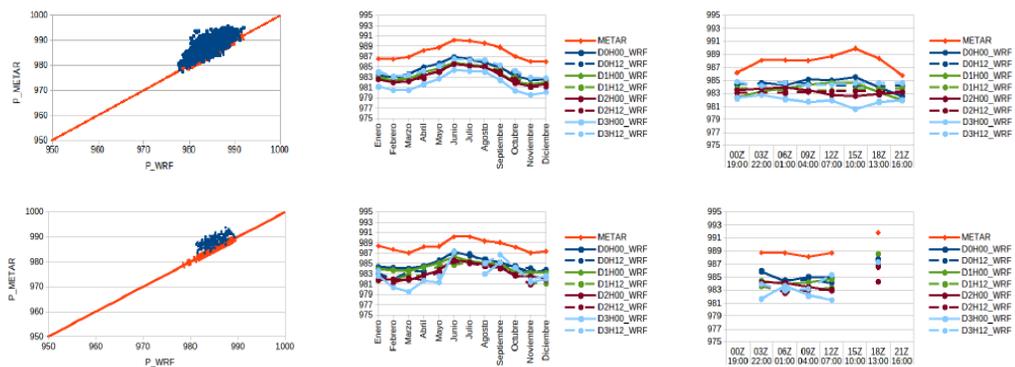


Figura 22: Datos de presión simulados por el WRF 2.1.1 y de METAR-SPECI en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011, y (inferiores) de los casos de niebla y neblina ocurridos en el mismo lapso.

El pronóstico o simulación de la intensidad del viento (Figura 23) es sobrestimado por el modelo WRF 2.1.1 en todo el horizonte de pronóstico con respecto a los datos observados en superficies sustraídos de los METAR y SPECI. Al momento que las condiciones iniciales y de frontera están más próximas a la ocurrencia de los fenómenos es más acertada. La prevalencia de viento en calma en el EEC, va a indicar más fácilmente que los datos modelados o simulados van a estar por encima de los valores reales, generando mayor certeza al momento de realizar un análisis objetivo de las condiciones meteorológicas predominantes en el EEC.

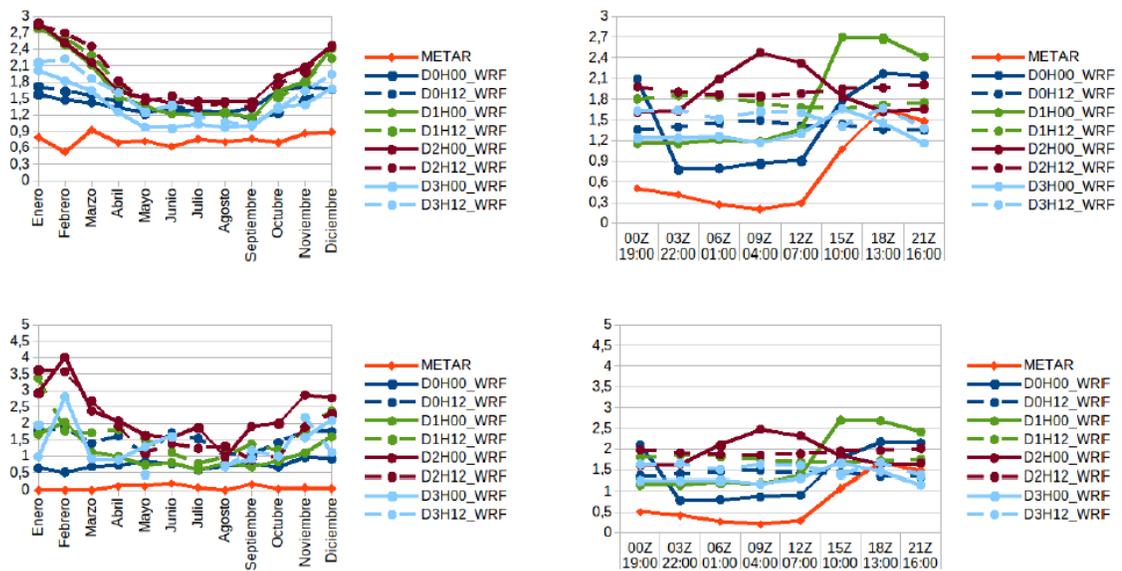


Figura 23: Datos intensidad del viento simulados por el WRF 2.1.1 y de METAR-SPECI en el período del 1 de enero de 2009 al 31 de diciembre de 2011, y (inferiores) de los casos de niebla y neblina ocurridos en el mismo lapso.

### 3.5 Casos de Estudio

Para seleccionar los casos de estudio se tuvieron en cuenta los eventos de mayor duración y en los cuales hubo precipitación previa.

### 3.5.1 Episodio 1, enero 24 de 2009

#### Descripción del evento

De acuerdo al análisis de superficie (Figura 24, 47, 48) para el día 24 de enero de 2009 y de los dos días previos a la ocurrencia del evento, el territorio colombiano se encontraba dominado por un eje de dorsal en capas bajas de la atmósfera ingresando desde el noreste del país hasta el centro de la región Andina, favoreciendo la formación de nubosidad de tipo estratiforme en capas bajas de la atmósfera y manteniendo condiciones de buen tiempo en el Caribe Colombiano y sobre el suroccidente del país. Debido a la ubicación de la ZCIT, varios sistemas convectivos significativos se posicionaban sobre el centro y sur del Pacífico Colombiano. Hacia el sur del país un sistema de baja presión causaba convergencia en capas bajas generando la formación de nubes de desarrollo vertical y lluvias moderadas al sur de la región Amazónica. La Región Orinoquía presentaba poca nubosidad y no se aprecian condiciones de mal tiempo.

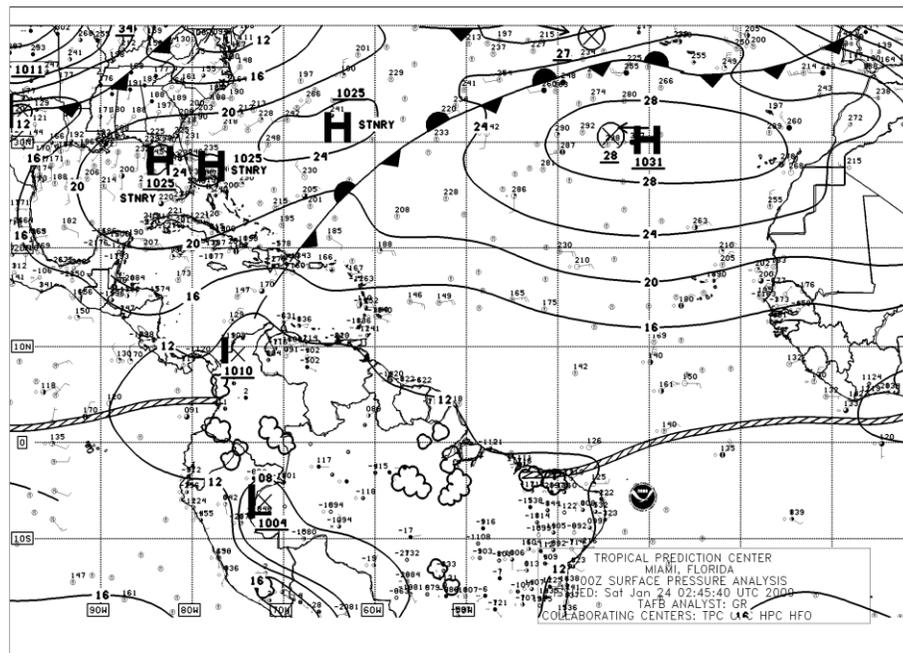


Figura 24: Análisis de superficie para el 24 de enero de 2009, 12 UTC (NWS DIFAX Weather Map Archive, 2014)

El análisis de la nubosidad es un factor relevante para verificar la presencia de niebla o neblina, por esto como resultado del nefoanálisis (Figura 25) efectuado a las imágenes satelitales en sus diferentes canales sobre el área de interés demuestran el tipo y forma de la nubosidad presente al momento de la ocurrencia del evento. La imagen del canal infrarrojo (Figura 25-a) evidencia nubosidad en capas bajas y medias de tipo estratiforme sobre el aeródromo EEC, la Figura 21-b es una imagen del canal vapor de agua, la cual muestra la cantidad de humedad presente en capas altas de la atmósfera apoyando el análisis para descartar la presencia de sistemas convectivos que puedan inhibir la formación de niebla o neblina, para este caso no se aprecian sistemas convectivos o nubosidad de tipo cumuliforme sobre el aeródromo EEC, confirmando la presencia de nubes bajas tipo estratiforme, relacionadas con la presencia de niebla o neblina.

Analizando las imágenes satelitales y los reportes METAR y SPECI previos al evento y durante el evento se encontró lo siguiente: entre las 04:00 UTC (23:00 HLC) y las 16:00 UTC (11:00 HLC) del 24 de enero de 2009, los informes METAR y SPECI reportaron viento en calma, visibilidad entre 50 y 200 metros reducida por el fenómeno de niebla (FG), temperatura del aire entre 15°C y 17°C, esta última temperatura se mantiene durante cuatro horas (09:00 UTC, 04:00 HLC y las 12:00 UTC, 07:00 HLC), el punto de rocío se iguala a la temperatura del aire durante las seis horas de ocurrencia del fenómeno (06:00 UTC a 12:00 UTC), demostrando que la atmósfera en capas bajas y en superficie presentaba una humedad relativa del 100%.

Por otra parte, analizando los reportes METAR y SPECI de los días previos a la ocurrencia del evento, se evidenció que se reportaron varias ocurrencias de niebla y neblina de corta duración (entre una y dos horas) de niebla a horas semejantes a las del presente caso de estudio, dando una noción de persistencia en la ocurrencia del fenómeno sobre el área de estudio.

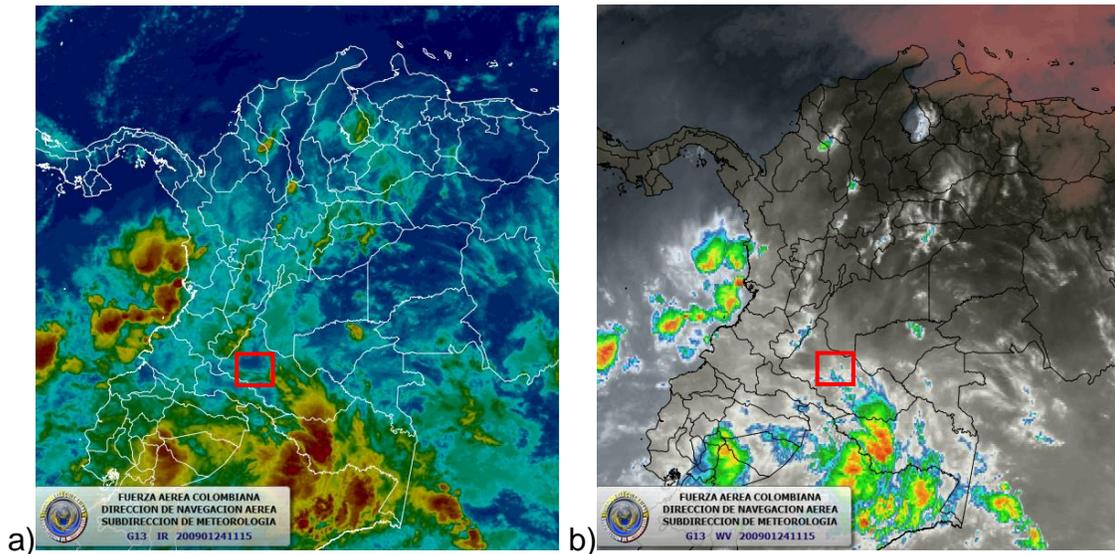


Figura 25: Imágenes de los canales: infrarrojo a) y vapor de agua b). Tomadas por SIMFAC del satélite GOES-12 el 24 de enero de 2009 a las 11:15 UTC (06:15 HLC)

Luego de analizar las imágenes satelitales, se confirma la ocurrencia de niebla o neblina por medio de la información de los METAR y SPECI con los datos de visibilidad (Figura 26). Este tipo de análisis se realiza únicamente con la información observada, ya que el modelo WRF 2.1.1 no cuenta con una parametrización física que permita pronosticar o detectar fenómenos meteorológicos que afecten directamente la visibilidad. En este caso de estudio como se mencionó anteriormente en la descripción del comportamiento de los reportes METAR y SPECI, la visibilidad inicia a descender paulatinamente a partir de las 02:00 UTC (21:00 HLC) hasta las 12:00 UTC (07:00 HLC) del 24 de enero de 2009. La presencia de niebla en el aeródromo EEC alcanzó su valor mínimo (50 m) durante seis horas seguidas entre las 06:00 UTC (01:00 HLC) y las 12:00 (07:00 HLC) generado por un enfriamiento radiativo que al sumarse el alto porcentaje de humedad presente en el ambiente favorece la ocurrencia de niebla o neblina en el área de interés.

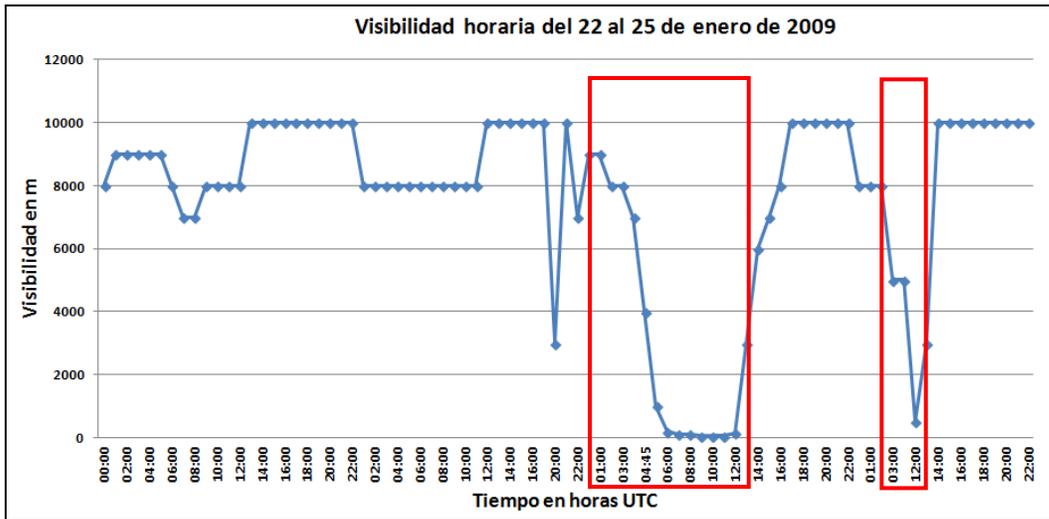


Figura 26: Evolución horaria de la visibilidad observada en el EEC. Iniciando el 22 de enero de 2009 a las 00:00 UTC (19:00 HLC) hasta el 25 de enero de 2009 a las 22:00 UTC (17:00 HLC).

Es importante aclarar que en la figura 26 las horas están en números pares pero se tienen los datos consecutivos completos en la mayor parte del lapso, pero como se muestra en el cuadro delgado resaltado en la imagen, se aprecia un salto de información pasando de 03:00 UTC (22:00 HLC) a 12:00 UTC (07:00 HLC), esto se debe a una pérdida de información en los reportes METAR y SPECI.

El viento en calma (Figura 27) garantiza que no se presente mezcla turbulenta en capas bajas de la atmósfera permitiendo que el evento se mantenga presente por más de 06 horas en cercanías y sobre el EEC en este día particular.

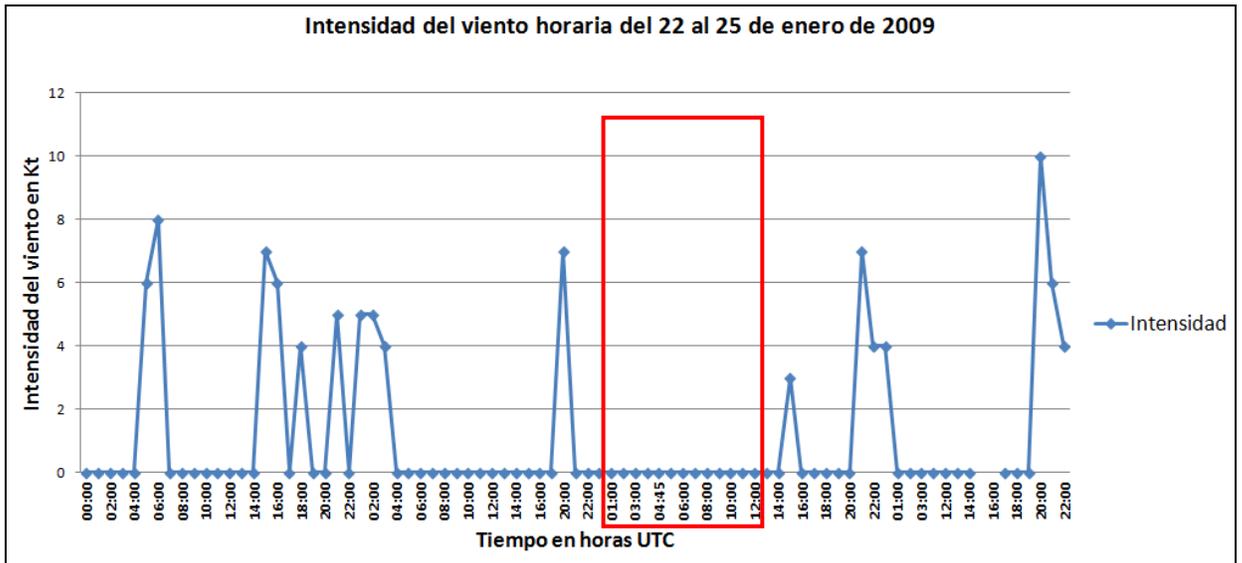


Figura 27: Evolución horaria de la intensidad del viento observado en el EEC. Iniciando el 22 de enero de 2009 a las 00:00 UTC (19:00 HLC) hasta el 25 de enero de 2009 a las 22:00 UTC (17:00 HLC).

Con el fin de determinar el grado de acierto del modelo WRF 2.1.1 en la detección de niebla o neblina y establecer las características en las cuales se presentó el fenómeno, se analizaron variables arrojadas por el modelo con información de flujos de energía (Figura 28) ya que estas son decisivas para realizar un pronóstico exitoso.

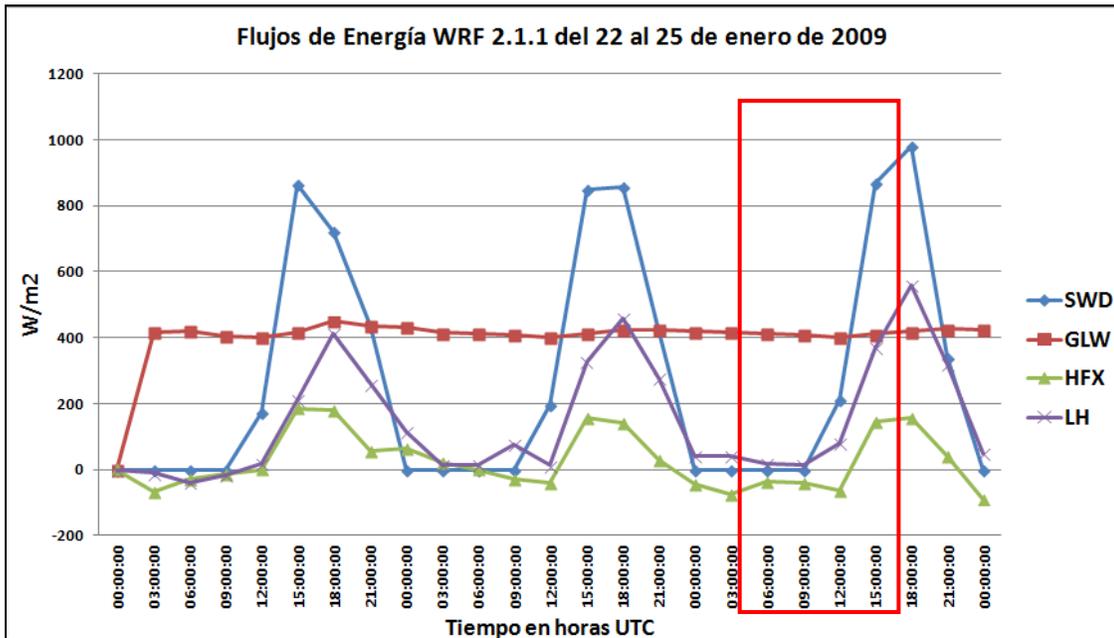


Figura 28: Series de tiempo de variables de flujos de energía arrojadas por el modelo WRF 2.1.1 cada tres horas de los días 22 al 25 de enero del 2009 para el aeródromo EEC. Downward short wave flux at ground surface (SWD), Downward long wave flux at ground surface (GLW), Upward heat flux at the surface (HFX) y Latent heat flux at the surface (LH)

Analizando los diferentes flujos de energía que se presentan en la Figura 28, durante el lapso de ocurrencia del fenómeno se nota una pequeña disminución en los valores de flujos de energía, pero el modelo mantiene un comportamiento normal de acuerdo al ciclo diurno mostrando los valores máximos entre las 15:00 UTC (10:00 HLC) y las 21:00 UTC (16:00 HLC) horas en las cuales se presenta el mayor calentamiento durante el día.

Las variables “Upward Heat Flux at the Surface” (HFX) y “Latent Heat Flux at the Surface” (LH) fueron las que detectaron la posible presencia de este evento de niebla o neblina sobre el aeródromo EEC.

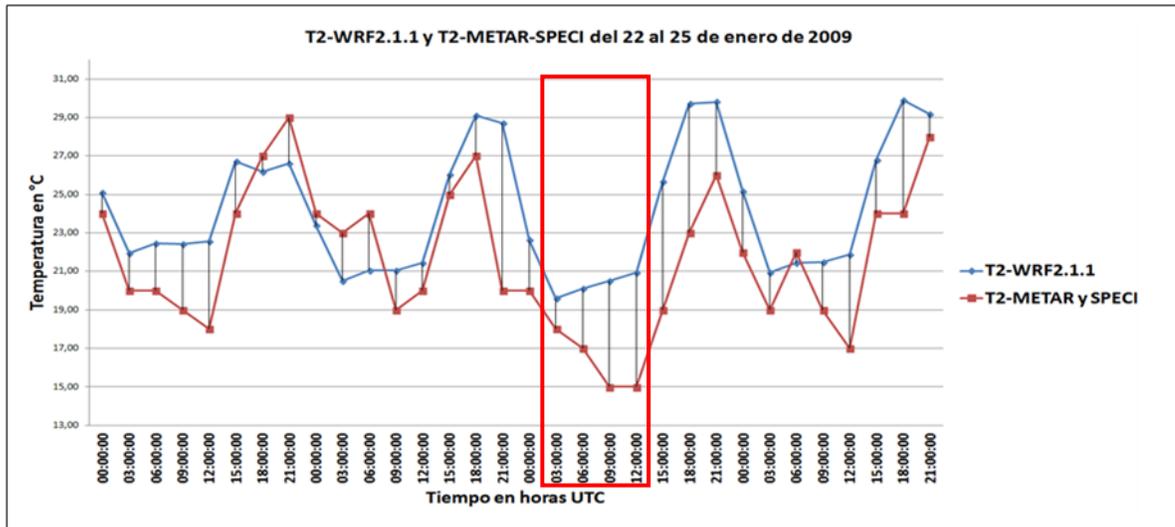


Figura 29: Temperatura del aire a 2 m de los reportes METAR-SPECI y del modelo WRF 2.1.1 cada tres horas de los días 22 al 25 de enero del 2009 para el aeródromo EEC.

Después de comparar y analizar los datos METAR y SPECI de temperatura real (observada) con la información de temperatura pronosticada por el modelo WRF 2.1.1 (Figura 29) correspondiente a los dos días previos y posteriores al evento se encontró que el modelo mantiene un comportamiento acorde al ciclo diurno y no detecta la disminución de temperatura que demuestra la ocurrencia de niebla o neblina en el aeródromo EEC. El modelo genera datos cada tres horas, por esto no detecta fácilmente este tipo de fenómenos.

El modelo WRF 2.1.1 es utilizado por los pronosticadores de la Fuerza Aérea Colombiana como herramienta operativa y gráfica para generar pronósticos, por lo cual para el análisis de este trabajo se tomó un producto generado por SIMFAC llamado “Sección Temporal” que tiene información simulada – pronosticada en un lapso de 3 horas. Se tomó como base principal para el análisis las siguientes variables: Presencia de Nubosidad, agua en nubes, agua precipitable y Viento.

Como se muestra en el área demarcada de la Figura 30 (caso de estudio), la dirección del viento predominante proviene de los 60° con una intensidad entre 10 y 15 nudos, lo cual es muy fuerte para que el fenómeno se sostenga por mucho tiempo, hay nubosidad escasa en capas bajas y medias indicando la posible presencia de niebla o neblina sobre el aeródromo EEC en el lapso de interés, se muestra además valores bajos de contenido agua en nubes y agua precipitable. De igual forma se verificaron los valores de humedad relativa y punto de rocío generados por el modelo encontrando valores bajos de humedad relativa y el punto de rocío no se aproxima a la temperatura, corroborando que el modelo no detecta la ocurrencia de niebla o neblina. Al comparar con el resto del horizonte de pronóstico de la sección temporal las condiciones son similares y no se puede diferenciar en qué momento el fenómeno es intenso o de larga duración. Por otra parte, el modelo sobrestima la nubosidad en capas altas (250 hPa, 34000 pies) mostrando gran cantidad de nubes donde realmente no hubo.

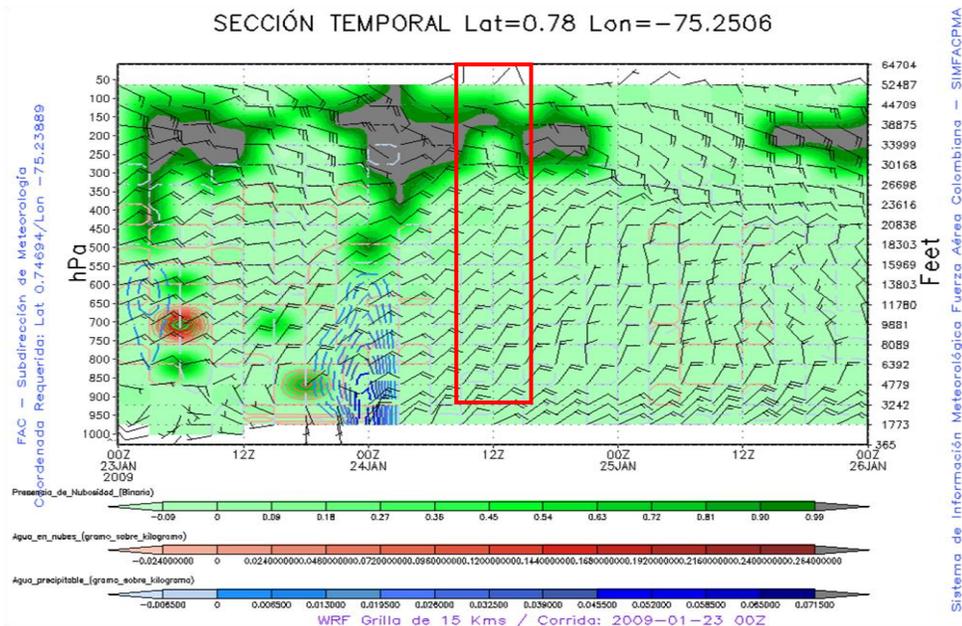


Figura 30: Sección temporal generada con las variables Presencia de Nubosidad [binaria] (verde), Agua en nubes [g/Kg] (roja), Agua precipitable [g/Kg] (azul) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas.

### 3.5.2 Episodio 2, 10 de julio de 2010, luego de varias horas de lluvia previas sobre el EEC.

#### Descripción del evento:

Para este caso de estudio, de los reportes METAR y SPECI, se encontró lo siguiente: El día previo 09, de julio de 2010 entre las 13:00 UTC (08:00 HLC) y las 15:00 UTC (10:00 HLC) se presentó lluvia leve, con cielo cubierto entre 1000 pies (305 m) y 500 pies (153 m), reduciendo la visibilidad en 1200 m, las siguientes cuatro horas (16:00 UTC / 11:00 HLC a 19:00 UTC / 14:00 HLC) se reportó llovizna leve reduciendo el techo de nubes a 1000 pies (305 m). Luego de siete horas, a las 03:00 UTC del 10 de julio (22:00 HLC) se reporta niebla (FG) en el aeródromo EEC reduciendo la visibilidad en 900 m. A la siguiente hora (04:00 UTC, 23:00 HLC) el fenómeno había aumentado su intensidad y densidad disminuyendo la visibilidad horizontal del aeródromo EEC en 100 metros. Luego, en la hora siguiente (05:00 UTC, 24:00 HLC) la visibilidad se ha reducido a 50 m y el techo de nubes está sobre la superficie disminuyendo la visibilidad vertical totalmente, lo que indica al controlador aéreo y observador que debe cerrar el aeródromo por condiciones meteorológicas adversas para las operaciones de aeronavegación. Durante tres horas se mantienen estas condiciones de mal tiempo. A partir de las 08:00 UTC (03:00 HLC) la visibilidad horizontal empieza a mejorar pasando de 50 m a 200 m, pero el techo de nubes continua restringiendo las operaciones aéreas por encontrarse demasiado bajo y cerca de la superficie, se mantiene disminuida al máximo la visibilidad vertical, siendo indescifrable para el controlador. Estas mismas condiciones se mantienen por la hora siguiente 09:00 UTC (04:00 HLC). A las 10:00 UTC (05:00 HLC) la visibilidad horizontal aumenta de 200 m a 500 m pero el aeródromo continua operando bajo condiciones mínimas meteorológicas, a las 11:00 (06:00 HLC) aumenta de 500 m a 900 m y la visibilidad vertical se mantiene reducida totalmente. A las 12:00 UTC (07:00 HLC) la intensidad del fenómeno disminuye y deja de reportarse niebla

---

(FG), pasando a neblina (BR), de igual forma se mejora la visibilidad horizontal (1500 m). El METAR de las 13:00 UTC (08:00 HLC) reporta viento en calma, visibilidad horizontal de 2000 m con presencia de neblina y techo de nubes cubierto y reducido a 400 pies (122 m). Las condiciones meteorológicas mejoran repentinamente a las 14:00 UTC (09:00 HLC), la visibilidad horizontal pasa a ser mayor a 10 kilómetros, el viento continúa en calma, se reportan bancos de niebla (BCFG) y nubosidad fragmentada a 1500 pies (457 m)

Realizando el análisis de las condiciones sinópticas (Figura 31, 49, 51) para entender el por qué del comportamiento de las condiciones meteorológicas sobre el área de estudio se llega al siguiente análisis: se observa la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) ubicada entre los 09 y 10 grados de latitud norte favoreciendo posiblemente la convección profunda sobre el occidente del Caribe Colombiano durante el transcurso del día. Ingresando a territorio colombiano cerca del Golfo de Urabá, interactuando de forma favorable con una onda tropical que se traslada de oriente a occidente sobre el norte del país, lo cual puede generar sistemas ciclónicos en superficie que aumentan la nubosidad baja y precipitaciones, como se aprecia en los reportes sinópticos generados por los aeropuertos de Santa Marta, Barranquilla y Cartagena. El centro del Caribe colombiano presenta condiciones de buen tiempo, con poca nubosidad de tipo estratiforme y sobre el archipiélago de San Andrés y Providencia se esperarían formaciones de nubes de tipo cumuliformes en capas medias pero no favorecerán la presencia de lluvias.

La falta de información sinóptica en el suroccidente del territorio colombiano dificulta en análisis, por lo tanto para suplir esta falencia se acude al análisis de imágenes satelitales.

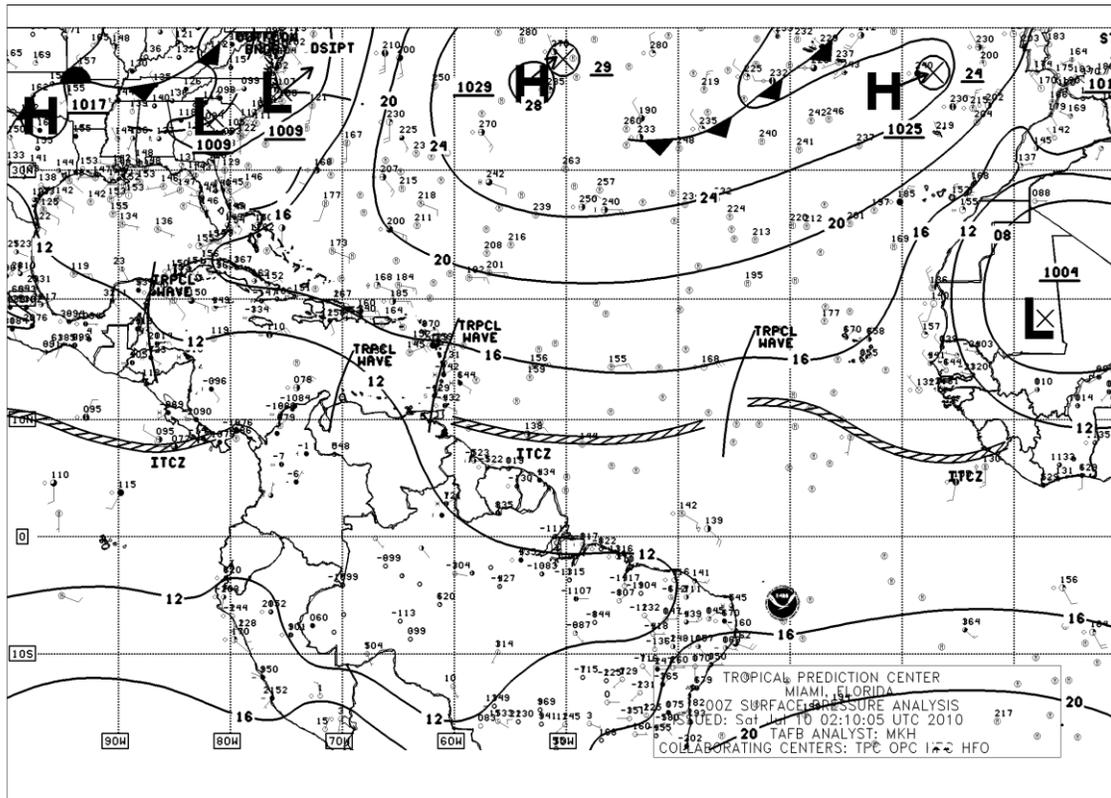


Figura 31: Análisis de superficie del 10 de julio de 2010, 12:00 UTC / 07:00 HLC (NWS DIFAX Weather Map Archive, 2014)

Sobre el aeródromo EEC se aprecia en la imagen satelital de las 12:15 UTC (07:15 HLC) (Figura 32-a) nubosidad baja de tipo estratiforme asociada a la presencia de niebla o neblina y la Figura 32-b confirma que sobre el área de estudio no se presenta nubosidad de desarrollo vertical que inhiba la formación de niebla o neblina y muestra que los sistemas convectivos significativos de mesoescala están ubicados de acuerdo con el análisis sinóptico realizado anteriormente, localizándose sobre el litoral Pacífico colombiano y la región Orinoquía favoreciendo precipitaciones sobre esta área y al sur de la Amazonía.

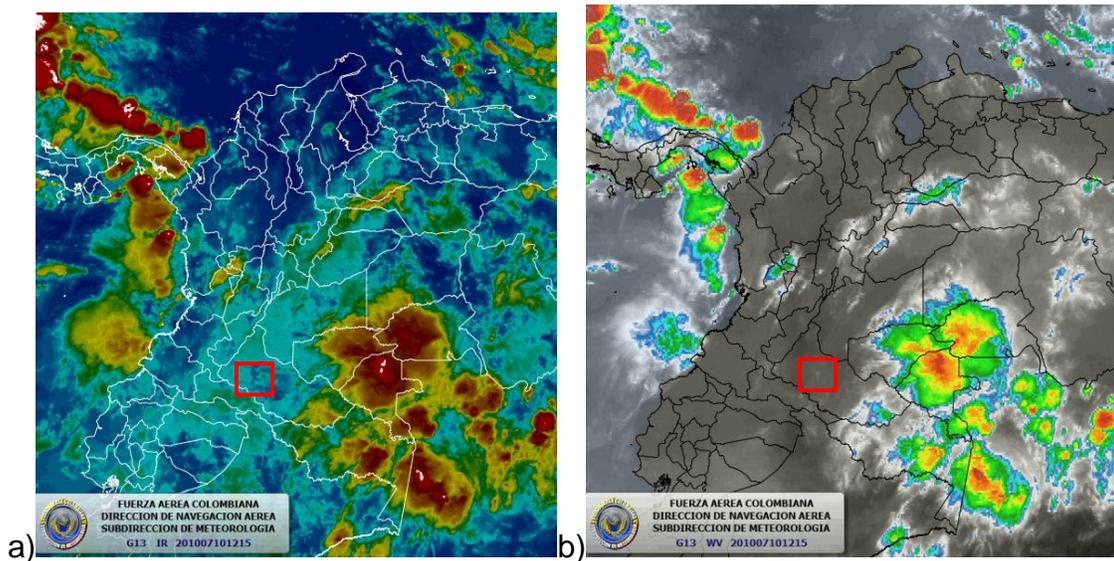


Figura 32: Imágenes satelitales de los canales infrarrojo y vapor de agua tomadas del satélite GOES-13, del 10 de julio de 2010 a las 12:15 UTC (07:15 HLC)

Para este caso de estudio, se realizó el análisis de la visibilidad, durante y después de la ocurrencia del fenómeno, tomando datos de visibilidad de los reportes METAR y SPECI disponibles desde el 09 de julio al 12 de julio de 2010 (Figura 33), en esta figura la cual se aprecia una repentina disminución de visibilidad a partir de las 03:00 UTC (22:00 HLC) del 10 de julio de 2010, manteniéndose por debajo de los 2000 m por más de 11 horas, restringiendo la operación del aeródromo. Esta condición afecta la planeación de ejercicios aéreos en los cuales la base de lanzamiento o alerno fuera el aeródromo EEC.

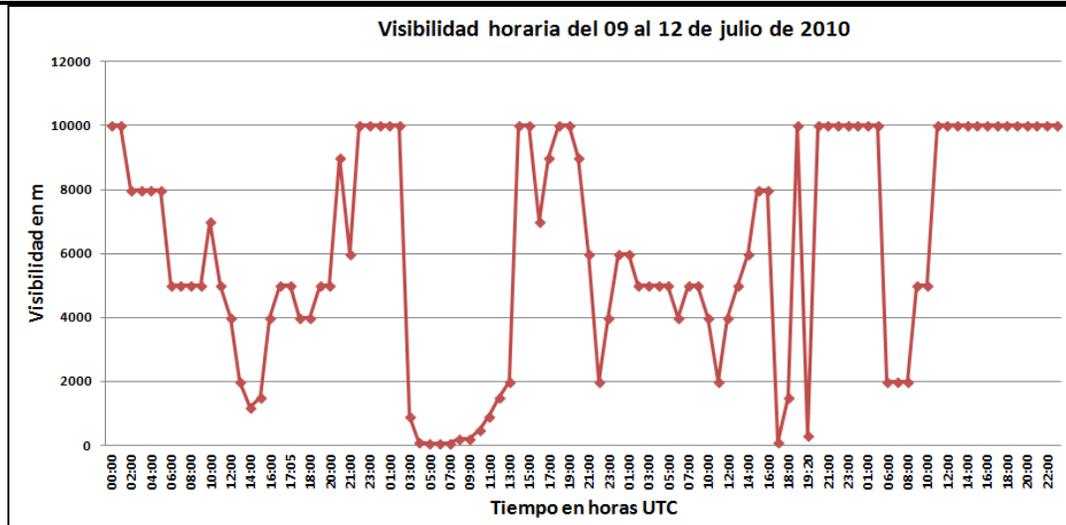


Figura 33: Evolución horaria de la visibilidad observada en el EEC. Iniciando el 09 de julio de 2010 a las 00:00 UTC (19:00 HLC) hasta el 12 de julio de 2009 a las 22:00 UTC (17:00 HLC).

Se obtiene como resultado del análisis de los reportes METAR y SPECI que durante las horas de ocurrencia del fenómeno, el viento se mantuvo en calma (Figura 34), indicando que esta condición favorece la formación y duración. Al observar datos modelados por el WFR 2.1.1 se dificulta el pronóstico de niebla y neblina sobre el aeródromo EEC ya que no muestra valores de viento con intensidad de cero nudos o en calma, sino que por el contrario sobrestima esta variable.

De igual forma el 15,63% del total de los datos de viento reportados durante los 4 días (96 datos de viento) que incluyen el caso de estudio estuvo entre 0 y 1 nudos, demostrando que la condición de viento en calma en el EEC es constante.

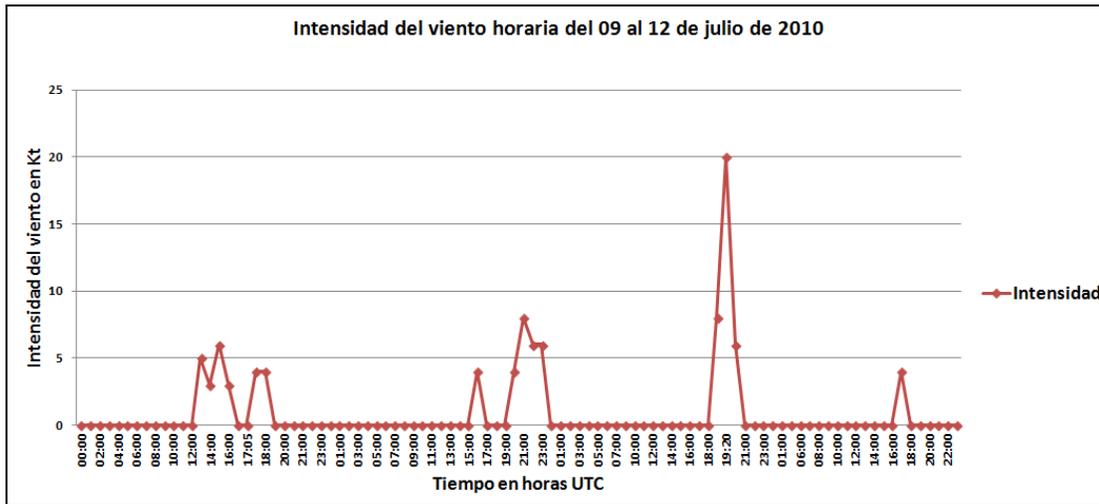


Figura 34: Evolución horaria de la intensidad del viento observado en el EEC. Iniciando el 09 de julio de 2010 a las 00:00 UTC (19:00 HLC) hasta el 12 de julio de 2010 a las 22:00 UTC (17:00 HLC).

Analizando los diferentes flujos de energía que se presentan en la Figura 32, durante el lapso de ocurrencia del evento se nota una pequeña disminución en los valores de flujos de energía, pero el modelo mantiene un comportamiento de acuerdo a ciclo diurno, mostrando los valores máximos entre las 18:00 UTC (13:00 HLC) y las 21:00 UTC (16:00 HLC) horas en las cuales se presenta el mayor calentamiento durante el día. De la figura 35, los días 9, 10 y 11 de julio entre las 9 y 12 UTC no muestran gran diferencia demostrando que los flujos HFX y LH se comportan igual independientemente del día.

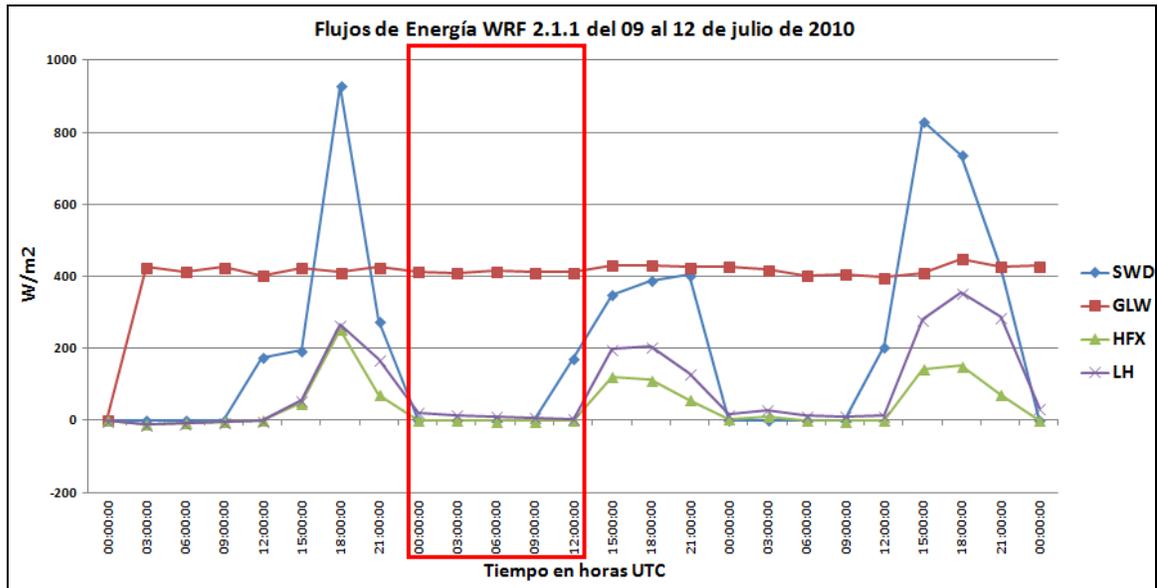


Figura 35: Flujos de energía del WRF 2.1.1 de los días 09 a las 00:00 UTC al 12 de julio a las 00:00 UTC del 2010 para el aeródromo EEC.

Para este caso de estudio desafortunadamente no es posible comparar la información de temperatura simulada por el modelo WRF 2.1.1 con la temperatura del aire reportada en los METAR y SPECI ya que éste es uno de los meses en los que esta variable no fue medida por fallas en la Estación Meteorológica Automática de Superficie (EMAS) instalada en el aeródromo ECC (SIMFAC, 2009). Por otra parte, en el día de estudio (destacado con un cuadro rojo en la Figura 36) se evidencia entre la 03:00 UTC (22:00 HLC) y las 12:00 UTC (07:00 HLC) una disminución de aproximadamente 0,5 °C de la temperatura simulada con respecto al día anterior al evento, haciendo necesaria la comparación con datos observados.

Esto facilita el diagnóstico y pronóstico de las condiciones locales en las cuales se formó la niebla o la neblina, así mismo se recomienda contar con sistemas robustos de medición en superficie que garanticen la generación completa de las variables meteorológicas en un aeródromo permitiendo generar la información METAR y SPECI completa.

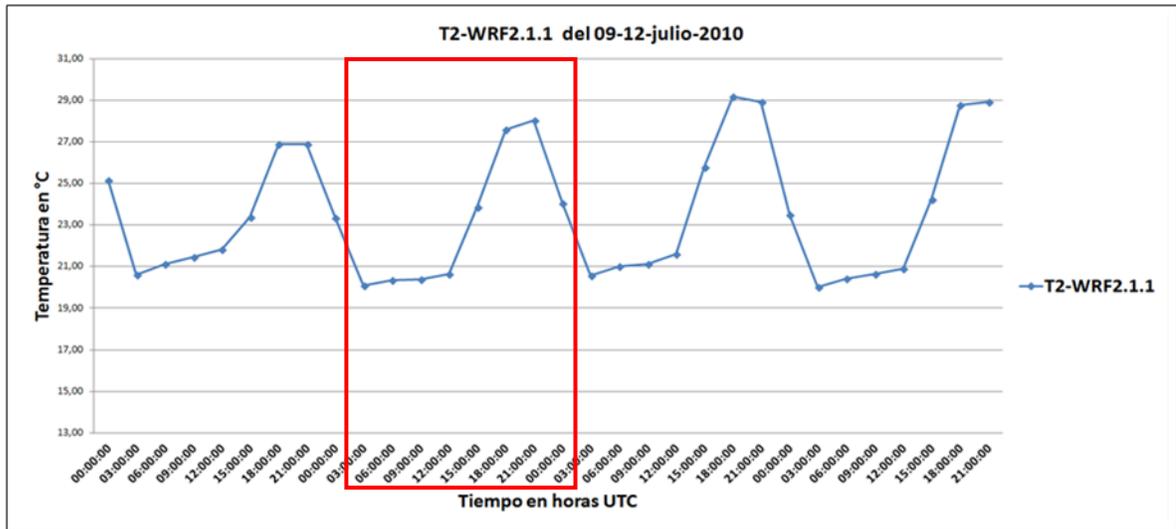


Figura 36: Temperatura a 2 m del WRF 2.1.1 cada tres horas de los días 09 al 12 de julio del 2010 para el aeródromo EEC.

De igual forma, se aprecia que el modelo sigue el ciclo diurno de la temperatura y no detecta disminuciones de temperatura durante la ocurrencia del fenómeno siendo esto un indicativo claro en la previsión de fenómenos de niebla o neblina. El análisis de un perfil termodinámico logra suplir la carencia de información de temperatura observada en superficie y demuestra en qué niveles de la atmósfera la saturación ( $T=T_d$ ) es del 100%.

El radiosondeo (Figura 37) realizado el día de estudio señala altos contenidos de humedad en capas bajas (superficie) al encontrarse igualada la línea de temperatura del aire (derecha) con la temperatura del punto de rocío (izquierda), demostrando así la presencia de niebla en el EEC. Por otra parte mide viento en calma en superficie. Similares condiciones de alto contenido de humedad se aprecian en capas medias de la atmósfera, en las cuales se presenta una capa densa de nubes apreciada en la imagen satelital infrarroja anteriormente presentada.

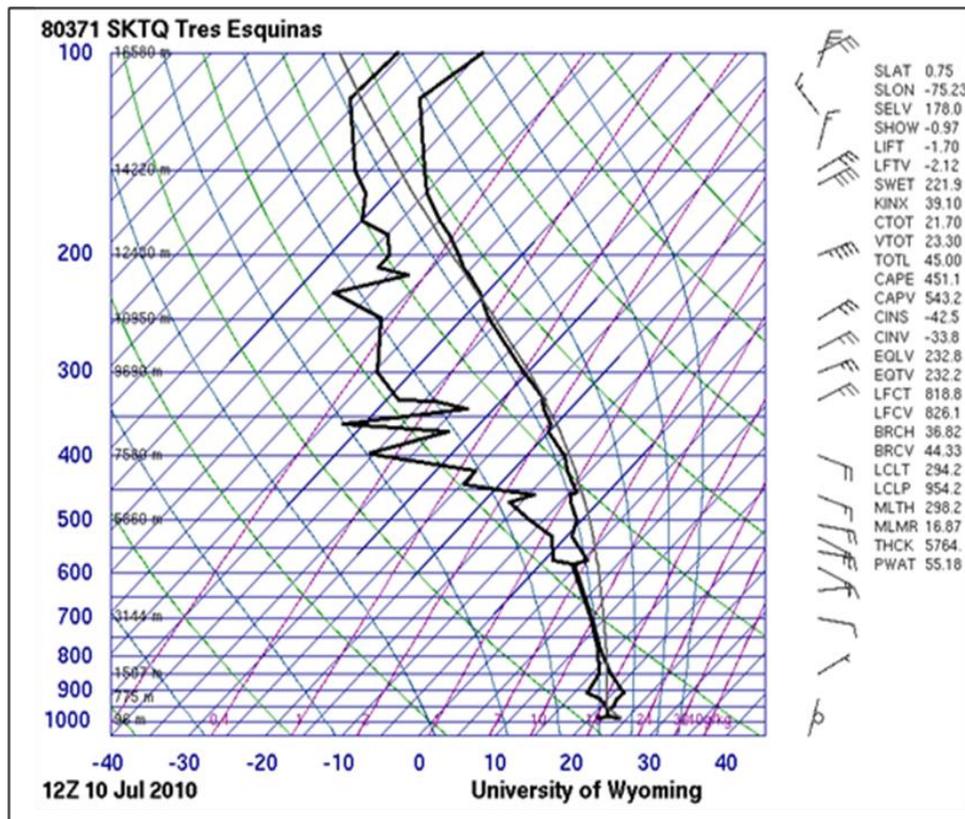


Figura 37: Radiosondeo realizado en el EEC con el Sistema de Sondeo Atmosférico (código OMM 80371), del 10 de julio de 2010 a las 12 UTC (07:00 HLC), diagrama Skew-T tomado de Universidad de Wyoming 2010.

La sección temporal (Figura 38) generada con las mismas variables descritas anteriormente, no muestra la presencia de nubosidad baja asociada a los fenómenos de niebla y neblina. De igual forma, el viento simulado es sobrestimado mostrando valores superiores a 10 nudos en capas bajas lo que impide la formación de estos fenómenos.

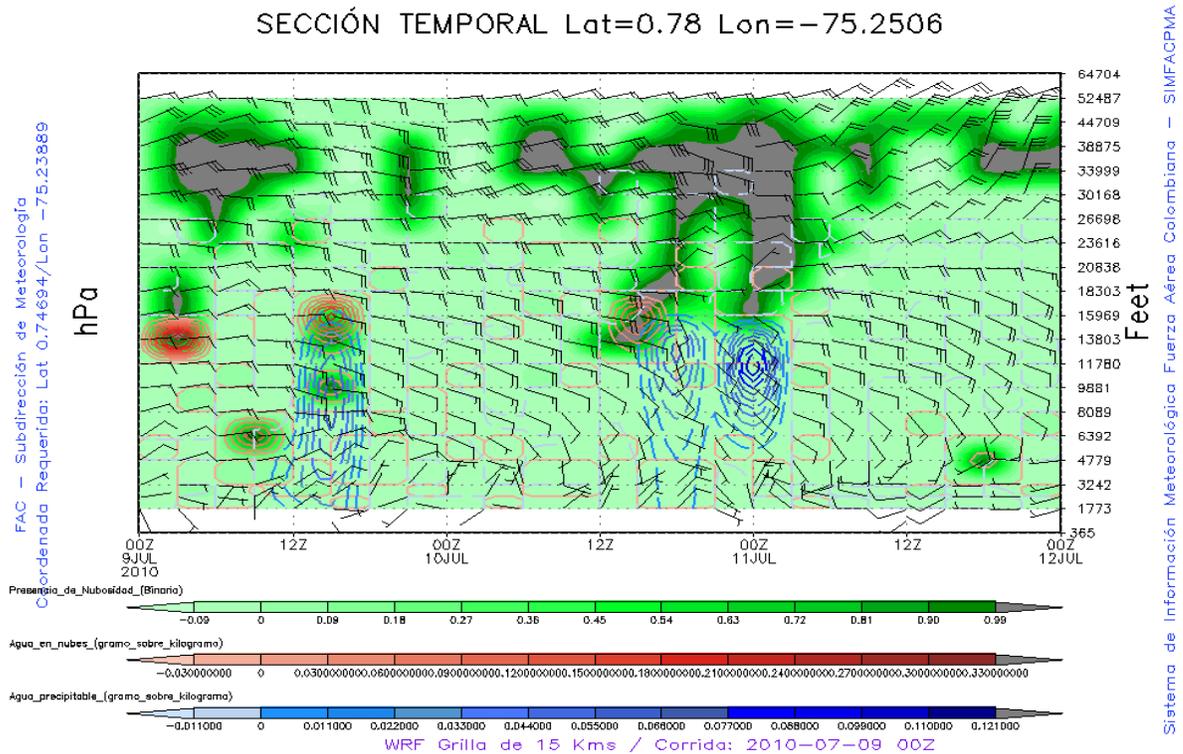


Figura 38: Sección temporal generada con las variables Presencia de Nubosidad [binaria] (verde), Agua en nubes [g/Kg] (roja), Agua precipitable [g/Kg] (azul) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas.

### 3.5.3 Episodio 3, 25 de noviembre de 2011, niebla, neblina, lluvia, niebla y neblina

#### Descripción del evento

Este caso de estudio es muy interesante, ya que el fenómeno es recurrente durante varios días y ocurre en horas similares. No se cuenta con datos de temperatura del aire ni de temperatura del punto de rocío para todas las horas. Se mencionarán los datos de temperatura que estén disponibles en este caso de estudio. El evento inicia sobre el aeródromo EEC el día 24 de noviembre a las 06:00 UTC (01:00 HLC) con la presencia de neblina (BR), viento en calma, visibilidad horizontal reducida en 4000 m, cielo cubierto con un techo de nubes de

1000 pies (305 m). Estas condiciones se mantienen durante las siguientes tres horas, aunque la visibilidad mejora al final de este lapso reportando 5000 m de visibilidad horizontal. A las 09:00 UTC (04:00 HLC), se reportan viento en calma, visibilidad de 8000 m, niebla en las vecindades (VCFG), nubosidad baja fragmentada con un techo de nubes de 2000 pies (610 m). Las siguientes tres horas reportan viento en calma, se mantiene la visibilidad a 8000 m, bancos de niebla (BCFG) y el techo de nubes se mantiene bajo a 2000 pies (610 m). La siguiente hora (13:00 UTC, 08:00 HLC) reporta viento proveniente de los 270 grados con una intensidad de 4 nudos, visibilidad a 4000 m con presencia de neblina, cielo cubierto (OVC) con un techo de nubes bajas a 1000 pies (305 m). A esa hora el aeródromo EEC es restringido por condiciones meteorológicas adversas. Las próximas dos horas (14:00 UTC, 09:00 HLC a 15:00 UTC, 10:00 HLC) reportan viento de los 360 grados.

La visibilidad de 6000 m y 5000 m respectivamente. A partir de la siguiente hora, se presentaron tres horas seguidas de lloviznas moderadas, acompañadas de viento proveniente de los 30 grados con 4 nudos de intensidad, una capa fragmentada de nubes bajas a 1500 pies (457 m) y otra capa de nubosidad media a una altura de 5000 pies (1524 m).

Luego de este evento de lloviznas moderadas, siguen ocho reportes (de 19:00 UTC, 14:00 HLC del 24 de noviembre de 2011 a las 02:00 UTC, 22:00 HLC del 25 de noviembre de 2011) en los cuales se evidencian condiciones meteorológicas favorables: viento en calma, visibilidad mayor a 10 km, nubosidad media dispersa y sin fenómenos meteorológicos. Desde las 03:00 UTC (23:00 HLC) hasta las 04:00 UTC (00:00 HLC) se reporta viento en calma, visibilidad a 8000 m, niebla en la proximidades del EEC (entre 8 y 16 km del punto de referencia del EEC) y nubosidad dispersa entre 7000 pies (2.133 m) y 8000 pies (2.438 m).

---

Entre las 05:00 UTC (24:00 HLC) y las 06:00 UTC (01:00HLC) se reportan condiciones de buen tiempo, pero a partir de las 07:00 UTC, (02:00 HLC) se deteriora. Durante dos horas consecutivas se presentan bancos de niebla y se reduce la visibilidad de 9000 m a 3000 m, la hora siguiente (09:00 UTC, 04:00 HLC) el aeródromo EEC reporta viento en calma, la visibilidad se reduce a 50 m y el techo de nubes se encuentra sobre la superficie formando niebla por dos horas seguidas, siendo necesario cerrar el aeródromo por condiciones meteorológicas adversas. El fenómeno de niebla se mantiene con las mismas condiciones de viento en calma y techo de nubes sobre la superficie afectando la visibilidad vertical, la visibilidad horizontal pasa de 50 m a 100 m a las 11:00 UTC (06:00 HLC) pero el aeródromo continúa cerrado, retrasándose así de las operaciones aéreas. El fenómeno de niebla se mantiene y la visibilidad sigue reducida en 200 m de acuerdo a lo reportado en el METAR de las 12:00 UTC (07:00 HLC). A las 13:00 UTC (08:00 HLC) la visibilidad está en 800 m y el fenómeno permanece restringiendo las operaciones. A las 13:30 UTC (08:30 HLC) se genera un reporte SPECI ya que la visibilidad mejora y pasa de 800 m a 5000 m, de igual forma el techo de nubes de estar sobre la superficie pasa a estar en 2000 pies (610 m), con nubosidad fragmentada. La niebla deja de estar sobre el aeródromo EEC y quedan algunos bancos de niebla (BCFG) durante dos horas consecutivas cerca al aeródromo. Se disipan los bancos de niebla y a las 15:00 UTC (10:00 HLC) las condiciones atmosféricas mejoran considerablemente, reportando viento de los 20 grados con una intensidad de 5 nudos, visibilidad mayor a 10 km y nubosidad escasa (entre 2 y 3 octas) a 2000 pies (610 m). Condiciones similares de buen tiempo se mantienen durante la siguiente hora. A partir de las 17:00 UTC (12:00 HLC), la nubosidad aumenta en capas bajas y medias hasta las 20:00 UTC (15:00 HLC), cuando se reporta un chubasco, el cual ocurre a una distancia entre 8 y 16 km del aeródromo EEC, nubes bajas dispersas en 4000 pies (1219 m) y nubosidad media a 10000 pies (3048 m), temperatura del aire de 30 °C y temperatura de punto de rocío de 23 °C. En las dos horas siguientes se reportan nubosidad de desarrollo vertical de tipo torrecúmulos, causando tormentas en las

vecindades del aeródromo EEC desde las 00:00 UTC (19:00 HLC) del 26 de noviembre hasta las 01:00 UTC (20:00 HLC). Al cesar la tormenta, reportan niebla en las vecindades la siguiente hora, la cual inicia un aumento en su densidad y luego de tres horas del reporte de la niebla en las vecindades, a las 06:00 UTC (01:00 HLC), la niebla se posiciona sobre el aeródromo EEC disminuyendo la visibilidad en 500 m durante tres horas consecutivas, ocasionando el cierre del aeródromo durante cuatro horas por condiciones meteorológicas desfavorables. Luego de estas cuatro horas, la niebla pasa a ser neblina ya que la visibilidad aumenta a 2000 m permitiendo que las aeronaves puedan realizar sus procedimientos con normalidad.

Es interesante este caso de estudio ya que suceden varios fenómenos meteorológicos de interés como la niebla y la neblina. Al realizar el análisis sinóptico y de superficie de las condiciones a escala local de la ocurrencia de estos fenómenos, se observa que suceden gracias a que no se presenta ningún fenómeno de escala sinóptica que afecte las condiciones del tiempo atmosférico el sur occidente del país. Del hemisferio sur no hay fenómenos significativos (Figura 39, 51, 52). La ZCIT se ubica al norte del territorio colombiano es decir que no es necesario que se posicione sobre el aeródromo EEC para que favorezca la ocurrencia niebla o la neblina. Se aprecia una vaguada a los 10 grados de latitud norte y a 54 grados de longitud oeste, próxima a ingresar al continente la cual en los 2 o 3 días siguientes puede afectar las condiciones al oriente del país con su transporte de humedad y siendo gatillador o disparador de la convección profunda en esta región del país.

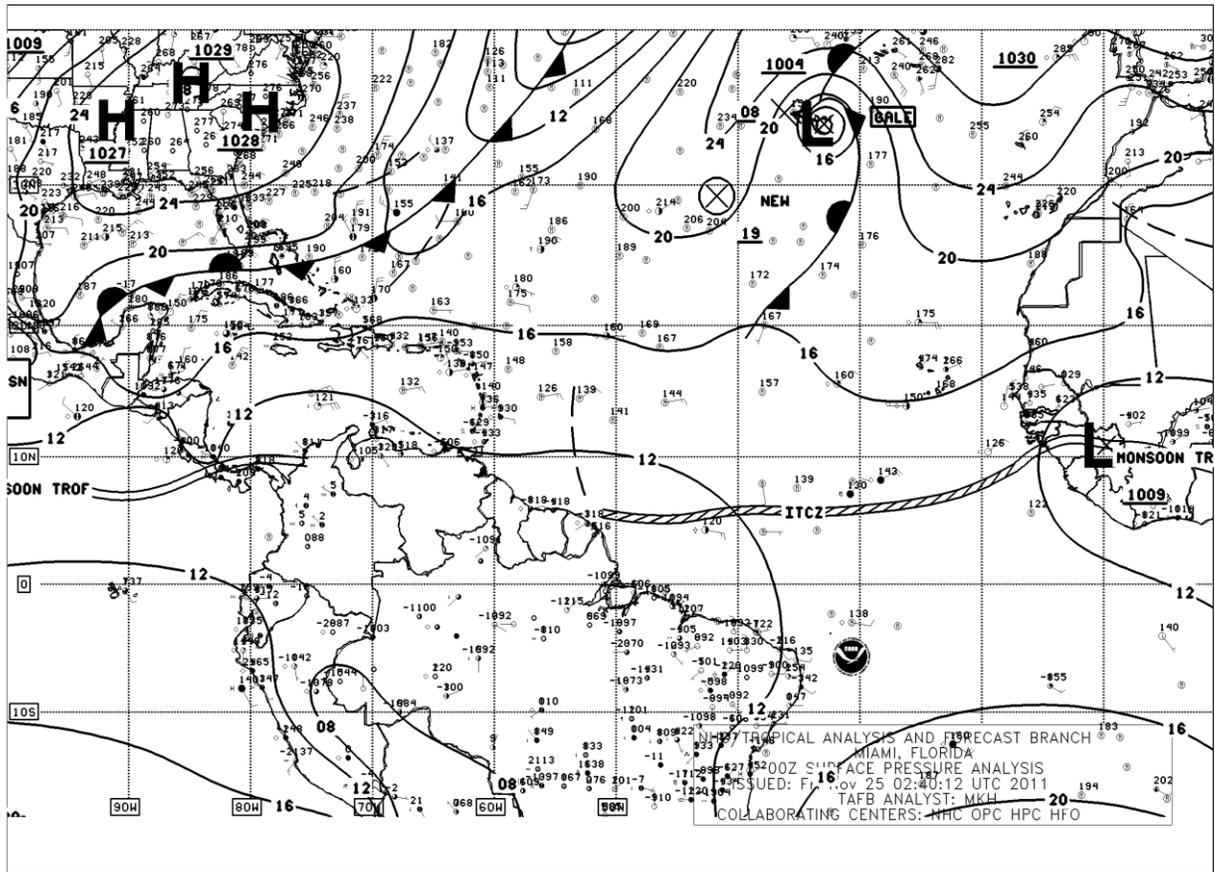


Figura 39: Análisis de superficie del 25 de noviembre de 2011, 12:00 UTC (07:00 HLC) (NWS DIFAX Weather Map Archive, 2014)

La ZCIT debilitada se ubica sobre los 10 grados norte costado occidente del territorio colombiano detonando la convección (Figura 40-a) sobre el centro y oriente del mar Caribe colombiano, favoreciendo precipitaciones sobre gran parte de la costa norte y generando sistemas convectivos sobre los departamentos de Cesar y Norte de Santander y Bolívar, la nubosidad de desarrollo vertical se aprecia más fácilmente en la Figura 40-b la cual muestra los contenidos de humedad en las capas altas de la atmósfera.

Al sur de Guainía y nororiente de Vaupés se aprecia nubosidad baja y media lo que genera lluvias moderadas en el sector. El resto del país presenta poca

nubosidad de tipo estratiforme y alguna nubosidad orográfica sobre la cordillera occidental.

Sobre el área del aeródromo EEC y el departamento del Caquetá se observa nubosidad baja, escasa y de tipo estratiforme, desde las 03:15 UTC (10:15 HLC) se han mantenido estas condiciones (Anexo Imágenes), el cielo despejado favorece el enfriamiento radioactivo y de acuerdo con la descripción del evento el viento predominante se mantuvo en calma durante toda la ocurrencia del evento, lo que aumentó la probabilidad de formación de niebla y neblina.

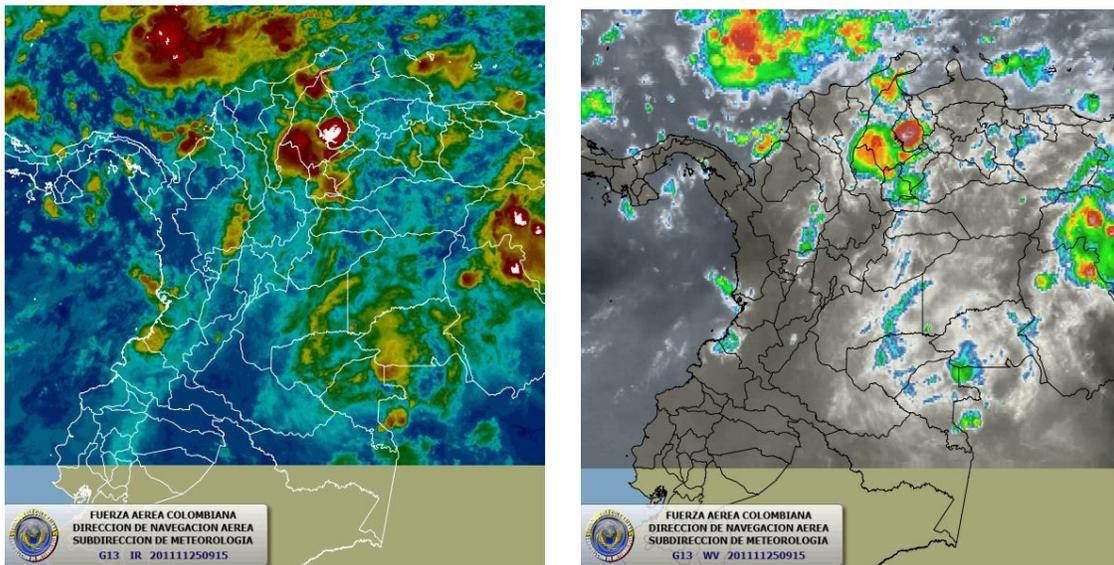


Figura 40: Imágenes satelitales de los canales infrarrojo y vapor de agua tomadas del satélite GOES-13, para el 25 de noviembre de 2011 a las 09:15 UTC (04:15 HLC)

Es interesante observar el resultado de la evolución de la visibilidad (Figura 41) en este caso de estudio ya que no se aumento una constante por más de 9 horas de las 96 analizadas, sino que por el contrario fue disminuida en gran parte del lapso por fenómenos de tiempo presente como lloviznas, lluvia y en especial por

niebla o neblina ya que fue reducida por debajo de los 50 metros en varias horas afectando la operación del aeródromo EEC.

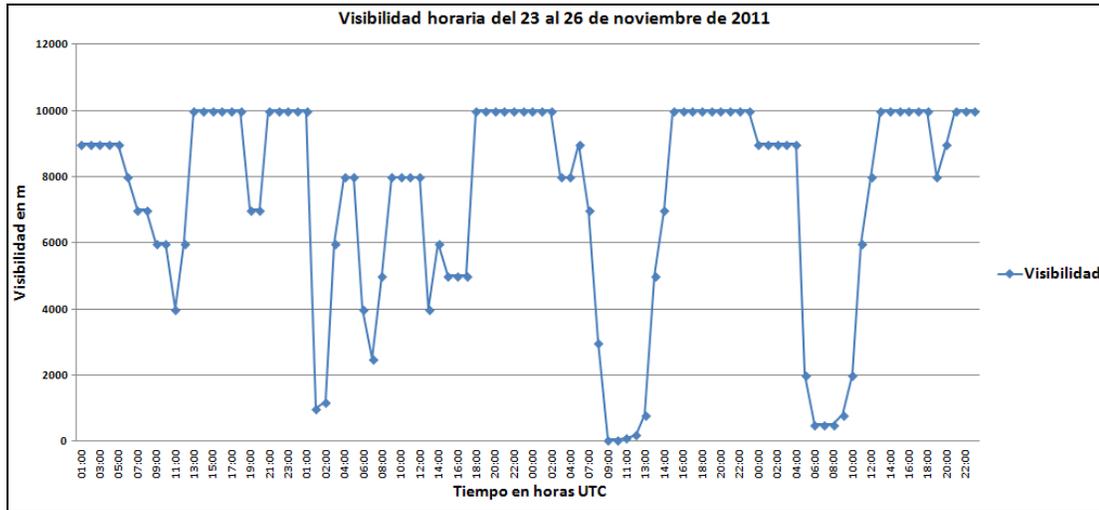


Figura 41: Evolución horaria de la visibilidad observada en el EEC. Iniciando el 23 de noviembre de 2011 a las 00:00 UTC (19:00 HLC) hasta el 26 de noviembre de 2011 a las 22:00 UTC (17:00 HLC).

Complementando este análisis se verificaron los datos de viento observado (Figura 42) obteniendo como resultado que en los lapsos donde se presentó la niebla: 09:00 UTC (04:00 HLC) a 13:00 UTC (08:00 HLC) del 25 de noviembre de 2011 y de 06:00 UTC (01:00 HLC) (20:00 UTC) del 26 de noviembre de 2011, la intensidad del viento es cero (calma).

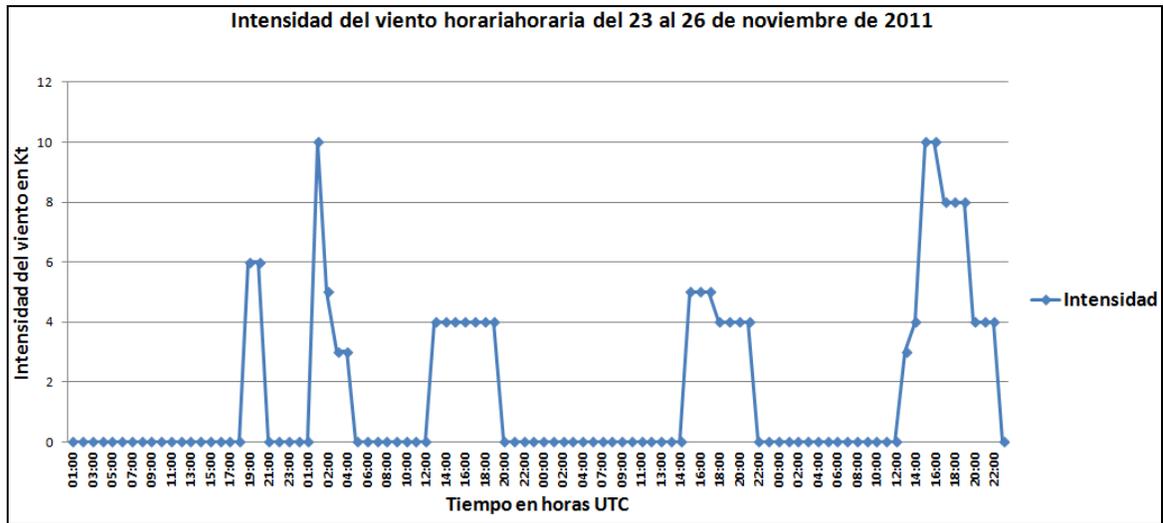


Figura 42: Evolución horaria de la intensidad del viento observado en el EEC. Iniciando el 23 de noviembre de 2011 a las 00:00 UTC (19:00 HLC) hasta el 26 de noviembre de 2011 a las 22:00 UTC (17:00 HLC).

El equilibrio radiativo se ha analizado en la (Figura 43), denotando una subestimación de los flujos de onda corta en el pronóstico del 24 al 27 de noviembre de 2011 (48 horas) del modelo WRF 2.1.1, encontrando que el balance radiativo no es confiable, mientras que los flujos de calor de onda larga representan y confirman el espesor de la capa de nubes presentes al momento de la ocurrencia de los fenómenos.

Al igual que en los dos casos anteriores en el análisis de flujos de energía se evidencia que el modelo WRF 2.1.1 en 12 horas de simulación, los valores simulados son cero (0) en todas las variables de energía, implicando que si el fenómeno de niebla o neblina se presenta en estas horas no va a ser posible detectar la ocurrencia de niebla o neblina.

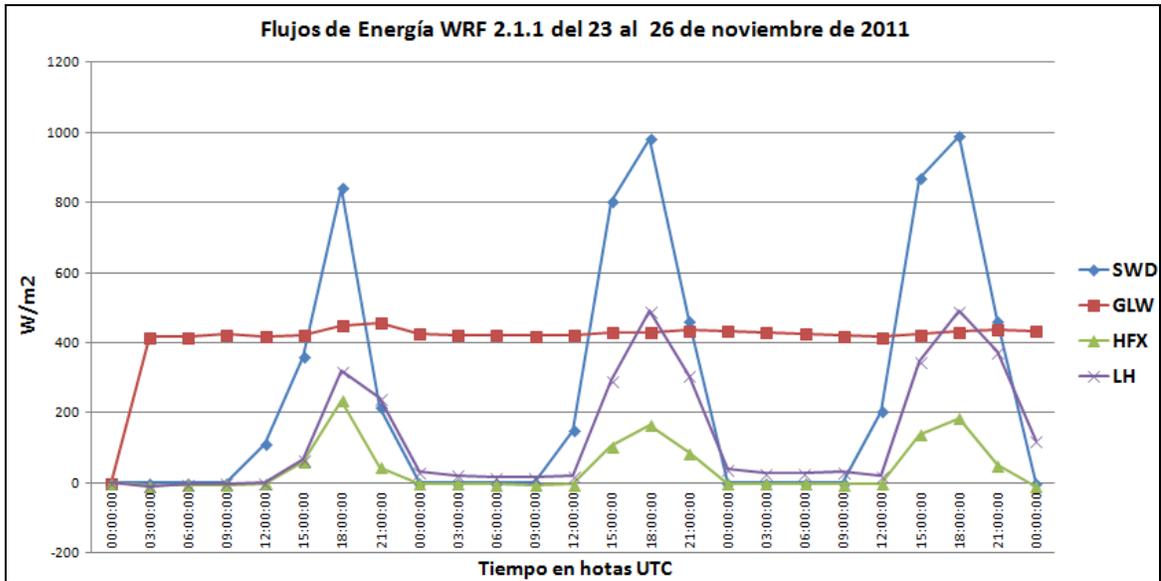


Figura 43: Flujos de energía del WRF 2.1.1 de los días 23 al 26 de noviembre del 2011 para el aeródromo EEC.

Continuando con las variables simuladas por el modelo WRF 2.1.1, los datos de temperatura mantienen el comportamiento de acuerdo al ciclo diurno dificultando la detección de temperaturas bajas asociadas a la ocurrencia de niebla y neblina. Al no contar con datos observados no es posible comparar los valores simulados (Figura 44).

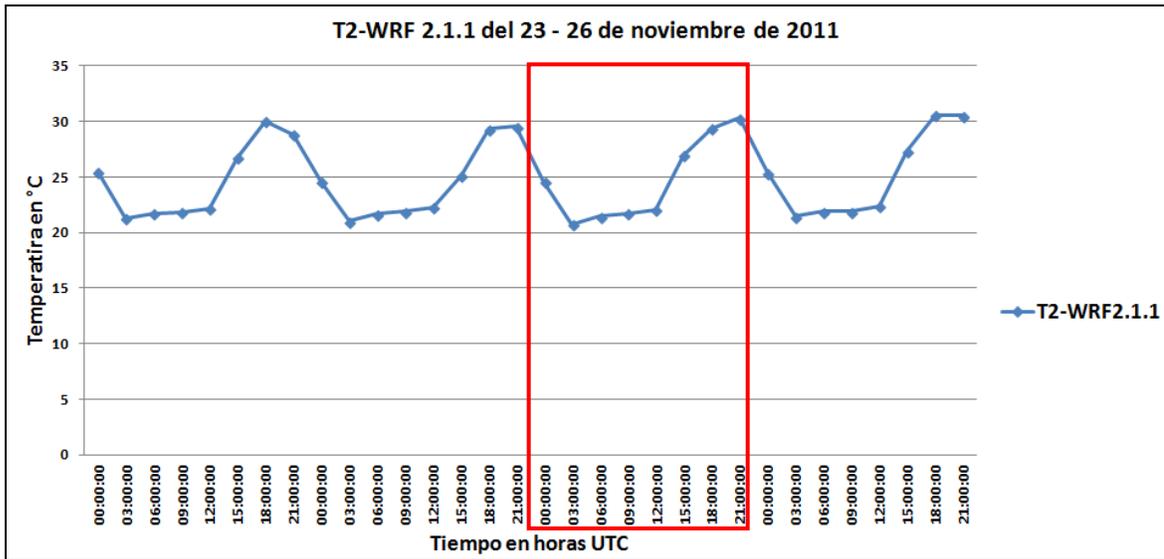


Figura 44: Temperatura a 2 m del WRF 2.1.1 cada tres horas de los días 23 al 26 de noviembre del 2011 para el aeródromo EEC.

El radiosondeo realizado el 25 de noviembre a las 12:00 UTC (07:00 HLC) en el aeródromo EEC (Figura 45) muestra saturación en capas bajas de la atmósfera dando como resultado la presencia de niebla o neblina. Al estar separadas las isolíneas de temperatura y de temperatura del punto de rocío en las capas medias y altas de la atmósfera indican que no hay nubosidad significativa para el desarrollo de las operaciones aéreas en esas alturas.

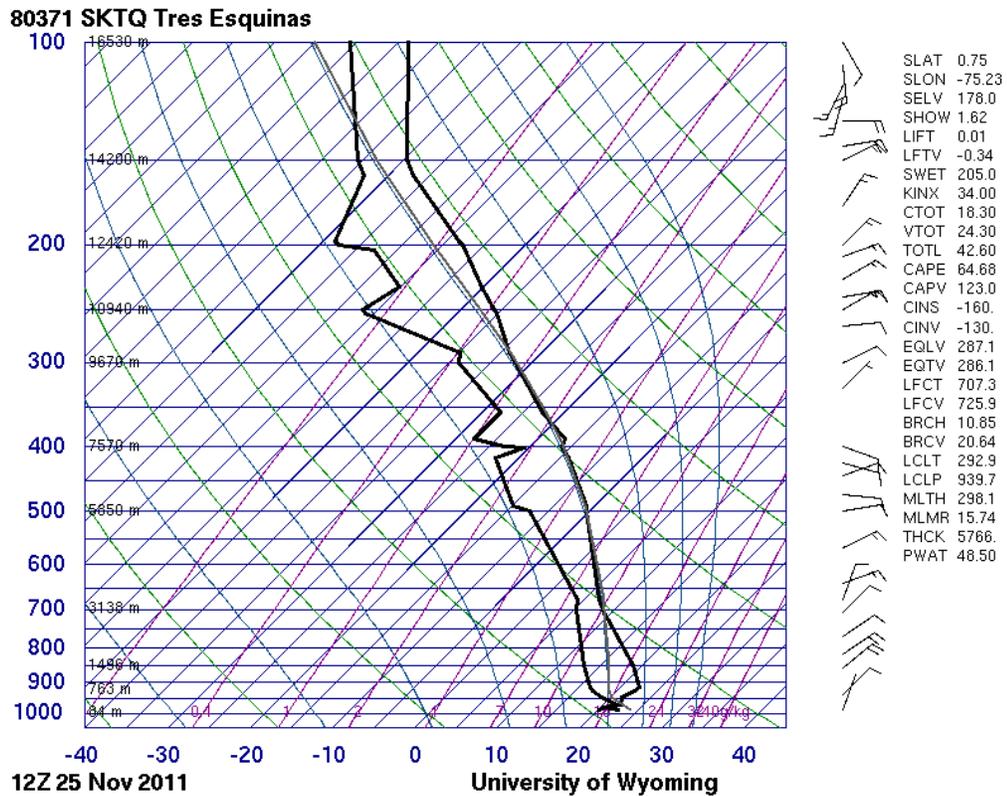


Figura 45: Radiosondeo realizado en el aeródromo EEC, con el Sistema de Sondeo Atmosférico código OMM 80371, del 25 de noviembre de 2011 a las 12 UTC (07:00 HLC), diagrama Skew-T tomado de Universidad de Wyoming, 2011.

La sección temporal generada para este caso de estudio demuestra movimientos subsidentes en el comportamiento de viento en capas medias de la atmósfera lo que inhibe la formación de nubosidad convectiva y la humedad existente en capas bajas la concentra como nubosidad estratiforme asociada a la niebla o neblina. Sin embargo, en la figura 46 las nubes están en capas altas, siendo errónea esta información ya que en las imágenes satelitales no se observan formaciones convectivas.

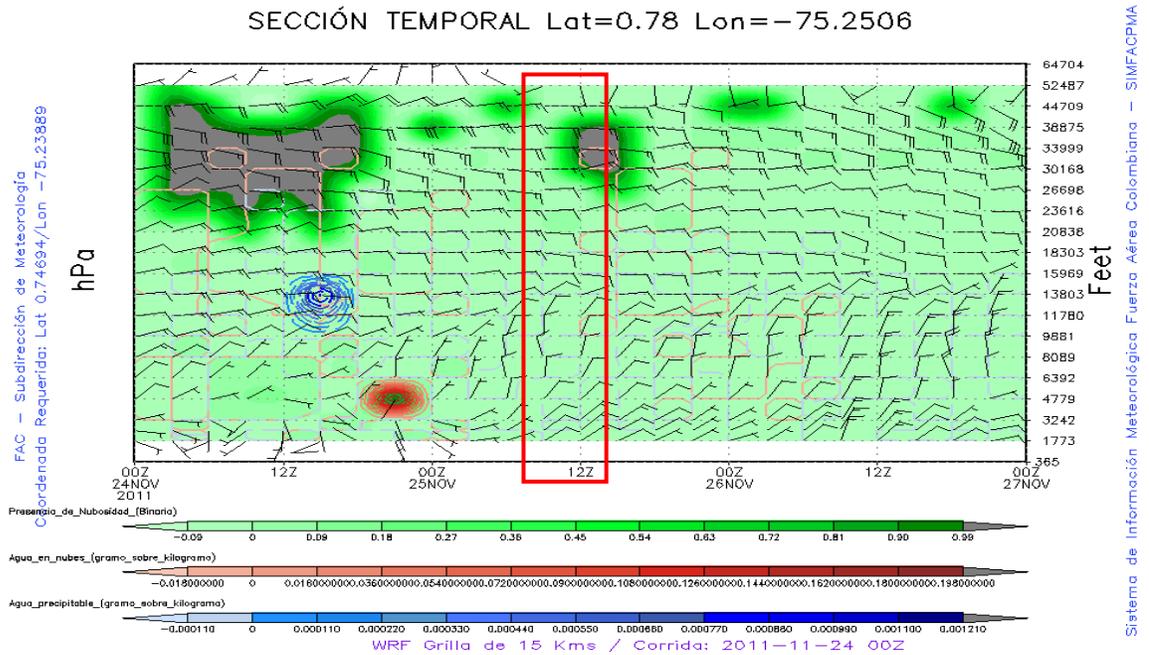


Figura 46: Sección temporal generada por la simulación de las 00:00 UTC del modelo WRF 2.1.1 el día 24 de noviembre de 2011.

## 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

- El conocimiento previo de la aparición de fenómenos meteorológicos tales como niebla y neblina permite aprovechar estas horas meteorológicamente no aeronavegables en actividades de instrucción y/o preparación de lecciones de vuelo posteriores. De igual manera contribuye a la disminución de los factores de riesgo en la ocurrencia de accidentes aéreos.
- Con base en el análisis de los casos de estudio se puede concluir que la capacidad del modelo numérico WRF en su versión 2.1.1 para el pronóstico o simulación de niebla o neblina en el aeródromo EEC es baja, sobrestimando las variables temperatura, viento en superficie y los flujos de energía.
- Al comparar los datos observados con los simulados por el modelo WRF versión 2.1.1 es posible determinar que el grado de acierto en la detección de niebla o neblina es bajo, puesto que en ninguno de los casos de estudio se detectaron estos fenómenos.
- El análisis de la escala sinóptica con ayuda de las cartas de superficie permitió confirmar como la circulación y dinámica del anticiclón del Atlántico Norte y la ZCIT regulan la formación de niebla o neblina sobre el aeródromo

EEC. De esta forma se observa que en las épocas cuando el anticiclón está alejado del territorio colombiano y la ZCIT está ubicada al norte, se genera subsidencia en niveles bajos y medios inhibiendo la convección sobre el aeródromo EEC favoreciendo la ocurrencia de niebla o neblina.

- El análisis previo de las imágenes satelitales en todos sus canales (nefoanálisis), permite generar una tendencia o pronóstico a corto plazo y subjetivo de la ocurrencia de niebla o neblina.

#### **4.2 Recomendaciones**

- Se recomienda que el modelo WRF 2.1.1 tenga la capacidad de generar y almacenar datos simulados cada hora, ya que para la detección de fenómenos como niebla o neblina se requiere una resolución temporal más fina.
- El funcionamiento de las estaciones meteorológicas automáticas en los aeródromos debe ser continuo, por lo que para cualquier tipo de análisis meteorológico o climatológico los datos observados deben tener una continuidad y calidad óptima.
- Se recomienda agregar al modelo WRF 2.1.1 módulos que produzca mejores datos de temperatura, vientos, nubosidad y generar valores directamente de visibilidad.
- Teniendo en cuenta que la información de flujos de energía arrojada por el modelo WRF 2.1.1 no generó un valor agregado en el análisis y en la detección de fenómenos de niebla o neblina en el aeródromo EEC, se recomienda disminuir el tiempo de la simulación para obtener información más detallada en cuanto a balances de energía.

- Para una mejor detección de fenómenos de niebla o neblina por parte del modelo WRF 2.1.1, se recomienda almacenar en SIMFAC todas las variables generadas por el modelo, como por ejemplo el contenido de agua líquida analizado en la tesis de Masbou.

## A Cartas de superficie usadas para el análisis de información meteorológica de superficie

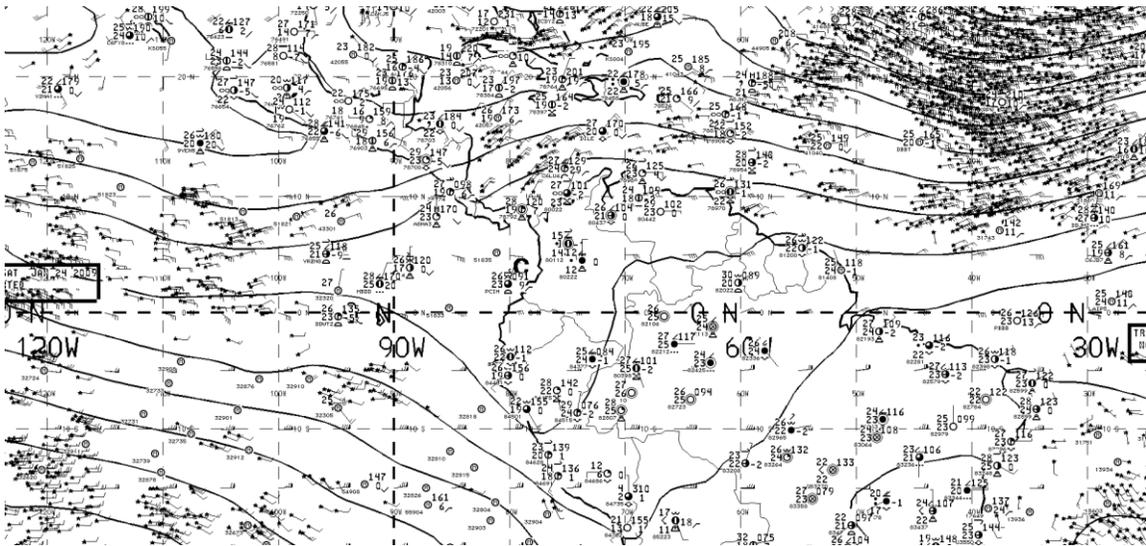


Figura 47: Carta del análisis de superficie para el 24 de enero de 2009 a las 00 UTC (19:00 HLC) (NOAA, 2014)

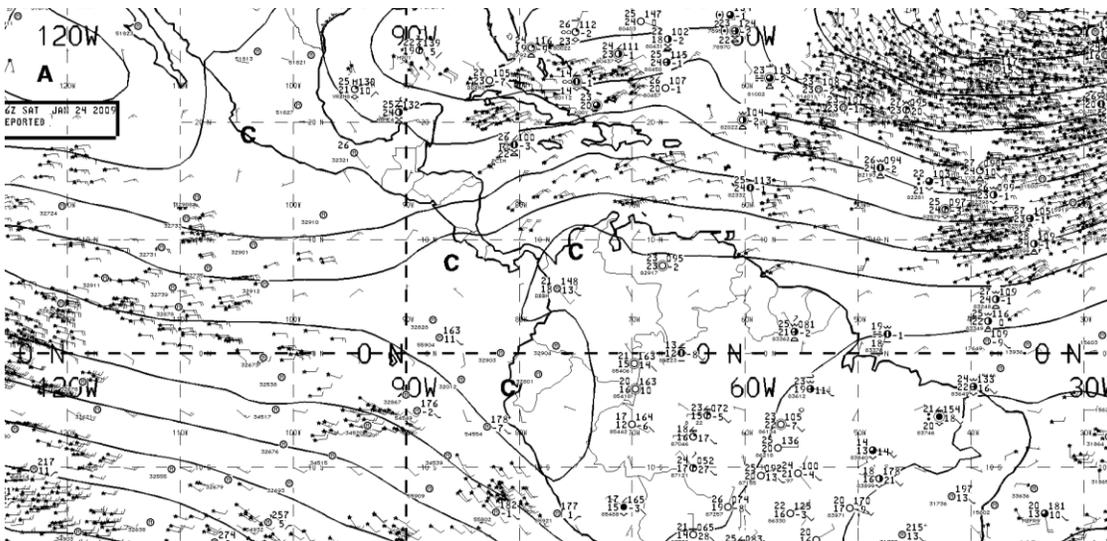


Figura 48: Carta del análisis de superficie para el 24 de enero de 2009 a las 06 UTC (01:00 HLC) (NOAA, 2014)

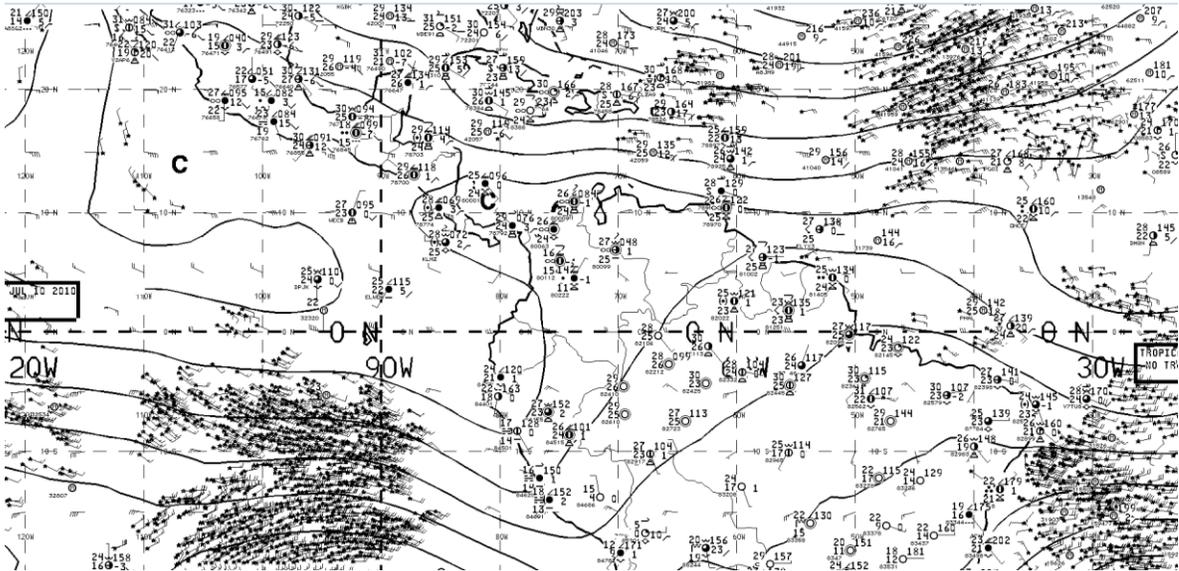


Figura 49: Carta del análisis de superficie para el 10 de julio de 2010 a las 00 UTC (19:00 HLC) (NOAA, 2014)

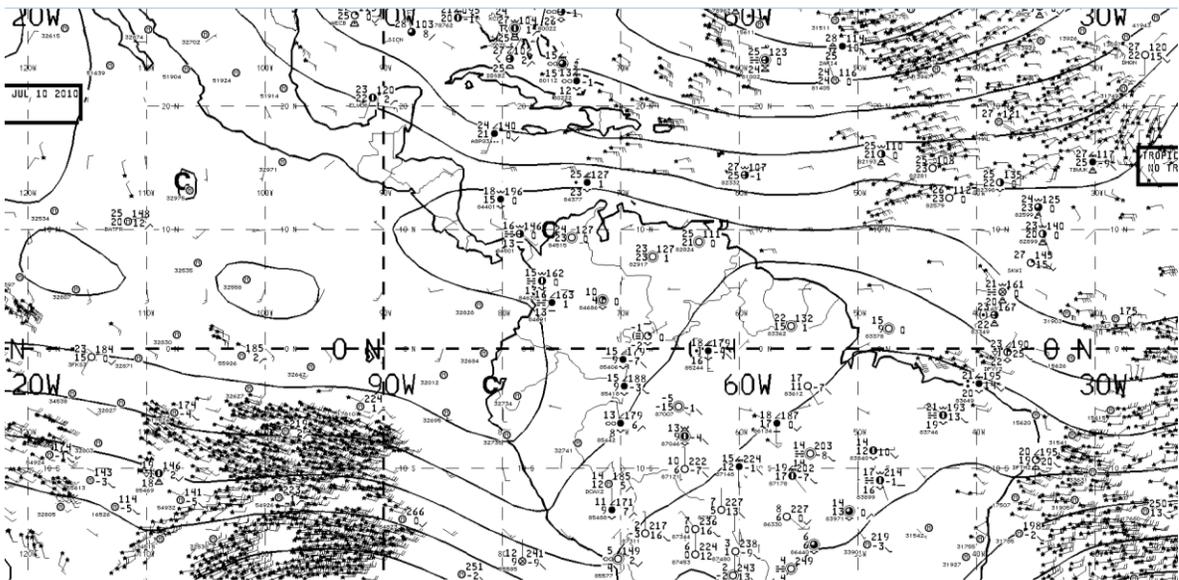


Figura 50: Carta del análisis de superficie para el 10 de julio de 2010 a las 06 UTC (01:00 HLC) (NOAA, 2014)

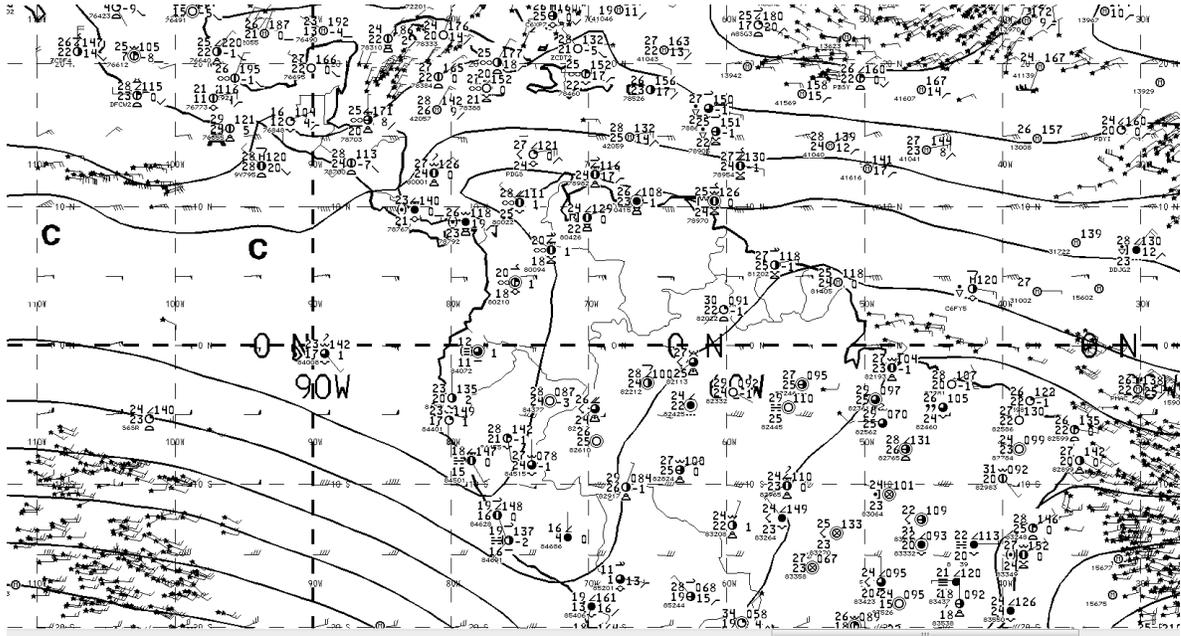


Figura 51: Carta del análisis de superficie para el 25 de noviembre de 2011 a las 00 UTC (19:00 HLC) (NOAA, 2014)

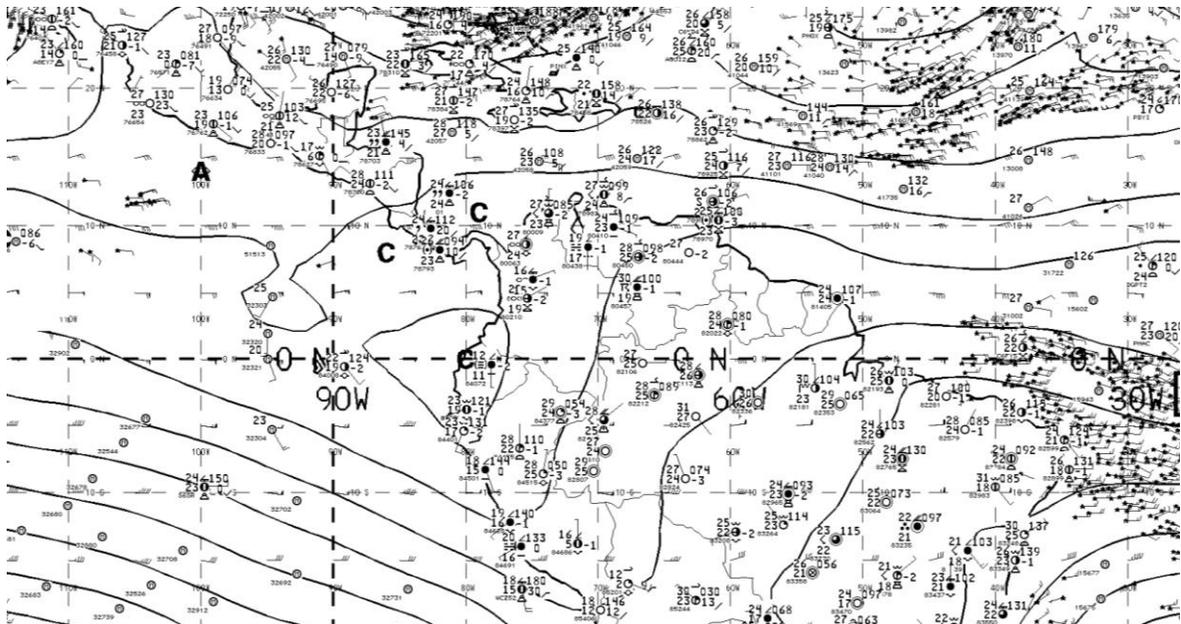


Figura 52: Carta del análisis de superficie para el 25 de noviembre de 2011 a las 06 UTC (01:00 HLC) (NOAA, 2014)

## Bibliografía

Enciclopedia Lexis 22. 1982: Tomo 20. Salvat editores. España

FAC, 1998: Manual de prevención de accidentes aéreos FAC 2 055 Público. Fuerza Aérea Colombiana. pp159. Bogotá, D.C.

<http://www.wrf-model.org/index.php>

Jiménez, 2004: Ciclos de los fenómenos meteorológicos adversos a la Operación bajo reglas de vuelo visual (VFR) en el aeródromo "Germán Olano"

Jiménez y Zea. 2001: Caracterización de la bruma, llovizna y lluvia como fenómenos meteorológicos adversos a la operación bajo reglas de vuelo visual (VFR) en el aeródromo "Germán Olano".

ENCICLOPEDIA LEXIS 22. 1982: Tomo 20. Salvat editores. España.

WMO. Secretariat of the World Meteorological Organization.

Llorente, F. 2003: La visibilidad y los factores meteorológicos que influyen en ella. Revista del aficionado a la Meteorología (RAM) octubre 2003.

Manual de normas y procedimientos Fuerza Aérea Colombiana, 2012.

---

Moreno y Gilaguinaliu, 1999: Análisis de la accidentalidad por causa meteorológica.

Pruppacher, H. and J. Klett, Microphysics of Clouds and Precipitation, Kluwer Pub. Inc, Boston, 1997.

WMO. 1992: Secretariat of the World Meteorological Organization. International meteorological vocabulary. 2: 784. Switzerland.

OACI. (1991), Organización de Aviación Civil Internacional: Manual de Operaciones Todo Tiempo. Montreal, Canadá. p 60.

OACI. (2004a), Organización de Aviación Civil Internacional: Anexo 3 al convenio sobre aviación civil internacional, Servicio Meteorológico Para la Navegación Aérea Internacional. Montreal, Canadá. p 50.

OACI. (2005), Organización de Aviación Civil Internacional: Manual de métodos para la observación y la información del alcance visual en la pista. Montreal, Canadá. p 200.

OMM. (2006), Organización Meteorológica Mundial: Manual de observación de nubes y otros meteoros. Ginebra, Suiza 2006.

Sistema de Información Meteorológico de la Fuerza Aérea Colombiana, 2011