



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Análisis de las condiciones meteorológicas asociadas con la presencia de sistemas convectivos en el aeropuerto El Dorado de Bogotá D.C

Ginna Lorena Aragón Rodríguez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá D.C, Colombia

2015

Análisis de las condiciones meteorológicas asociadas con la presencia de sistemas convectivos en el aeropuerto El Dorado de Bogotá D.C

Ginna Lorena Aragón Rodríguez

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencias Meteorológicas

Director (a):

Ph.D. Astrid Baquero Bernal

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá D.C, Colombia

2015

Le dedico este triunfo a Dios, a mi familia, a mi novio, a mis amigos y a la profesora Astrid quienes no dejaron de apoyarme para la consecución de este logro tan importante y significativo para mi vida profesional....

Agradecimientos

Infinitos agradecimientos a Dios por permitirme a través de este camino aprender tanto y conocer excelentes personas, a mi familia y a mi amado Juan Camilo por su paciencia, ayuda y por alentarme a terminar este gran esfuerzo, los amo, a la Fuerza Aérea Colombiana por la oportunidad brindada y por el último empujón y ayuda para hacerlo realidad.

Después de muchos intentos y esfuerzos, un largo camino recorrido en el que la meteorología no solo ha sido mi trabajo sino mi vida, he aprendido muchísimo y espero haber ayudado a todos los que me lo han solicitado.

Le doy las gracias a la profesora Astrid Baquero por apoyarme y guiarme, con paciencia y con mucho empeño de manera desinteresada y siendo un ejemplo a seguir.

Le doy las gracias a la profesora Gloria León por haberme apoyado desde el inicio hasta el final de este gran logro, a Oscar Guzmán por sus enseñanzas y su amistad.

Mil gracias a todos los que laboran en la Subdirección de Meteorología de la Fuerza Aérea Colombiana porque sin sus invaluable aportes y conocimientos brindados este sueño no se habría cumplido especialmente a Jesús Sanabria, Julián Pantoja y Miguel Serna por su apoyo técnico.

Mil gracias a la vida por este proceso, a mis amigas del colegio por alentarme a terminar este gran esfuerzo, a la Universidad Nacional y todos los profesores que me hicieron una mejor persona, a la Fuerza Aérea Colombiana y al IDEAM por la información suministrada y las facilidades brindadas para el desarrollo del proyecto.

Resumen

Se realizó un análisis de las condiciones meteorológicas bajo las cuales se presentan los sistemas convectivos en el Aeropuerto Internacional El Dorado (SKBO) de Bogotá, Colombia. Esto con el fin de contribuir al mejoramiento de la seguridad aérea y la toma de decisiones en el control de tránsito aéreo del aeródromo más importante de Colombia.

A través de la información de los reportes METAR y SPECI del período comprendido entre 1 julio de 2011 al 30 de junio de 2014, se establecieron las características meteorológicas generales bajo las cuales se presentan sistemas convectivos sobre SKBO teniendo en cuenta aspectos tales como duración, frecuencia, hora del día, mes del año. A partir de las características generales, se escogieron tres casos de estudio. Estos tres casos de estudio se analizaron usando los datos de reportes METAR y SPECI y Cartas de Análisis de Superficie de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), radiosondeos, imágenes de satélite del GOES - 13 de los canales visible, vapor de agua e infrarrojo y la información proveniente del modelo WRF 2.1.1 de la Fuerza Aérea Colombiana de las variables dirección e intensidad del viento, humedad relativa, presencia de nubosidad y precipitación.

Esto permitió confirmar patrones de circulación local propios de los eventos convectivos sobre SKBO, como el cambio de dirección del viento el cual permite la advección de humedad, que generan vigorosos sistemas convectivos sobre SKBO. Asimismo se logró determinar el desempeño del modelo WRF 2.1.1 para su pronóstico, encontrando un mejor desempeño de las simulaciones con un día de anticipación al evento.

Palabras Claves: Sistemas Convectivos, SKBO, modelo WRF 2.1.1, METAR, SPECI, GOES13, Tormentas, Cumulonimbus, Torrecúmulos.

Abstract

It was made the analysis of meteorological weather conditions in which the convective systems take place on the International Airport El Dorado (SKBO) from Bogota, Colombia in order to improve aerial safety and better decisions taken by air traffic control in the most important aerodrome from Colombia.

Through METAR and SPECI reports from the station between the period 1st July 2011 to June 30th 2014. Is been establish the meteorological general characteristics in which convective systems take place on SKBO, taking account aspects like duration, frequency, time of the day, month in the year. Through general characteristics, it has been chosen three study cases. Those three study cases has been analyzed using the data from METAR and SPECI reports, surface analysis charts from National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), radiosondes, the GOES-13 satellite imagery from channels visible (VIS), water vapor (WV) and infrared (IR) and information from WRF 2.1.1 model's outputs from Colombian Air Force the variables wind speed and direction, relative humidity, cloudiness presence and precipitation.

This allowed themselves confirm local circulation patterns in SKBO's convective events, such as changing wind direction which allows moisture advection from other sectors out of the city and enter the island to heat, generate violent convective systems especially on SKBO. It was also possible to determine the performance of the model WRF 2.1.1 on forecasting them, finding a better response in one day prior to the event.

Keywords: Convective Systems, SKBO, WRF Model v 2.1.1, METAR, SPECI, GOES13, Thunderstorms, Cumulonimbus, Towercumulus.

Contenido

	Pág.
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas	XXII
Lista abreviaturas.....	XXIII
Introducción	1
1. Aspectos generales	5
1.1 ¿Qué son los sistemas convectivos?	5
1.1.1 TORMENTA (TS)	7
1.1.2 CUMULONIMBUS (CB)	10
1.1.3 TORRECUMULOS (TCU)	11
1.2 Estado del arte	13
1.3 Formulación del problema	17
2. Aspectos teóricos	21
2.1 CIT Y ENSO	21
2.2 Fenómenos meteorológicos adversos para la operación de un aeródromo ...	26
2.3 Variables en reportes METAR y SPECI utilizadas	28
2.3.1 Temperatura del aire	28
2.3.2 Punto de Rocío y Humedad Relativa.....	29
2.3.3 Viento.....	29
2.3.4 Visibilidad Horizontal	30
2.3.5 Presión Atmosférica y QNH.....	30
2.4 Modelo WRF 2.1.1	31
3. Aspectos metodológicos.....	33
3.1 Área y período de estudio	33

XII **Análisis de las condiciones meteorológicas asociadas con la presencia de sistemas convectivos en el aeropuerto EL DORADO de Bogotá D.C**

3.2	Datos a utilizar.....	34
3.3	Metodología	36
4.	Resultados y análisis.....	37
4.1	Análisis de reportes METAR Y SPECI.....	37
4.1.1	Temperatura y punto de rocío de los reportes METAR y SPECI.....	39
4.1.2	Dirección e intensidad del viento de los reportes METAR y SPECI.....	43
4.1.3	Presión de los reportes METAR y SPECI	46
4.2	Ocurrencia de eventos relacionados con sistemas convectivos	47
4.2.1	Análisis de reportes METAR y SPECI que registran actividad convectiva.....	55
4.3	Casos de Estudio	59
4.3.1	Episodio 1, 22 de abril de 2014.....	59
4.3.2	Episodio 2, 22 de noviembre de 2011	81
4.3.3	Episodio 3, 25 de junio de 2013.....	103
5.	Conclusiones y recomendaciones	122
5.1	Conclusiones.....	122
5.2	Recomendaciones.....	125
A.	Anexos: Reportes metar y SPECI de los episodios.....	127
B.	Anexos: Imágenes de satélite	130
C.	Anexos: Corridas del modelo WRF 2.1.1 para el primer caso del 22 de abril de 2014.....	142
D.	Anexos: corridas del modelo WRF 2.1.1 para el segundo caso del 22 de noviembre de 2011.....	162
E.	Anexos: Corridas del modelo WRF 2.1.1 para el tercer caso del 25 de junio de 2013.....	193
	Bibliografía	209

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1: Modelo de una multicélula con embolsamiento pequeño de aire frío. Vista de arriba (A) y de lado (B)	8
Figura 2: Modelo de una multicélula pequeña con embolsamiento grande de aire frío	9
Figura 3: Cumulonimbus. Nube de desarrollo vertical en forma de yunque o seta, asociada a tormentas y chubascos (Michigan Technology Institute, 2010).....	11
Figura 4: Torrecúmulo. Nube que se caracteriza por la formación de torres en la cima de la misma, posee base plana y contornos definidos (Parafly, 2015).....	13
Figura 5: Representación esquemática de la Circulación del Aire en la Sabana de Bogotá, durante el desarrollo de tormentas eléctricas según Montoya y Eslava, 2000	15
Figura 6: Ubicación media de la ZCIT para los meses enero y julio (Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, 2015)	22
Figura 7: Condiciones normales en el Océano Pacífico (a) y con presencia del fenómeno El Niño (b) (Sakagami, 2009)	24
Figura 8: Condiciones atmosféricas y oceánicas del fenómeno La Niña	25
Figura 9: Aeropuerto Internacional El Dorado de Bogotá en el año 2007.	33
Figura 10: Dominios del modelo WRF 2.1.1 de la FAC, resaltado el dominio 2 empleado en esta tesis	35
Figura 11: Reportes METAR faltantes por hora del SKBO en el período del 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014	39
Figura 12: Promedios mensuales de la temperatura mínima, media y máxima en el SKBO en el período del 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014	39
Figura 13: a) Promedios mensuales multianuales de la temperatura del aire mínima, media y máxima (°C); b) temperatura máxima absoluta multianual (°C) y c) temperatura mínima absoluta multianual (°C) en el SKBO en el período de 1974 a 1998 según el IDEAM (http://bart.ideam.gov.co/cliciu/bogota/temperatura.htm)	41
Figura 14: Promedios mensuales de la temperatura del punto de rocío mínima, media y máxima en el SKBO en el período del 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014	42
Figura 15: Promedios mensuales de la temperatura del punto de rocío media en el SKBO en el período del 1 de enero de 1981 al 31 de diciembre de 2010	42
Figura 16: Rosa de los vientos de los reportes METAR y SPECI del SKBO para el período del 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014.....	44
Figura 17: Frecuencia absoluta anual y frecuencia relativa multianual de la dirección de los vientos en reportes METAR y SPECI del SKBO para el período del 1 de julio de 2011	

al 30 de junio de 2014. (Donde NNN fueron reportes METAR sin dato de dirección del viento).....	45
Figura 18: Intensidad de los vientos en reportes METAR y SPECI del SKBO para el período del 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014. (Donde NN fueron reportes METAR sin dato de intensidad del viento).....	46
Figura 19: Promedios mensuales de la presión mínima, media y máxima en el SKBO en el período del 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014.....	47
Figura 20: Número de reportes METAR y SPECI en cada hora del día, con presencia de los fenómenos TCU, CB y TS en el SKBO en el período 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014.....	50
Figura 21: Número de reportes METAR y SPECI que reportaron, en cada mes del año, los fenómenos TCU, CB y TS en el SKBO en el período 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014.....	51
Figura 22: Cantidad de eventos mensuales en el SKBO en el período 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014.....	53
Figura 23: Número de eventos en el SKBO en el período 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014 según la duración en horas	54
Figura 24: Temperatura en el SKBO en el período 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014 en presencia de TCU, CB y TS	55
Figura 25: Dirección de los vientos en reportes METAR y SPECI del SKBO para el período del 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014 en presencia de TCU, CB y TS (Donde NNN fueron reportes METAR sin dato de dirección del viento)	57
Figura 26: Rosa de los vientos de los reportes METAR y SPECI del SKBO para el período del 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014 en presencia de TCU, CB y TS	58
Figura 27: Intensidad de los vientos en reportes METAR y SPECI del SKBO para el período del 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014 en presencia de TCU, CB y TS (Donde NN fueron reportes METAR sin dato de intensidad del viento)	58
Figura 28: Análisis de superficie para el 20 (a), 21 (b), 22 (c) y 23 (d) de abril de 2014, 00 UTC (NWS DIFAX Weather Map Archive, 2015).....	61
Figura 30: a) Visibilidad horizontal según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 20 de abril de 2014, 00 UTC al 23 de abril de 2014, 12 UTC b) Intensidad del viento según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 20 de abril de 2014, 00 UTC al 23 de abril de 2014, 12 UTC; c) Dirección del viento según METAR/SPECI del SKBO entre el 20 de abril de 2014, 00 UTC al 23 de abril de 2014, 12 UTC; d) Temperatura del aire y temperatura del punto de rocío según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 20 de abril de 2014, 00 UTC al 23 de abril de 2014, 12 UTC; e) Presión según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 20 de abril de 2014, 00 UTC al 23 de abril de 2014, 12 UTC	68
Figura 31: Diagrama SKEW-T del radiosondeo del SKBO para el 22 de abril de 2014, 12 UTC tomada de http://weather.uwyo.edu/cgi-	

bin/sounding?region=samer&TYPE=GIF%3ASKEWT&YEAR=2014&MONTH=04&FROM=2212&TO=2212&STNM=80222, 2015 69

Figura 32: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 22 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c) y 21 (d) UTC 72

Figura 33: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 22 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c) y 21 (d) UTC 73

Figura 34: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 22 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c) y 21 (d) UTC 74

Figura 35: Sección temporal del SKBO de la corrida del 22 de abril de 2014 a las 00 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas 81

Figura 36: Análisis de superficie para el a) 20, b) 21, c) 22 y d) 23 de noviembre de 2011, 00 UTC (NWS DIFAX Weather Map Archive, 2015) 85

Figura 37: Imágenes de los canales: visible a), vapor de agua b) infrarrojo c). Del satélite GOES-13 el 22 de noviembre de 2011 a las 19:15 UTC (16:15 HLC) en donde se presentó el fenómeno más violento y el cierre del SKBO 90

Figura 38: a) Visibilidad horizontal según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 20 de noviembre de 2011, 00 UTC al 23 de noviembre de 2011, 12 UTC, b) Dirección del viento según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 20 de noviembre de 2011, 00 UTC al 23 de noviembre de 2011, 12 UTC, c) Intensidad del viento según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 20 de noviembre de 2011, 00 UTC al 23 de noviembre de 2011, 12 UTC, d) Temperatura del aire y temperatura del punto de rocío según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 20 de noviembre de 2011, 00 UTC al 23 de noviembre de 2011, 12 UTC, e) Presión según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 20 de noviembre de 2011, 00 UTC al 23 de noviembre de 2011, 12 UTC, 12 UTC 92

Figura 39: Diagrama SKEW-T del radiosondeo del SKBO para el 22 de noviembre de 2011, 12 UTC (<http://weather.uwyo.edu/cgi-bin/sounding?region=samer&TYPE=GIF%3ASKEWT&YEAR=2014&MONTH=04&FROM=2212&TO=2212&STNM=80222, 2015>) 93

Figura 40: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 22 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c), 21 UTC (d) y 23 noviembre de 2011 a las 00 UTC (e)..... 95

Figura 41: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 22 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c), 21 UTC (d) y 23 noviembre de 2011 a las 00 UTC (e)..... 96

Figura 42: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 22 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c), 21 UTC (d) y 23 noviembre de 2011 a las 00 UTC (e)..... 97

Figura 43: Sección temporal del SKBO de la corrida del 22 de noviembre de 2011 a las 00 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas	102
Figura 44: Análisis de superficie para el 23 (a), 24 (b) y 25 (c) de junio de 2013, 00 UTC (NWS DIFAX Weather Map Archive, 2015).....	107
Figura 45: Imágenes de los canales: infrarrojo a), vapor de agua b) y visible c). Del satélite GOES-13 el 25 de junio de 2013 a las 19:45 donde se observa lo reportado como reciente en el METAR de las 20:00 UTC (15:00 HLC) en donde se presentó el fenómeno sobre el aeródromo de RA en el SKBO.....	109
Figura 46: a) Visibilidad horizontal según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 23 de junio de 2013, 00 UTC y el 26 de junio de 2013, 12 UTC; b) Dirección del viento según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 23 de junio de 2013, 00 UTC y el 26 de junio de 2013, 12 UTC; c) Intensidad del viento según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 23 de junio de 2013, 00 UTC y el 26 de junio de 2013, 12 UTC; d) Presión según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 20 de abril de 2014, 00 UTC al 23 de abril de 2014, 12 UTC; e) Temperatura del aire y temperatura del punto de rocío según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 23 de junio de 2013, 00 UTC y el 26 de junio de 2013, 12 UTC	112
Figura 47: Diagrama SKEW-T del radiosondeo del SKBO para el 25 de junio de 2013, 12 UTC	113
Figura 48: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 24 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 a las 15 UTC (a), 18 UTC (b) y 21 UTC (c)	115
Figura 49: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 24 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 a las 15, 18, 21 UTC	116
Figura 50: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 24 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 a las 15 UTC (a), 18 UTC (b) y 21 UTC (c)	117
Figura 51: Sección temporal del SKBO de la corrida del 25 de junio de 2013 a las 00 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas	121
Figura 52: Imágenes de satélite del canal visible desde las 18:15 UTC hasta las 22:15 UTC del 22 de abril de 2014	130
Figura 53: Imágenes de satélite del canal infrarrojo desde las 18:15 UTC hasta las 22:15 UTC del 22 de abril de 2014	131
Figura 54: Imágenes de satélite del canal vapor de agua desde las 18:15 UTC hasta las 22:15 UTC del 22 de abril de 2014.....	132
Figura 55: Imágenes de satélite del canal visible desde las 14:15 UTC hasta las 22:15 UTC del 22 de noviembre de 2011.....	134
Figura 56: Imágenes de satélite del canal infrarrojo desde las 14:15 UTC del 22 de noviembre de 2011 hasta las 01:45 UTC del 23 de noviembre de 2011	136

Figura 57: Imágenes de satélite del canal vapor de agua desde las 14:15 UTC del 22 de noviembre de 2011 hasta las 01:45 UTC del 23 de noviembre de 2011 138

Figura 58: Imágenes de satélite del canal visible desde las 16:15 UTC hasta las 21:45 UTC del 25 de junio de 2014 139

Figura 59: Imágenes de satélite del canal infrarrojo desde las 16:15 UTC hasta las 21:45 UTC del 25 de junio de 2014 140

Figura 60: Imágenes de satélite del canal vapor de agua desde las 16:15 UTC hasta las 21:45 UTC del 25 junio de 2014 141

Figura 61: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 20 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12, 15, 18 y 21 UTC 143

Figura 62: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 20 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12, 15, 18 y 21 UTC 144

Figura 63: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 20 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12, 15, 18 y 21 UTC 145

Figura 64: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 20 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12, 15, 18 y 21 UTC 146

Figura 65: de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 20 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12, 15, 18 y 21 UTC 147

Figura 66: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 20 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12, 15, 18 y 21 UTC 148

Figura 67: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 21 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12, 15, 18 y 21 UTC 149

Figura 68: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 21 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12, 15, 18 y 21 UTC 150

Figura 69: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 21 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12, 15, 18 y 21 UTC 151

Figura 70: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 21 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12, 15, 18 y 21 UTC 152

Figura 71: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 21 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12, 15, 18 y 21 UTC 153

Figura 72: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 21 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12, 15, 18 y 21 UTC 154

Figura 73: Sección temporal del SKBO de la corrida del 20 de abril de 2014 a las 00 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas. 155

Figura 74: Sección temporal del SKBO de la corrida del 20 de abril de 2014 a las 12 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas. 156

Figura 75: Sección temporal del SKBO de la corrida del 21 de abril de 2014 a las 00 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas. 157

Figura 76: Sección temporal del SKBO de la corrida del 21 de abril de 2014 a las 12 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas. 158

XVIII **Análisis de las condiciones meteorológicas asociadas con la presencia de sistemas convectivos en el aeropuerto EL DORADO de Bogotá D.C**

Figura 77: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 20 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 entre las 15 y las 21 UTC.....	159
Figura 78: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 20 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 entre las 15 y las 21 UTC.....	159
Figura 79: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 21 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 entre las 15 y las 21 UTC.....	160
Figura 80: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 21 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 entre las 15 y las 21 UTC.....	160
Figura 81: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 22 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 entre las 15 y las 21 UTC.....	161
Figura 82: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 20 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c) y 21 UTC (d)	163
Figura 83: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 20 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c) y 21 UTC (d)	164
Figura 84: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 20 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c) y 21 UTC (d)	165
Figura 85: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 20 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c), 21 UTC (d) y 23 noviembre de 2011a las 00 UTC (e)	167
Figura 86: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 20 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c), 21 UTC (d) y 23 noviembre de 2011a las 00 UTC (e)	169
Figura 87: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 20 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c), 21 UTC (d) y 23 noviembre de 2011a las 00 UTC (e)	171
Figura 88: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 21 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c), 21 UTC (d) y 23 noviembre de 2011a las 00 UTC (e)	173
Figura 89: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 21 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c), 21 UTC (d) y 23 noviembre de 2011a las 00 UTC (e)	175

Figura 90: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 21 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c), 21 UTC (d) y 23 noviembre de 2011 a las 00 UTC (e)..... 177

Figura 91: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 21 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c), 21 UTC (d) y 23 noviembre de 2011 a las 00 UTC (e)..... 179

Figura 92: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 21 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c), 21 UTC (d) y 23 noviembre de 2011 a las 00 UTC (e)..... 181

Figura 93: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 21 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c), 21 UTC (d) y 23 noviembre de 2011 a las 00 UTC (e)..... 183

Figura 94: Sección temporal del SKBO de la corrida del 20 de noviembre de 2011 a las 00 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas 184

Figura 95: Sección temporal del SKBO de la corrida del 20 de noviembre de 2011 a las 12 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas. 185

Figura 96: Sección temporal del SKBO de la corrida del 21 de noviembre de 2011 a las 00 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas. 186

Figura 97: Sección temporal del SKBO de la corrida del 21 de noviembre de 2011 a las 12 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas. 187

Figura 98: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 20 de noviembre de 2011, para el 22 de noviembre de 2011 entre las 18 UTC (a) y las 21 UTC (b) 188

Figura 99: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 20 de noviembre de 2011, para el 22 de noviembre de 2011 a las 18 UTC (a), 21 UTC (b) y 00 UTC (c) y las 03 UTC (d) del 23 de noviembre de 2011 189

Figura 100: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 21 de noviembre de 2011, para el 22 de noviembre de 2011 entre las 18 UTC (a), 21 UTC (b) y 00 UTC (c) y las 03 UTC (d) del 23 de noviembre de 2011 190

Figura 101: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 21 de noviembre de 2011, para el 22 de noviembre de 2011 entre las 18 UTC (a), 21 UTC (b) y 00 UTC (c) y las 03 UTC (d) del 23 de noviembre de 2011 191

Figura 102: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 22 de noviembre de 2011, para el 22 de noviembre de 2011 entre las 18 UTC (a), 21 UTC (b) y 00 UTC (c) y las 03 UTC (d) del 23 de noviembre de 2011 192

Figura 103: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 23 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 a las 15 UTC (a), 18 UTC (b) y 21 UTC (c)	194
Figura 104: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 23 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 a las 15 UTC (a), 18 UTC (b) y 21 UTC (c)	195
Figura 105: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 23 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 a las 15 UTC (a), 18 UTC (b) y 21 UTC (c)	196
Figura 106: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 23 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 a las 15 UTC (a), 18 UTC (b) y 21 UTC (c)	197
Figura 107: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 23 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 a las 15 UTC (a), 18 UTC (b) y 21 UTC (c)	198
Figura 108: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 23 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 a las 15 UTC (a), 18 UTC (b) y 21 UTC (c)	199
Figura 109: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 24 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 a las 15 UTC (a), 18 UTC (b) y 21 UTC (c)	200
Figura 110: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 24 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 a las 15 UTC (a), 18 UTC (b) y 21 UTC (c)	201
Figura 111: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 24 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 a las 15 UTC (a), 18 UTC (b) y 21 UTC (c)	202
Figura 112: Sección temporal del SKBO de la corrida del 23 de junio de 2013 a las 00 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas.	203
Figura 113: Sección temporal del SKBO de la corrida del 23 de junio de 2013 a las 12 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas.	204
Figura 114: Sección temporal del SKBO de la corrida del 24 de junio de 2013 a las 00 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas.	205
Figura 115: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 23 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 entre las 18 UTC (a) y 21 UTC (b).....	206

Figura 116: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 23 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 entre las 18 UTC (a) y 21 UTC (b)	206
Figura 117: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 24 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 entre las 18 UTC (a) y 21 UTC (b)	207
Figura 118: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 25 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 entre las 18 UTC (a) y 21 UTC (b)	207

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1: Variables de reportes METAR y SPECI utilizadas para el análisis de las condiciones meteorológicas bajo las cuales se presentan sistemas convectivos dentro del SKBO.....	37

Lista abreviaturas

Abreviatura	Término
--------------------	----------------

AMHS:	ATS Message Handling System
-------	-----------------------------

BKN.	Fragmentado
------	-------------

CB:	Cumulonimbus
-----	--------------

DZ:	Llovizna
-----	----------

ENSO:	El Niño Oscilación del Sur
-------	----------------------------

FEW:	Pocas
------	-------

FG:	Niebla
-----	--------

FT:	Pies, medida de longitud del sistema inglés.
-----	--

HZ:	Bruma
-----	-------

IMC:	Condiciones meteorológicas de vuelo por instrumentos
------	--

KT:	nudos
-----	-------

LTNG:	Rayo
-------	------

METAR:	Informe meteorológico de rutina para la aviación
--------	--

OVC:	Cubierto
------	----------

RA:	Lluvia
-----	--------

SCT:	Disperso
------	----------

SKBO:	Código OACI del Aeropuerto Internacional El Dorado de Bogotá
-------	--

SPECI:	Informe meteorológico especial de aeródromo
TCU:	Torrecúmulo
TS:	Tormenta
UAEAC:	Unidad Administrativa Especial de la Aeronáutica Civil de Colombia.
UTC:	Tiempo universal coordinado, en aviación también se habla de hora Zulu (Z) para hablar de la misma hora.
VC:	Vecindad o proximidad
VCSH:	Chubascos en la vecindad
VFR:	Reglas de vuelo visual
ZCIT:	Zona de convergencia intertropical

Introducción

Según los reportes estadísticos de la Aeronáutica Civil (UAEAC, 2009 b) el uso de los servicios aéreos, incluyendo transporte de pasajeros, carga, correo, aerotaxis y fumigación, se ha aumentado en los últimos años, trayendo incrementos en los ingresos de las empresas y también del patrimonio de la nación. Las causas son la disminución del precio de los combustibles de aviación, la reducción de las tasas aeroportuarias e impuestos, el aumento de las promociones por parte de las empresas prestadoras de servicios y la reducción de las tarifas en general. Dichos acontecimientos a partir de 2007 vienen aumentando la cantidad de personas involucradas en la actividad aérea, tanto en vuelo como en tierra; pues con el aumento de las flotas aéreas y la introducción de nuevas empresas en el mercado, sobre todo a nivel nacional más que internacional, se han incrementado los servicios de mantenimiento de las aeronaves (UAEAC, 2009 a).

Para que se mantenga este progreso es preciso aumentar la productividad, la rentabilidad y la sostenibilidad de las empresas prestadoras de servicios aéreos, es preciso realizar una contribución para minimizar los riesgos que tiene una aeronave asociados a fenómenos atmosféricos adversos a la aviación tales como los sistemas convectivos.

En el Aeropuerto Internacional El Dorado se desarrollan la mayor cantidad de operaciones aéreas de toda Colombia, por esto es importante conocer las condiciones meteorológicas que puedan afectar el normal desarrollo de los vuelos que operan en el área terminal del Aeropuerto.

En el Aeropuerto Internacional El Dorado, cada dos minutos aproximadamente, hay un avión que se encuentra en la fase de despegue o aterrizaje. El volumen de pasajeros y carga civil que entra y sale del Aeropuerto es de 262.800 cientos de miles al año, además es elevado el número de vuelos relacionados con operaciones aéreas militares,

especialmente de transporte de personal y carga. Esto sugiere que los estudios que se realicen con el fin de conocer los sistemas convectivos que se presentan sobre este aeródromo tendrán un impacto positivo en el mejoramiento de la seguridad de los vuelos operados en éste.

Por otra parte, debido al temprano desarrollo de la aviación comercial en Colombia, nuestro país cuenta actualmente con grandes sistemas económicos que dependen, usan o se lucran del flujo continuo de aeronaves que vuelan entre diferentes y amplios puntos de la geografía sobre el territorio Colombiano, los estudios tendientes a determinar cómo los elementos y factores meteorológicos afectan la aeronavegación no han tenido el mismo impulso (Jiménez, 2004).

Cualquier retraso que se cause en el normal flujo de los vuelos, significa pérdidas millonarias tanto para el sector aeronáutico como para otros sectores de la economía que dependen del transporte aéreo porque el Aeropuerto el Dorado es el principal Aeropuerto del país y sin contar que es el aeródromo que más mercancía mueve en las operaciones diarias a nivel sudamericano (Airports Council International - ACI World Airport Traffic Report, 2013). Por lo anterior, es necesario realizar estudios que favorezcan mejores pronósticos para las condiciones meteorológicas más peligrosas para la aviación (en la sección 1.2 se habla acerca de cuáles son esas condiciones adversas), como son las que se presentan dentro de los sistemas convectivos.

El conocimiento de las características de la atmósfera favorables para la formación de los sistemas convectivos es de suma importancia con el fin de evitar posibles accidentes que se puedan presentar en las inmediaciones del Aeropuerto más activo de Colombia, que pueden poner en riesgo la vida de pasajeros y personal que labora en el mismo. Este trabajo busca contribuir con el avance del conocimiento acerca de los sistemas convectivos y la dinámica de los mismos en el Aeropuerto Internacional El Dorado de Bogotá.

De esta manera también se busca contribuir al conocimiento de la formación de sistemas convectivos dentro de Colombia y este trabajo constituye un nuevo elemento para la toma de decisiones en el planeamiento de vuelos nacionales e internacionales, es un punto de partida para mejorar los pronósticos de estos sistemas en un futuro cercano. El presente estudio analiza los sistemas convectivos que se presentan sobre el Aeropuerto El Dorado, basándose en la caracterización estadística del fenómeno y analizando casos

de estudio. Para esto se utilizaron datos de simulaciones hechas con el modelo numérico regional del tiempo WRF, y reportes METAR y SPECI del Aeropuerto, radio sondeos e imágenes satelitales.

La evolución de los sistemas convectivos es importante para comprender la dinámica del tiempo y el clima en una región tan dinámica como lo es la ecuatorial. Al conocer su evolución en el tiempo y tomar las medidas preventivas del caso se disminuirá la vulnerabilidad a eventos en los cuales las aeronaves se puedan ver involucradas en presencia de fenómenos severos a la aviación.

Otros estudios sobre Sistemas convectivos especialmente los de mesoescala se han desarrollado en el país y su influencia en la precipitación en Colombia, uno de ellos es el efectuado en el año 2000 por el profesor Gerardo Montoya en Bogotá y que habla de las masas de aire desde el río Magdalena a Bogotá que generan precipitación. Sin contar los números estudios del profesor Germán Poveda Jaramillo de la Universidad Nacional sede Medellín en precipitación a lo largo del país, (ejemplo: Poveda, 2004) y que hablan de la influencia de las tormentas y sistemas convectivos de mesoescala en los procesos de precipitación del país.

Sin embargo estos estudios se enfocan en la variable de precipitación y la influencia o el aporte de los SCM (sistemas convectivos de mesoescala) adicionalmente se han hecho para regiones de mesoescala y no un aeródromo como por ejemplo los desarrollados por Cárdenas, 2003 o Carvajal ,2011.

1. Aspectos generales

1.1 ¿Qué son los sistemas convectivos?

La convección es el transporte vertical de la masa y energía desde una superficie cálida hacia otras menos cálidas y es el movimiento ascendente del aire provocado principalmente por el efecto de calentamiento que ocasiona la radiación solar en la superficie terrestre, puede ser provocado por una baja presión o por confluencia en capas bajas y medias de la atmósfera. Es la transmisión del calor en virtud del desplazamiento del propio aire calentado. Este proceso es muy importante en la atmósfera para transportar el calor desde capas bajas hasta capas superiores (Larocca, 2014).

Cumulonimbus es una nube de tormenta es una nube de desarrollo vertical que va a generar una tormenta, para que se desarrolle se requiere de la combinación de condiciones especiales en la atmósfera, tales como (Solarte, 2007).

- Aire inestable caliente
- Algún tipo de fuerza ascensional (gatillador)
- Alto grado de humedad

Sistema convectivo es el fenómeno de lluvias torrenciales (Tullot, 2007). También es conocido como una perturbación mesoescalar que está formada por una gran masa de Cumulonimbus, que en algún momento coexiste con una masa nubosa estratificada. Se caracteriza por la enorme intensidad de precipitaciones que originan, cabe resaltar que su duración pocas veces alcanza las 24 horas (Met.Net, 2000).

El ciclo de vida de los sistemas convectivos se inicia cuando el cúmulo (nubes convectivas) se ha transformado ya en un cumulonimbus que puede llegar a tener hasta 10 km de altura. En el tope de la nube la temperatura puede ser muy baja (-20 °C o -30 °C). Esto favorece una intensa sobresaturación del aire que origina una gran cantidad de gotas de lluvia o de granizo, algunas de las cuales caerán en forma de precipitación.

Los sistemas más estudiados son los Sistemas Convectivos de Mesoescala. Son un conjunto de tormentas y nubes convectivas que se aglomeran en regiones con tamaños del orden de 10 a 100 km de radio aproximadamente y en donde las condiciones locales controlan los campos de temperatura y viento sobre las parcelas de aire. Por otra parte, una tormenta convectiva es pequeña como para ser localizada en los mapas meteorológicos sinópticos. Sin embargo cuando se tienen conglomerados de tormentas convectivas, es posible su observación mediante satélites y radares (Reyes, 2001).

El uso de imágenes de satélite ha servido para la clasificación y diferenciación de los Sistemas Convectivos y también ha sido una herramienta útil para definir su ciclo de vida. El Instituto Nacional de Meteorología de España a través de su publicación "Modelos Conceptuales a Mesoescala" (1999), muestra una clara disertación citando diferentes criterios de autores como Maddox (1980), Cotton & Anthes (1989), McAnelly et al. (1989) y propone de manera general las tres fases enunciadas a continuación.

En la etapa inicial, llamada de desarrollo o crecimiento del sistema convectivo, es sólo una nube cúmulos. En Colombia generalmente se habla de Torrecúmulo cuando una nube, con características de posible evolución a un sistema convectivo maduro en forma de torre, la nube pasa a estar formada por un cierto número de células, llegando a ocupar cientos de kilómetros en algunas ocasiones. Predominan los desarrollos convectivos fuertes (Zipser, 1982) y en las imágenes de satélite se observa un crecimiento más o menos rápido del área que ocupa hacia todas las direcciones de manera concéntrica.

En la etapa de madurez se observa una reducción en los valores de temperatura de los topes más fríos, registra convección profunda y se encuentra todavía una columna de humedad significativa. Esta condición esta seguida de un desgaste de la nube cuando desaparece la corriente ascendente que la alimentaba, junto con un enfriamiento de la tierra y la presencia de fuertes corrientes (Weisman, 1996), generando así la tormenta, provocando chubascos de gran intensidad que acaban por deshacer la nube.

La etapa de disipación, cuando acaba la tormenta, está marcada por el decaimiento de la convección, al tiempo que se crea un escudo de nubes de tipo estratiforme con topes más cálidos, el cual puede persistir durante un cierto tiempo. Algunas capas de cirrus o cirrostratos son los únicos restos de este extraordinario fenómeno de la naturaleza.

Los topes de las nubes cumulonimbus son nubes altos y están formados por partículas de hielo y confinadas en alturas superiores a 6000 m, que al subir hasta niveles en la atmósfera tan altos, se forman por congelación directa del vapor de agua. Estos topes pueden tener formas aplanadas, debido a los altos valores de la intensidad del viento que a estos niveles altos de la atmósfera se presentan, también son muy brillantes por su composición de cristales de hielo, lo que implica que su temperatura sea baja.

Los fenómenos adversos a la aviación relacionados con las nubes de tormenta son:

- Nubes de hielo o agua sobrefriada. (producen condiciones de engelamiento)
- Hidrometeoros.
- Electrometeoros.
- Reducción de la visibilidad.
- Turbulencia.

1.1.1 TORMENTA (TS)

Las tormentas son descargas eléctricas que en su mayoría se originan en nubes de tipo Cumulonimbus, las cuales van acompañadas de relámpagos (destellos luminosos) y un ruido seco o sordo que se conoce como trueno. En su mayoría las tormentas van acompañadas de chubascos (Carrascal, 2008).

Tormenta severa tipo pulso y tormenta multicelular

Las tormentas multicelulares pequeñas están conformadas por cierto número de células individuales que se encuentran muy cercanas entre sí. En este caso las células nuevas generalmente se inician antes de que las antiguas desaparezcan, es decir que normalmente las multicélulas tienden a vivir más que cualquier corriente ascendente individual (Frazer, 2015).

Multicélulas de escala de Tormenta con embolsamiento pequeño de aire frío

En este caso el inicio de nuevas células está dirigido por un mecanismo de forzamiento externo, entre los cuales se encuentran las ondas de gravedad (son alteraciones de la masa en forma ondulatoria cuya fuerza restauradora es la fuerza de gravedad de la tierra), calentamiento diferencial o un frente frío. Las células nuevas generalmente se forman a lo largo del eje de forzamiento (ver Figura 1) y fuera del embolsamiento de aire frío (Frazer, 2015).

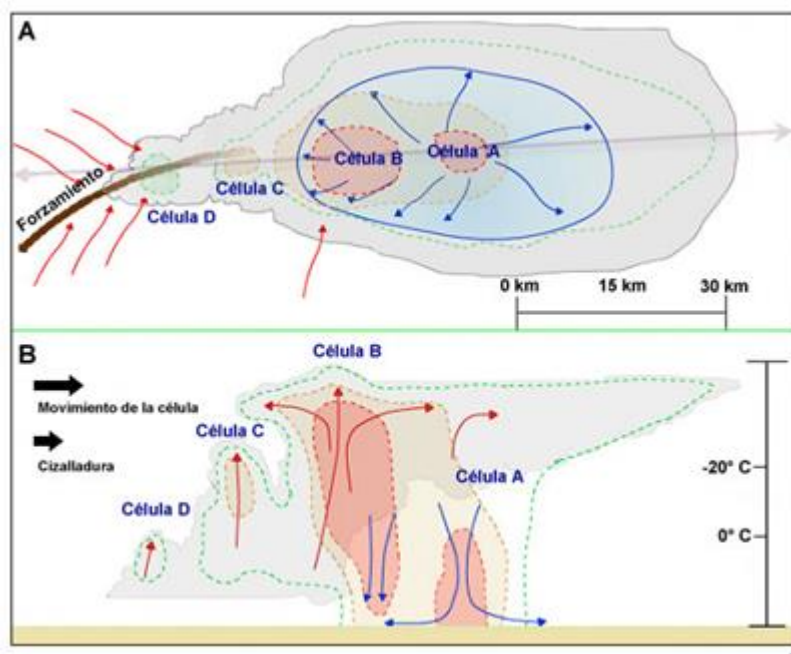


Figura 1: Modelo de una multicélula con embolsamiento pequeño de aire frío. Vista de arriba (A) y de lado (B)

En la Figura 1 se observa el embolsamiento pequeño de aire frío (en azul claro), la nube en sombreado gris, los valores de reflectividad con valores aproximados de 20, 40 y 50 dBZ representados con líneas de puntos café, verdes y rojas respectivamente. El flujo de entrada (salida) en los niveles bajos se representa con líneas de corriente rojas (azules). La flecha doble en (A) muestra el eje de corte vertical en (B). En (B) las flechas rojas representan las corrientes ascendentes y las azules las corrientes descendentes. (Frazer, 2015).

Multicélulas de escala de tormenta con embolsamiento grande de aire frío

En este caso el inicio de nuevas células está dirigido por el embolsamiento de aire frío del sistema. La generación de una nueva célula se forma principalmente a lo largo del borde del embolsamiento de aire frío conocido como frente de racha, el cual está modulado por factores ambientales como la inestabilidad o la cizalladura. Cabe resaltar que el frente de racha tiende a moverse más rápido que las células individuales en un entorno de cizalladura baja, de tal forma que las células se inician y maduran a medida que caen detrás del frente de racha y se desvanecen cuando se elevan hasta el tope del embolsamiento de aire frío. Al combinarse el inicio de nuevas células con el rápido movimiento del frente de racha se produce una propagación hacia adelante del sistema (Frazer, 2015). (Figura 2)

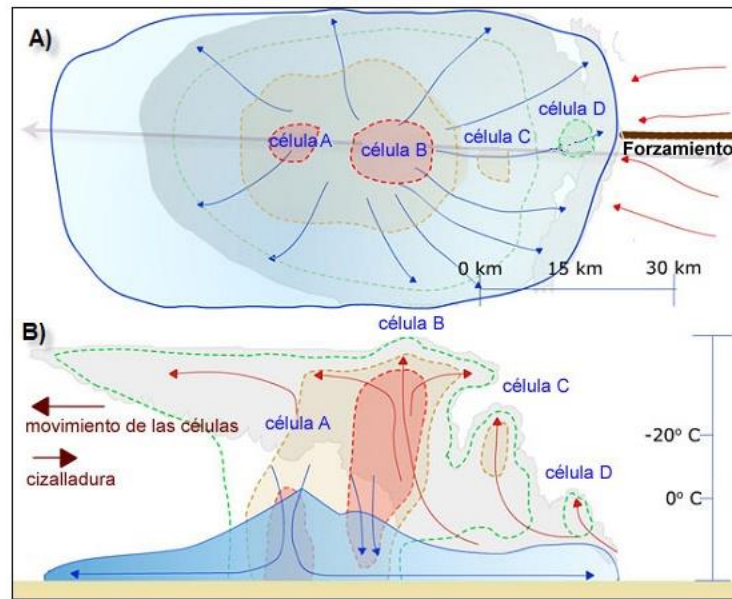


Figura 2: Modelo de una multicélula pequeña con embolsamiento grande de aire frío

En la Figura 2 la nube en gris, con valores de reflectividad aproximados de 20, 40 y 50 dBZ contorneados con líneas de puntos verdes, café y rojas respectivamente. El flujo de entrada (salida) se representa con líneas de corriente rojas (azules). La flecha doble en (A) representa el eje del corte vertical en (B). En (B) se representa las corrientes ascendentes con flechas rojas y las corrientes descendentes con flechas azules (Frazer, 2015).

Adicionalmente se presenta el proceso de transición de multicélulas con embolsamiento pequeño de aire frío a multicélulas con embolsamiento grande de aire frío. La mayoría de multicélulas pequeñas tienden a producir un embolsamiento frío profundo y extenso, en el caso de que persistan y aumenten de escala. En este caso lo que se espera es que el sistema inicie nuevas células a lo largo del frente de racha y que el embolsamiento de aire frío llegue a ser dominante. La transición de multicélulas con embolsamiento pequeño de aire frío a multicélulas con embolsamiento grande de aire frío puede estar asociado con cambios importantes en el movimiento del sistema debido a que la propagación impulsada por la acumulación de aire frío se encuentra alterando el vector de movimiento previo del sistema (Frazer, 2015).

1.1.2 CUMULONIMBUS (CB)

Las condiciones inestables se refieren a encontrar parcelas de aire frío por encima de otras parcelas de aire cálido pues por las leyes de la termodinámica, se tiende a generar un movimiento vertical de la atmósfera para que las masas frías que son pesadas tiendan a estar por debajo de las calidas más livianas, cuando la temperatura disminuye con la altura la atmósfera es inestable y si se presenta una inversión de temperatura hay una capa estable.

Los Cumulonimbus (ver Figura 3) son nubes que se forman de una rápida elevación convectiva de columnas de aire en condiciones inestables. En este caso la parte superior de la nube se extiende para formar nubarrones de tormenta con forma de yunque (Glynn & Gary 1999).

Este tipo de nube se caracteriza por ser densa y potente, con un importante desarrollo vertical y en forma de torreones, con una base de 200 -500 metros de altura y con una cima que puede alcanzar hasta los 12.000 m de altura. Los Cumulonimbus están formados por gotas de agua en la parte inferior y por cristales de hielo en las partes altas. Estos Cumulonimbus son nubes propias de frente frío o de tormenta de verano que generan lluvia, granizo o nieve, en forma violenta y a intervalos cortos. Incluso pueden oscurecer la luz solar en pleno día (Flores, 2011).



Figura 3: Cumulonimbus. Nube de desarrollo vertical en forma de yunque o seta, asociada a tormentas y chubascos (Michigan Technology Institute, 2010)

Los Cumulonimbus pueden crecer de tal forma que pueden llegar a formar una capa superior de hielo. Estas nubes generalmente producen lluvias intensas y tormentas eléctricas, principalmente cuando ya están plenamente desarrolladas. Cabe resaltar que no siempre los Cumulonimbus poseen yunque como en el caso del Cumulonimbus “Calvus” (Parafly, 2015).

1.1.3 TORRECUMULOS (TCU)

Esta clase de nubes también es conocida como Cúmulos Castellanus o Congestus. En cuanto al significado de la palabra Castellanus esta significa Castillo. Los torrecúmulos (ver Figura 4) son un tipo de nube Cúmulus que se caracteriza porque despliega muchas torres hacia el tope de esta (Parafly, 2015).

Esta clase de nubes se asocian con la formación de Cumulonimbus y pueden ser indicadoras de mal tiempo debido a que son evidencia de inestabilidad en la atmósfera media y hasta la tropopausa. Las corrientes de convección conectan con capas inestables en la troposfera se podrían generar nubes Cumulonimbus y tormentas (Parafly, 2015).

Generalmente los Torrecúmulos se caracterizan por tener un gran desarrollo vertical, base plana, contornos definidos y más altos que anchos. Los toques de este tipo de nube pueden llegar a los 6.000 m. Los Torrecúmulos se forman comúnmente a partir de Cúmulos, aunque también pueden desarrollarse a partir de Altocúmulos o Estratocúmulos. Normalmente los Torrecúmulos se desarrollan tarde durante el día y la aparición de los mismos temprano durante el día están asociados a una mayor probabilidad de tormentas (Parafly, 2015).

Se requiere de la convección para que se formen los torrecúmulos y también se requiere de inestabilidad atmosférica que se produce cuando la temperatura de la masa de aire circundante desciende con la altura más rápido de lo que ocurre normalmente (Parafly, 2015).

Una nube Torrecúmulo madura puede derivar en una nube Cumulonimbus en condiciones apropiadas de inestabilidad, cuya transformación puede apreciarse por el desarrollo del tope. Cabe resaltar que este proceso puede ocurrir rápidamente y que además es difícil de reconocer. En este caso los pilotos deben estar muy atentos a la aparición de Torrecúmulos en el cielo que sobrevuelan (Parafly, 2015; y Programa de Meteorología Aeronáutica, 2015).

Cuando una nube Cumulonimbus está en su fase madura y de disipación se puede evidenciar la aparición de la forma de un penacho de cirros en la cima, los cuales se encuentran formados por cristales de hielo y localizados a 12 km de altitud o más y con una temperatura del orden de -65 °C. Este penacho tiene a menudo forma de yunque y es transportado muy lejos de la tormenta por el viento de niveles altos. En este momento de la evolución se presentan chubascos y descargas eléctricas. También cambia su clasificación si se observan rayos o se escuchan truenos o incluso si se pierde la nitidez de su parte superior (Parafly, 2015).



Figura 4: Torrecúmulo. Nube que se caracteriza por la formación de torres en la cima de la misma, posee base plana y contornos definidos (Parafly, 2015).

1.2 Estado del arte

En Colombia se han realizado una serie de estudios sobre los fenómenos convectivos de tiempo presente (los cuales son los fenómenos que se informan de su presencia en el momento de la observación en los reportes METAR y SPECI que se encuentran en el momento de la observación en transcurso y dentro del perímetro del aeródromo) que se presentan en el territorio nacional, esos estudios se citan a continuación. Se realizó un estudio en el Departamento de Planeación Municipal, 2000, (p.44; citado en Jiménez, 2004 la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) en la estacionalidad de la precipitación en el centro del país para las temporadas abril-junio y septiembre - noviembre, se encontraron aportes de precipitación con intensidades entre 2000 mm y 3000 mm anuales y media de 2152,10 mm. Así mismo, se reporta que el movimiento fuerte del aire que llega a tomar proporciones de vendavales y tempestades que en algunas ocasiones llega a afectar la infraestructura urbana y rural, los cultivos, y la misma vegetación. Estas temporadas de vientos fuertes que forman los vendavales, se concentran en los meses de julio, agosto y septiembre.

Por otra parte está el estudio de Rojas (2012) en el cual se estudian los casos en los que el Aeropuerto Internacional El Dorado opera bajo reglas de vuelo por instrumentos. Se estudiaron las tormentas como uno de los fenómenos meteorológicos causantes de las condiciones instrumentos o cierres del aeródromo. También se reportaron aspectos climatológicos del Aeropuerto que sugieren la necesidad de ahondar en el tema de los

sistemas convectivos como factores de afectación a la seguridad aérea de los vuelos que evolucionan en el aeródromo.

De acuerdo con el estudio de León et al, 2000 (citado en Jiménez, 2004), la ZCIT está definida como una estrecha banda zonal de vigorosa convección, que se manifiesta por el desarrollo de cúmulos, debida a la confluencia de los vientos alisios del noreste y sureste. Esos movimientos verticales fueron visualizados a través de gráficos de la velocidad vertical media elaborados con base en los datos del reanálisis NCEP/NCAR, para el período 1982-1994. La situación geográfica de Colombia, hace que casi todo su territorio quede condicionado a la influencia de la ZCIT. Por tal razón, las condiciones y variaciones a través del tiempo, de las masas de aire que definen e influyen sobre el tiempo y el clima en Colombia, están muy ligadas a la presencia de la ZCIT, que es entonces, el sistema que en gran parte fija el mecanismo general del clima en Colombia. (Jiménez, 2004, p.23).

En las áreas que están bajo la influencia de la ZCIT, el cielo es nublado y se presentan abundantes lluvias; algunas veces se originan turbulencias dinámicas y/o térmicas que ocasionan procesos de fuerte convección (ascenso de aire), condensación del vapor de agua (al enfriarse por el ascenso) y precipitación. El desplazamiento de la ZCIT ocasiona que en gran parte de Colombia se presente en el transcurso del año, un doble máximo y un doble mínimo de precipitación y, por supuesto, también de otros elementos meteorológicos (Eslava, 1994, p.73; citado en Jiménez, 2004).

Debido al flujo convergente, La ZCIT es la región de mayor nubosidad y lluvias; la convección y la precipitación asociada se concentra alrededor de conglomerados de nubosidad muy definidas que la hacen fácilmente identificable en las fotos de satélite. (León et al, 2000).

Por otra parte, otros fenómenos meteorológicos a gran escala que pueden generar sistemas convectivos en Colombia son las ondas del Este, que también frecuentemente generan buena parte de los ciclones y huracanes tropicales, se presentan únicamente en la temporada de mayo a noviembre y durante esta época, son responsables en alto porcentaje de los cambios de tiempo observados en nuestras latitudes (León et al, 2000)

En Bogotá se han estudiado las condiciones que favorecen el desarrollo de la actividad convectiva de las tormentas eléctricas en la Sabana de Bogotá según Montoya y Eslava (2000) encontrando que las tormentas se presentan como resultado de una compleja interacción entre características locales y condiciones en el flujo de gran escala con vientos débiles y alto contenido de humedad, situación que es propia de la zona de convergencia de los alisios y del brazo ascendente ecuatorial de la celda de Hadley. Además que, la convección local o térmica reforzada por el efecto orográfico, sirve de mecanismo disparador de las tormentas eléctricas en la Sabana de Bogotá. Este estudio propone la representación esquemática de circulación del aire en la Sabana de Bogotá durante las tormentas eléctricas cómo se aprecia en la Figura 5.

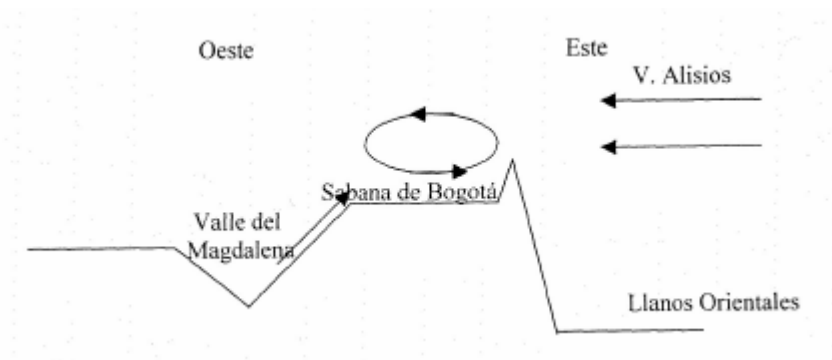


Figura 5: Representación esquemática de la Circulación del Aire en la Sabana de Bogotá, durante el desarrollo de tormentas eléctricas según Montoya y Eslava, 2000

Existen estudios realizados por la NASA y por la Organización Mundial Meteorológica (OMM), La Organización Europea para la Formación Virtual de Meteorología y el programa COMET. En esos estudios se analizan los sistemas convectivos más estudiados que son los de magnitudes sinópticas y de mesoescala. Es por esto que, por ejemplo, la mayor cantidad de la información contenida en los cursos que se presentan en internet, trata acerca de sistemas convectivos de mesoescala – SCM (<http://eumetcal.meteo.fr/euromet/spanish/navig/begins.htm>).

En Brasil se ha desarrollado un producto meteorológico, en el cual se pretende pronosticar con dos horas de anticipación el desarrollo y evolución de los sistemas convectivos de mesoescala que se observan en imagen satelitales el pronóstico se hace por medio de la identificación de las fases de vida de la nubosidad presente y su

representación en un mapa interactivo. En ese mapa se presenta la clasificación en pixeles de diferentes colores, los cuales indican el pronóstico a muy corto plazo de dicha nubosidad y se puede observar en la página de internet <http://www.cptec.inpe.br/> con una actualización de 15 minutos.

Existen estudios concretos de sistemas convectivos basados en la comparación de información de superficie proveniente de Informes Meteorológicos de Rutina para la Aviación (METAR) con pronósticos de sistemas convectivos. Ese es el caso del trabajo realizado por Carvajal H. et Al. en el año 2009 en el que se analiza el aeródromo de Ámsterdam.

Los sistemas convectivos se pueden monitorear en los Aerodromos a través de los reportes METAR y SPECI. Los reportes METAR se deben expedir de manera horaria los 365 días del año sin interrupción y los reportes SPECI cuando se presentan cambios de importancia para la aviación de las condiciones meteorológicas reportadas en la hora anterior y por su influencia en la operación aérea se debía emitir un reporte adicional al horario.

Los satélites GOES constituyen un grupo de satélites americanos mantenidos por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Los datos son distribuidos por el National Environmental Satellite and Information Service (NESDIS). Su altitud (35800 km) y órbita geosincrónica le permite quedar siempre sobre el mismo punto del ecuador (en este caso, en la longitud de 75° W). Las imágenes del globo terrestre son obtenidas cada 30 minutos, para un área fija en la superficie.

El GOES E_IMAGER es un instrumento que monitorea la atmósfera en cinco canales espectrales: uno Visible (0,55-0,75 μm), tres canales Infrarrojos (3,8-4,0 μm , 10,2-11,2 μm , 11,5-12,5 μm) y el canal de vapor de agua (6,5-7,0 μm). En el canal visible, la resolución es de 1x1 km. En los canales Infrarrojos, la resolución es de 4x4 km. En el canal vapor de agua, la resolución es de 4x8 km. (<http://www.cptec.inpe.br/>)

En cuanto a la capacidad de modelo WRF de pronosticar los sistemas convectivos como tal se han hecho estudios como el de Uribe en el año 2012 en el cual se probaron diferentes parametrizaciones en la región andina para ver eventos extremos de

precipitación pero se efectuaron con una instalación y configuración diferente a la del modelo de la FAC el cual fue el utilizado en este trabajo.

1.3 Formulación del problema

Debido a que nos encontramos en el cinturón ecuatorial, el territorio nacional está expuesto a altas dosis de radiación solar, con la particularidad que hay una constante presencia de humedad proveniente de la región Amazónica y de los océanos Atlántico y Pacífico (el ingreso de la humedad del Océano Pacífico al territorio continental colombiano, por ejemplo se genera por medio de la inversión de los alisios). Sumándose a estas circunstancias, hay una alta inestabilidad permanente, debido a la ubicación de Colombia en la rama ascendente de la celda de Hadley. Sin embargo, no ha habido estudios específicos sobre tormentas particularmente en el Aeropuerto Internacional El Dorado de Bogotá dentro de este período comprendido entre el 1 de julio de 2011 y el 30 de junio de 2014, por lo que es necesario hacer estudios particulares para cada región con el fin de conocer cuál es su frecuencia, comportamiento y variabilidad a lo largo del año.

Algunos de los sistemas convectivos que se presentan en Colombia pueden llegar a ser de extremo riesgo para el normal flujo de los vuelos en los aeródromos nacionales, especialmente en las fases de despegue y/o aterrizaje. Se pueden convertir en una de las causas por las cuales se presentan accidentes aéreos, tal y como lo reporta el Informe final de Accidente COL-10-18-GIA, (UAEAC <http://www.aerocivil.gov.co/Aeronautica/InvAccidentes/Accidentes/FINAL%20HK4682%20-%20part%20I.pdf>.) Este accidente ocurrió el día 16 de Agosto de 2010 a la aeronave Boeing 737-700 Matrícula HK-4682 en el Aeropuerto Internacional Gustavo Rojas Pinilla de la Isla de San Andrés – Colombia. En el informe se aprecia que las condiciones meteorológicas de presencia de sistemas convectivos en las cercanías del aeródromo y sobre el aeródromo a la hora del evento jugaron un papel importante para empeorar la condición de la aeronave y ser uno de los eslabones en la cadena de error. De modo que

es importante estudiar con mayor detalle las condiciones meteorológicas bajo las cuales se presentan los sistemas convectivos en los aeródromos del país. Teniendo en cuenta la gran afluencia de tráfico aéreo en el Aeropuerto El Dorado es imperante mejorar el conocimiento de posibles condiciones de riesgo para las aeronaves y poder aportar para evitar posibles accidentes aéreos como los ocurridos en el Aeropuerto de la Isla de San Andrés.

Este problema del desconocimiento de las condiciones meteorológicas asociadas con la presencia de sistemas convectivos en el Aeropuerto Internacional El Dorado, no se ha tratado en profundidad por otros autores, y a pesar de que sus esfuerzos han sido valiosos para la aeronavegación, aún no se han utilizado todas las fuentes de datos que se tienen disponibles, como son los reportes METAR y SPECI, cartas sinópticas, imágenes de satélite, radiosondeos y simulaciones del modelo WRF instalado en la FAC para analizar estas condiciones a fondo y de esta manera contribuir con el mejoramiento de los índices de seguridad aérea para la aviación en las inmediaciones del Aeropuerto Internacional El Dorado.

Debido al desconocimiento de las condiciones meteorológicas que se deben dar en el Aeropuerto El Dorado para que se presenten sistemas convectivos, en los cuales están inmersos los más peligrosos fenómenos adversos a la aviación y con el fin de mejorar la toma de decisiones en el aeródromo y minimizar el riesgo de eventuales accidentes o retrasos en la operación, es necesario determinar el ciclo anual y diurno de los sistemas convectivos, se requiere conocer cuáles son sus características en cuanto a duración, frecuencia, hora del día y mes del año. Adicionalmente se requiere conocer cómo se comportan las variables meteorológicas durante y antes de la ocurrencia de los sistemas convectivos. De modo que se requiere analizar la mayor cantidad de información disponible para el Aeropuerto tal como reportes METAR y SPECI del Aeropuerto, imágenes de satélite, radiosondeos, cartas sinópticas y datos de simulaciones del modelo WRF de la FAC.

Por lo tanto este estudio aprovecha la información meteorológica disponible en el Sistema Meteorológico de la Fuerza Aérea Colombiana (SIMFAC), para efectuar una caracterización de los sistemas convectivos que se presenten en afectación a las operaciones aéreas que puedan evolucionar desde CATAM.

2. Aspectos teóricos

2.1 ZCIT Y ENSO

El clima en Colombia está influenciado por la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) (Zea 2000, citado por Ramírez 2012), que está definida como una región de baja presión orientada de oriente a occidente, donde los vientos alisios del Sureste producidos como un flujo alrededor de las altas del Pacífico Sur y Atlántico Sur se unen con los vientos alisios del Noreste que se generan como un flujo alrededor de la alta del Atlántico Norte. La ZCIT es la zona de máxima nubosidad de la región ecuatorial y lluvia debido al flujo convergente, la precipitación excede ampliamente a la humedad suministrada por la evaporación desde el océano (IDEAM 2002, citado por Ramírez 2012).

De esta manera la gran mayoría del vapor de agua necesario para mantener la convección de la ZCIT es proporcionado por el flujo convergente de los vientos alisios en la troposfera baja. De esta manera el flujo a gran escala provee el calor latente necesario para la convección y el calentamiento convectivo genera el campo de presión a gran escala que mantiene el flujo de bajo nivel (IDEAM 2002, citado por Ramírez 2012).

En general la ZCIT sobre los Océanos consiste en un número de distintos conglomerados de nubes con escalas del orden de los cientos de kilómetros que están separadas por regiones de cielo relativamente despejados. La ZCIT es muy variable tanto en el espacio como en el tiempo. Debido a que los vientos convergen el aire húmedo que se encuentra en la zona, este asciende y se genera gran cantidad de nubes del tipo Cumuliforme y también se generan fuertes precipitaciones, es por ello que esta zona del planeta se caracteriza por presentar alta nubosidad y lluvia (IDEAM 2002, citado por Ramírez 2012).

Cabe resaltar que la ZCIT se mueve latitudinalmente siguiendo el desplazamiento del Sol con respecto a la Tierra. En áreas vecinas a Colombia y en Colombia, el segmento del Océano Pacífico Oriental alcanza su posición meridional máxima entre enero y febrero en los 2 grados de latitud norte (Figura 6) mientras que en diciembre se encuentra un poco más al norte. Esta posición meridional máxima puede llegar a alcanzar los 5 grados de latitud norte durante el fenómeno El Niño. Por otra parte, el segmento continental sobre

América del Sur se observa fraccionado e independiente del anterior y se localiza entre los 5 y 10 grados de latitud sur para el mismo periodo de tiempo (Zea 1998, citado por Ramírez 2012).

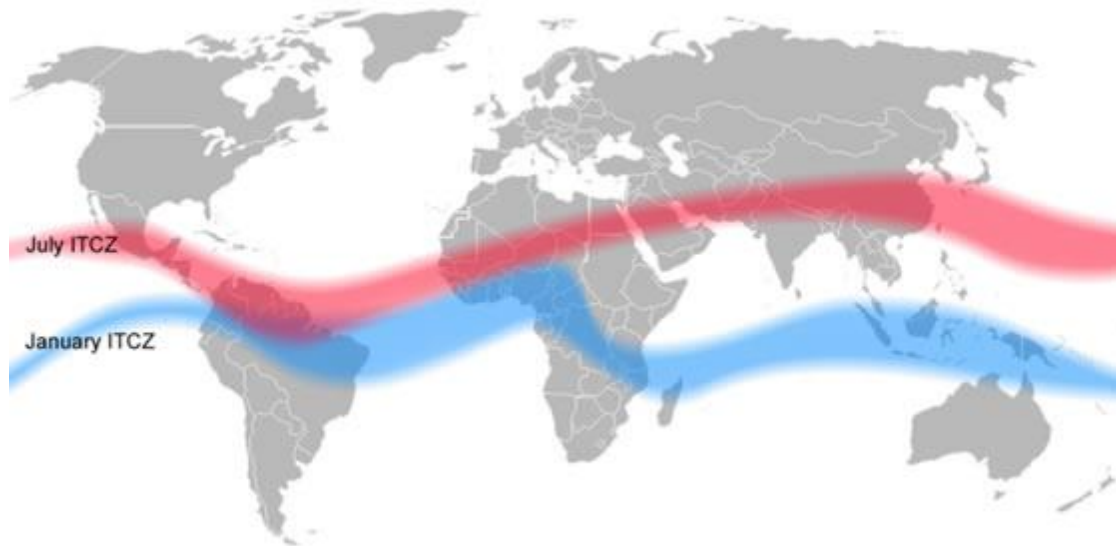


Figura 6: Ubicación media de la ZCIT para los meses enero y julio (Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, 2015)

Entre marzo y mayo el segmento del Pacífico de la ZCIT se ubica entre 1.5 ° y 7° N. Entre marzo y abril la rama continental se conecta con el segmento del Océano Atlántico formando un sólo sistema que se localiza entre los 5°S y 1°N al oriente del país, estos dos segmentos se unen por medio de conglomerados convectivos no muy organizados sobre la región Andina.

Entre junio y agosto el segmento del Pacífico se localiza en los 8° N al inicio del período y en los 11 ° N al final del período, penetrando la región Caribe, el segmento continental presenta una inclinación desde el Noroeste hacia el Sureste en el Oriente del territorio nacional, desplazándose hacia el norte y pasando del Ecuador a los 8° de latitud norte.

Entre septiembre y noviembre, el segmento del Pacífico comienza su desplazamiento hacia el sur y se registran posiciones desde 10° a 7° N; la rama continental inicia su

recorrido hacia el sur, desplazándose de los 8° N al Ecuador sobre la Orinoquía y Amazonía, desvaneciéndose la inclinación hasta coincidir con las líneas de los paralelos; los dos segmentos de la ZCIT se conectan por medio de conglomerados convectivos (IDEAM 2002 citado por Ramírez 2012). En el paso por las distintas regiones, la ZCIT determina dos épocas secas y dos épocas lluviosas en gran parte de las zonas de Colombia (Eslava 1994, citado por Ramírez 2012).

Por otra parte, fenómenos como El Niño, La Niña y la depresión tropical en la bahía de Panamá (baja anclada de Panamá) también afectan las condiciones meteorológicas de Colombia. La baja anclada de Panamá o baja anclada del Pacífico es un sistema de circulación ciclónico que se forja frente a la costa Pacífica Colombiana. Entre los factores que favorecen la formación de la baja anclada de Panamá se encuentran los vientos alisios del noreste como límite norte de esta circulación, la forma cóncava que tiene la bahía de Panamá y la orientación de la cordillera Occidental en territorio colombiano. De igual forma los vientos alisios del sureste tienden a curvarse al cruzar el Ecuador debido al efecto Coriolis, haciendo parte de un componente del suroeste. Promoviendo la formación de una región de baja presión y fuerte convección que se manifiesta en gran parte del año, lo que conlleva a la generación de gran cantidad de precipitación (León et al., 2000; citado por Ramírez 2012). Uno de los lugares más lluviosos del planeta es el municipio de Lloró, en el departamento del Chocó. Su alta pluviosidad es atribuida a este sistema sinóptico.

El fenómeno El Niño - Southern Oscillation (ENSO) se caracteriza por el calentamiento importante de las aguas ecuatoriales del océano Pacífico occidental. Normalmente, el fenómeno ocurre cada 3 a 7 años y está relacionado con cambios en los patrones meteorológicos mundiales (http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/mtnval_es/glossary.htm#n, 2015). Se puede observar adicionalmente la aparición o surgencia de corrientes Oceánicas de aguas con temperaturas más cálidas de lo normal en las costas del Océano Pacífico de América del Sur. La Oscilación del Sur se le denomina al comportamiento oscilatorio que presenta el patrón de presión atmosférica a lo largo del Océano Pacífico (ver Figura 7). El índice de

oscilación del Sur es la relación entre la presión atmosférica en Darwin en el Pacífico Occidental y la presión atmosférica en Tahití en el Pacífico Central. El fenómeno ENSO tiene una periodicidad de 2 a 7 años. ENSO presenta en la superficie del mar y en la atmósfera sobre él condiciones anómalas que pueden tener una duración de 12 y 18 meses (Rodríguez 2010, citado por Ramírez 2012).

Normalmente en el Océano Pacífico Tropical cerca de Australia e Indonesia la temperatura de la superficie del mar (TSM) presenta valores más altos que la temperatura superficial de las aguas costeras en Perú y Chile. Durante la ocurrencia del fenómeno El Niño estas aguas se desplazan progresivamente hacia el este y casi después de seis meses alcanzan la costa de América del Sur en el extremo oriental del Océano Pacífico. Mientras tanto en la atmósfera se genera una alteración en el patrón de la presión atmosférica. La presión disminuye en el lado oriental del Pacífico mientras aumenta en el lado occidental, lo cual produce el debilitamiento de los vientos superficiales del Este (Alisios) y genera el desplazamiento de la zona de convección y por lo tanto de las lluvias hacia el Pacífico Central. Por otro lado el fenómeno La Niña se caracteriza por ser la fase fría del ENSO El Niño y La Niña constituyen fases complementarias de la Oscilación del Sur.(Philander 1985 citado por Ramírez 2012).

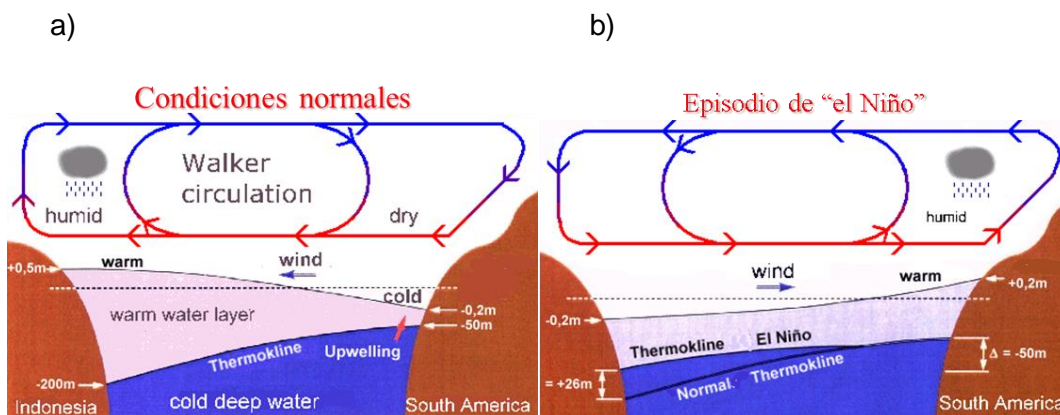


Figura 7: Condiciones normales en el Océano Pacífico (a) y con presencia del fenómeno El Niño (b) (Sakagami, 2009)

Durante el fenómeno La Niña es decir durante la fase fría del ENSO, cuando ocurre un enfriamiento anormal de las aguas ecuatoriales del Océano Pacífico Tropical, se genera un fortalecimiento de los vientos alisios y según la ley de la conservación de la masa, el conocido transporte de Ekman hace que se presente el fenómeno de surgencia oceánica frente a las costas suramericanas, lo cual altera la estabilidad termohalina de la columna de agua por la surgencia de aguas profundas más frías y densas en la parte superficial del Océano (Cifuentes et al., 2003 citado por Ramírez 2012).

En el caso de La Niña la termoclina está muy cerca de la superficie en el este del Océano Pacífico y más profunda en el occidente (Australia). Las precipitaciones se producen en el occidente del océano sobre Indonesia y Australia. El área azul sobre el ecuador en la Figura 8 se muestra la gran extensión del fenómeno. El viento circula en los niveles bajos, muy cercanos a la superficie del mar, desde la parte este a la parte oeste del ecuador (Villalobos, 2009).

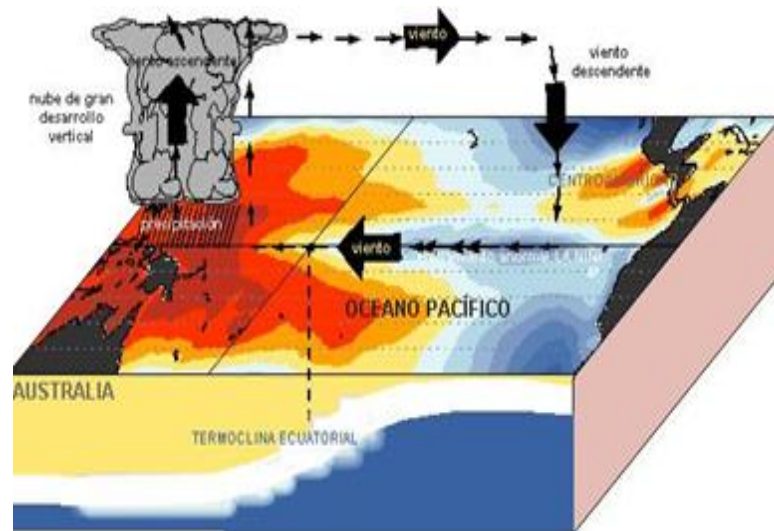


Figura 8: Condiciones atmosféricas y oceánicas del fenómeno La Niña

El índice de Oscilación del Sur (IOS) sirve para estudiar las fluctuaciones del ENSO, este se calcula a partir de las diferencias de presión entre la ciudad Australiana de Darwin y la isla de Tahití, los valores negativos indican episodios El Niño. Además del IOS hay otros índices utilizados de Oscilación del Sur (IOS) existe otra variable utilizada en la definición

de la ocurrencia ENSO conocida como la anomalía de la TSM, la cual es medida en diferentes regiones del Pacífico Ecuatorial.

Hay una influencia clara y directa del fenómeno ENSO sobre las variables climáticas en Colombia, esto debido a su ubicación geográfica. Esto ha sido corroborado gracias a la información histórica, la cual ha mostrado que es responsable de sequías extremas y lluvias extraordinarias en diferentes regiones de Colombia. Las posibles respuestas del clima en la Sabana de Bogotá con respecto a la temperatura superficial del mar (TSM) en el Pacífico Tropical pueden ser: La temperatura media mensual del aire disminuye aproximadamente en 1,0 °C cuando hay condiciones La Niña en el Pacífico tropical, la temperatura media mensual del aire se incrementa aproximadamente en 1,5 °C cuando hay condiciones El Niño en el Pacífico tropical y los volúmenes mensuales de precipitación en eventos El Niño disminuyen y en La Niña aumentan en más de un 60% (Pabon et al., 2006 citado por Ramírez 2012)

Entre otros estudios a nivel nacional se hace referencia a la influencia que eventos ENSO han tenido en la variabilidad de eventos extremos en el pacifico y caribe colombiano como los desarrollados por Hoyos et al en 2012 y 2013.

2.2 Fenómenos meteorológicos adversos para la operación de un aeródromo

Entre los fenómenos meteorológicos que son adversos para la operación del mismo, se encuentran:

Aquellos que reducen la visibilidad en las inmediaciones o en la pista del Aeropuerto, a una distancia inferior a ocho kilómetros aproximadamente desde el perímetro del aeródromo (OACI 2004b, citado por Ramírez 2012), los cuales son conocidos como fenómenos meteorológicos de tiempo presente, estos pueden ser de los siguientes tipos:

1) Precipitación: Lluvia (RA), cristales de hielo (IC), llovizna (DZ), nieve (SN), granizo (GR), cinarra (SG), hielo granulado (PL), granizo menudo (GS).

2) Oscurecimiento por Hidrometeoros: Neblina (BR) y niebla (FG).3) Oscurecimiento por Litometeoros: Calima (HZ), humo (FU), arena (SA), polvo (DU), ceniza volcánica (VA).

Además de los anteriores, existen otros fenómenos de tiempo presente los cuales son: Turbonada (SQ), remolinos de polvo (PO), tempestad de polvo (DS), nubes de embudo (Tornado o tromba marina; FC), ventisca alta (BL), tempestad de arena (SS), tormenta (TS), bancos aislados (BC), engelamiento (FZ), chubasco (SH), ventisca baja (DR), parcial (niebla) (PR).

Otro fenómeno adverso para la operación de un aeródromo es la dirección y la velocidad del viento, un rango de valores que impida la correcta navegación aérea. Los valores dependen del ancho de la pista, el largo de la pista, la orientación 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.

El último fenómeno adverso para la operación de un aeródromo es cuando la altura de la base de la capa de nubes más baja de extensión fragmentada (BKN) o cubierta (OVC) es menor a determinados valores. Esos valores dependen de las ayudas electrónicas y visuales que posea el aeródromo.

La decisión de cerrar un aeródromo debido a condiciones meteorológicas se hace con base en los siguientes reportes: Aerodrome Routine Meteorological Report (METAR) y Aerodrome Special Meteorological Report (SPECI). En el caso del Aeropuerto Internacional “El Dorado” los reportes mencionados anteriormente son responsabilidad del IDEAM. En cuanto al reporte METAR su nombre indica la clave correspondiente a un informe meteorológico aeronáutico rutinario para la aviación (OACI 2004a, citado por Ramírez 2012).

El reporte METAR está compuesto por un código alfanumérico por medio del cual se expresan en bloques la siguiente información: Código OACI del aeródromo, la fecha así

número del día y hora UTC u hora Zulu, dirección e intensidad del viento en nudos, visibilidad horizontal en metros, fenómeno de tiempo presente si lo hay dentro o cerca a el aeródromo, grupos de nubes en los cuales se indica la cantidad en octas de nubosidad presente en la bóveda celeste y altura en pies a la cual se encuentra cada grupo, temperatura del aire en grados Celsius, temperatura del punto de rocío en grados Celsius, QNH o presión atmosférica reducida al nivel medio del mar en pulgadas de mercurio, finalmente en ocasiones se reporta otra información de interés como fenómenos meteorológicos recientes a la expedición del metar o cualquier otro tipo de información que sea pertinente para la operación del aeródromo (UAEAC,2012).

Un ejemplo de uno de los reportes para la ciudad de Aeropuerto El Dorado de Bogotá es:

SKBO 251600Z 33006KT 9999 VCSH SCT020 SCT200 19/10 A3039 RMK VCSH/SE

En un Aeropuerto los informes METAR son generados cada hora en Colombia, sin embargo este tipo de informes meteorológicos puede ser reportado cada media hora en otros países dependiendo de lo establecido por la autoridad aeronáutica de cada nación. El informe SPECI proporciona información sobre cambios meteorológicos significativos, estos sirven para la seguridad aérea y pueden ser transmitidos en cualquier momento, siempre y cuando se cumplan ciertos criterios. En general, tanto el informe METAR como el SPECI presentan la misma forma de clave (OACI 2004a, citado por Ramírez 2012).

2.3 Variables en reportes METAR y SPECI utilizadas

2.3.1 Temperatura del aire

La variable utilizada para el análisis de las condiciones meteorológicas bajo las cuales se presentan los sistemas convectivos en el SKBO fue la temperatura del aire en superficie. Está definida como el resultado de la sensación caliente o frío, condición que determina si un cuerpo es apto para transmitir calor a otros, energía cinética media de las partículas de un cuerpo (Eslava, 1994). El calor por su parte se define como el flujo de energía

entre dos cuerpos a diferentes temperaturas. En el caso de la investigación la unidad de medida utilizada son los grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

2.3.2 Punto de Rocío y Humedad Relativa

Es la temperatura a la cual es necesario enfriar el aire atmosférico para que alcance su estado de saturación. El punto de rocío es la temperatura a la cual el aire se satura por enfriamiento, al suceder este enfriamiento se presenta la condensación o cambio de estado gaseoso a líquido. Es una de las medidas del contenido de humedad presente en una parcela de aire. Y por ende siempre es igual o menor que la temperatura del aire.

La humedad es la variable que describe la medida de la cantidad de vapor de agua contenido en un volumen de aire, también se define como la relación entre las tensiones de vapor, la tensión de vapor sobre la tensión de vapor saturante. Y la tensión de vapor es la presión ejercida por el vapor de agua al evaporarse agua en el aire seco, mientras que la saturante es la presión ejercida por el vapor de agua contenido en un volumen de aire saturado, cuando ya no se pueden recibir más vapor de agua porque se condensaría.

También se define como 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).

2.3.3 Viento

El viento es un vector, tiene dirección e intensidad. La dirección del vector del viento se reporta haciendo referencia a la rosa de los vientos y se expresa normalmente en grados de dónde sopla o haciendo referencia a los puntos cardinales. El viento es el movimiento del aire de forma horizontal con respecto a la superficie terrestre (Eslava, 1994).

De acuerdo a la diferencia de presión que se presenta a una misma altura entre la parcela de aire se crea el movimiento del aire y esta magnitud de fuerza es llamada la

intensidad o rapidez del viento, el cual se reporta en aviación en la unidad de medida nudo (KT) y en meteorología en kilómetros por hora km/h o metros por segundo m/s. Cuando la intensidad del viento es menor a dos nudos se dice que el viento está en calma.

2.3.4 Visibilidad Horizontal

La visibilidad horizontal es la medida horizontal en metros que generalmente calcula el observador meteorológico desde su posición dentro del aeródromo hasta la cual distinguen claramente objetos sin existir presencia de fenómenos meteorológicos o nubes en las inmediaciones del aeródromo. En algunos aeródromos se utilizan instrumentos más sofisticados llamados visibilómetros que permiten hacer esta medición de manera más exacta a la percepción del observador.

2.3.5 Presión Atmosférica y QNH

Es la fuerza que ejerce el peso de la atmósfera sobre una superficie de área cuadrada. La presión atmosférica es la Fuerza que ejerce la atmósfera sobre una superficie en virtud de su propio peso. La presión será mayor cuanto más cerca se esté del nivel del mar. La presión se puede medir a través del barómetro y sus unidades más comunes son los Pascales, Pa, los bares, ba, pulgadas de mercurio, "Hg, milímetros de mercurio, mmHg y las atmósferas, atm.

En los reportes METAR y SPECI no se reporta la presión atmosférica en superficie como se esperaría para un reporte meteorológico convencional que no sea para el medio aeronáutico, pero como la finalidad de esta clase de reportes es brindarle la información más relevante al piloto que le sirva para efectuar su vuelo de manera segura, lo que el piloto necesita saber acerca de la presión atmosférica de la estación u aeródromo de despegue, aterrizaje o referencia en vuelo (el más cercano a él mientras está en fase de crucero) es la presión a la cual se encuentra el nivel medio del mar por debajo de la estación debido a que esta varía a lo largo del día y dependiendo del lugar.

Esta presión de los reportes se llama el QNH que es la presión al nivel del mar deducida de la existente en el aeródromo, considerando la atmósfera con unas condiciones estándar, es decir sin tener en cuenta las desviaciones de la temperatura real con respecto a la estándar y utilizando también gradientes de presión estándar (<http://www.manualvuelo.com/INS/INS23.html>, 2015).

La utilidad de esta presión de referencia se debe a que en las cartas de navegación y de aproximación a los aeródromos, las altitudes (de tráfico, de circuito con fallo de radio, obstáculos, balizas, etc.) se indican respecto al nivel del mar. Con esta presión de referencia, al despegar o aterrizar el altímetro debería indicar la altitud real del aeródromo (<http://www.manualvuelo.com/INS/INS23.html>, 2015).

2.4 Modelo WRF 2.1.1

El modelo Weather Research and Forecasting (WRF) es un modelo numérico atmosférico regional, euleriano, no hidrostático desarrollado por importantes agencias como NCAR National Center for Atmospheric Research, NCEP National Centers for Environmental Prediction y la NOAA The National Oceanic and Atmospheric Administration, entre otras agencias de los Estados Unidos, el cual considera las condiciones geográficas como la topografía, la vegetación, las superficies de agua y los suelos. El modelo en mención es usado para hacer downscaling del resultado del modelo global GFS, producido también por las agencias norteamericanas en mención. El modelo WRF emplea tanto para el diagnóstico y pronóstico del tiempo atmosférico y del clima, y resuelve las ecuaciones en derivadas parciales de la dinámica atmosférica terrestre mediante parametrizaciones de radiación, desarrollo de nubes, capa límite planetaria y otros esquemas físicos en una rejilla tridimensional (Guerrero et Al, 2013).

El modelo WRF en su versión 2.1.1 ha sido el modelo operacional de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) en los últimos años, esta instalación es especial debido a las mejoras significativas que aportan a la solución de las ecuaciones de la atmósfera de masa, energía y movimiento con las que se realiza el pronóstico numérico del tiempo como la

inclusión del modelo digital de elevación, la cobertura y uso de suelos con la más alta resolución disponible en el país. Así mismo, se realiza la asimilación de los datos meteorológicos capturados por la red AMHS de distribución de información de reportes meteorológicos para la aviación. El modelo está configurado con tres dominios con resolución espacial de 45 km x 45 km, 15 km x 15km y 5 km x 5km y para este trabajo se utiliza el dominio 2 de resolución espacial 15 km x 15 km en razón a que el modelo con este dominio se han tenido resultados más fiables para el centro del país en el horizonte de pronóstico de hasta 72 horas (Manual de Usuario SIMFAC, 2009).

Los datos del modelo GFS sirven como datos de entrada o de frontera de la rejilla del WRF y como datos iniciales para las ecuaciones de la atmósfera. El modelo WRF está compuesto por varios subsistemas o partes (Manual WRF, 2008):

GEOGRID: configura las variables geográficas como topografía, uso del suelo y sus características físicas en función a la época del año.

UNGRIB: inicializa el modelo con las condiciones de frontera provenientes del GFS.

METGRID: interpola horizontalmente datos meteorológicos extraídos del GFS para inicialización al tamaño de grilla.

3DVAR: asimila los datos externos al modelo GFS interpolándolos a la grilla configurada.

REAL: Usando los parámetros personalizados en el *namelist.input* interpola los datos meteorológicos verticalmente en niveles de presión en la vertical hasta el sistema de coordenadas normalizado sigma del WRF, dando la inicialización creando archivos de entrada para el WRF.

WRF: Resuelve a través de esquemas de cálculo numérico las ecuaciones atmosféricas apoyándose en las parametrizaciones para los fenómenos físicos cuya escala espacio-temporal es inferior a la resolución configurada, ejecutando el pronóstico.

3. Aspectos metodológicos

3.1 Área y período de estudio

El área de estudio es el Aeropuerto Internacional El Dorado de Bogotá (ver Figura 9). En este espacio se encuentra ubicada la Base Militar de la Fuerza Aérea Colombiana, en donde se desarrollan la mayor cantidad de vuelos de transporte de pasajeros y carga militares del país llamado Comando Aéreo de Transporte Militar (CATAM). El Aeropuerto Internacional El Dorado tiene el código OACI SKBO, sus coordenadas centrales son 04°42'05.77" N y 74°08'49.04" O y tiene una altitud de 8360 pies (2547 m; Manual de normas y procedimientos Fuerza Aérea, 2014).

El SKBO es el principal Aeropuerto del país en vuelos de carga y transporte de personal tanto civil como militar y el de mayor afluencia de tránsito aéreo, llegando a tener cada dos minutos un avión que se encuentra en fase despegue o aterrizaje acogiendo millones de personas en circulación por la capital del país: Bogotá D.C.



Figura 9: Aeropuerto Internacional El Dorado de Bogotá en el año 2007.

(Tomada de la tesis de maestría en Ciencias. Meteorología de Rojas, 2012)

En la presente investigación el período de estudio es 01 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014. Este período de tiempo, iniciando en el mes de junio y no en el mes de enero para comenzar a contar los 3 años de estudio, se escogió a propósito con el fin de tener una

coincidencia con el tiempo en el cual es evaluado el índice ONI, de esta manera se puede apreciar de una forma más clara el reporte de un evento La Niña leve en el segundo semestre de 2011, el cual inicia el período de estudio (<http://ggweather.com/enso/oni.htm>, 2014) y con lo cual se puede hacer una comparación directa con los demás períodos del tiempo de estudio, años que son considerados neutros al no presentarse ni la fase positiva ni la fase negativa de ENSO.

3.2 Datos a utilizar

Para la realización de este estudio se usan los reportes METAR y reportes SPECI obtenidos de la página de internet (<https://www.simfac.mil.co/news.php>), para el período comprendidos entre el 1 de julio 2011 a 30 de junio 2014. Adicionalmente, se analizaron:

- Las imágenes del GOES E_IMAGER con una resolución temporal de 30 minutos que se descargan de la página de Class de la NOAA en internet: (<http://www.nsof.class.noaa.gov/saa/products/welcome;jsessionid=F9BA0B29BC7FD055A667A8CAE5F8929D>);
- Datos de radiosondeo para las 12 UTC del día del evento, obtenidas a través de la página web (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)
- Cartas sinópticas de la NOAA para las 12 UTC del día del evento, obtenidas en el archivo de NWS DIFAX Weather Map Archive a través de la página web (<http://archive.atmos.colostate.edu/data/misc/QPAA99/>); y
- Las simulaciones del modelo WRF 2.1.1 de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) del dominio 2 (15 km x 15 km) de las 00 UTC y 12 UTC del día involucrado en cada uno de los casos de estudio y los dos días anteriores, sin embargo se mantendrá reserva de la información de configuración del modelo de la FAC para efectos de este documento.
-

En la Figura 10 se aprecia la distribución de los dominios del WRF 2.1.1 de la FAC con el fin de observar las condiciones de borde y de frontera del modelo, debido a la

retroalimentación que hay entre los mismos y que afectan los resultados obtenidos en el dominio evaluado.

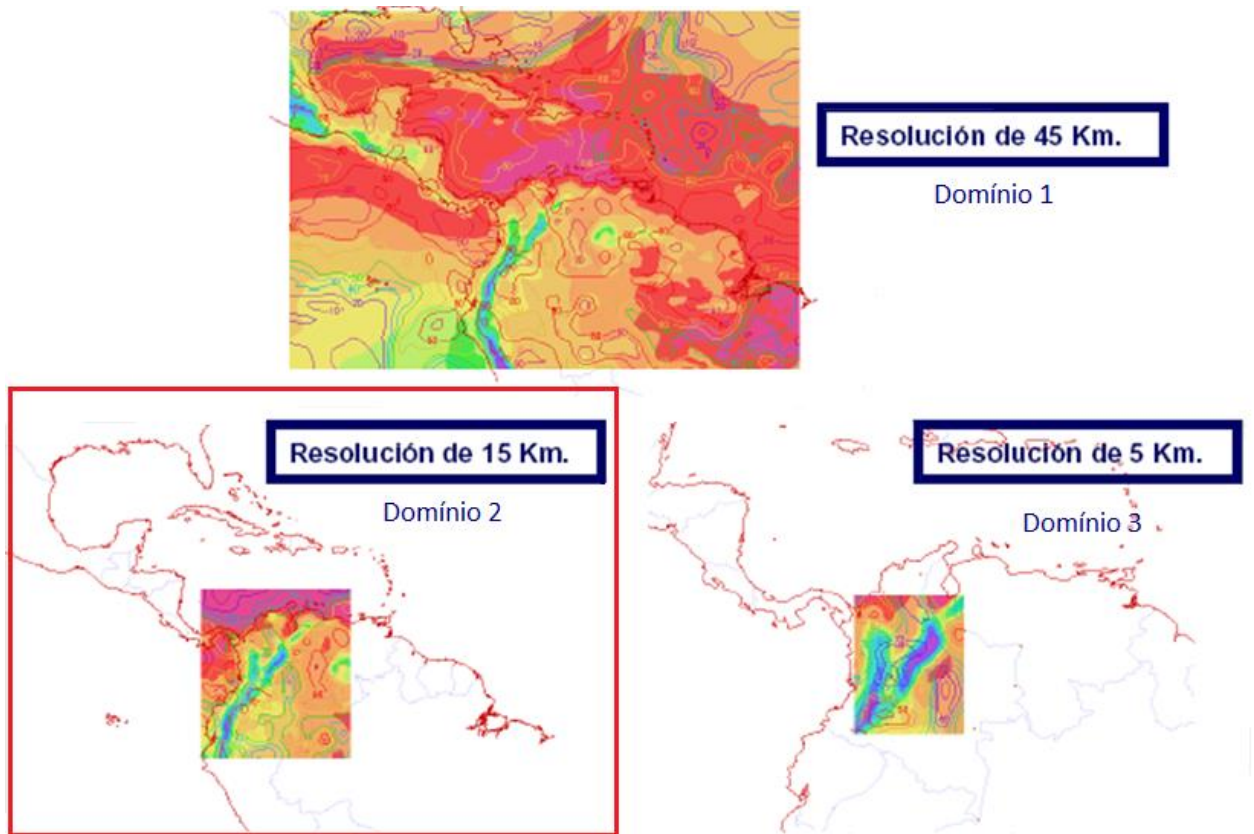


Figura 10: Dominios del modelo WRF 2.1.1 de la FAC, resaltado el dominio 2 empleado en esta tesis

Estas salidas del modelo WRF fueron proporcionadas por el Grupo de Trabajo de Meteorología de la FAC sin costo alguno. Las variables de WRF analizadas son dirección del viento, intensidad del viento, humedad relativa, presencia de nubosidad y precipitación. Se utiliza la información del índice ONI para identificar la ocurrencia de los fenómenos El Niño y La Niña publicadas en la página web (<http://ggweather.com/enso/oni.htm>)

3.3 Metodología

La caracterización de los sistemas convectivos en el Aeropuerto Internacional El Dorado de Bogotá, se realizó a través del análisis exploratorio de datos (Wilks, 2011) a la serie de datos de los reportes METAR y SPECI publicados dentro del período de estudio. A partir de los resultados del análisis exploratorio se pudieron definir unos casos de estudio donde se observaron condiciones de interés en relación a los sistemas convectivos tales como situaciones de cierre del aeródromo, los eventos de mayor duración o los que se presentan en condiciones muy o poco comunes.

Después de haber escogido los casos de estudio, se analizaron otros datos correspondientes a las horas en las que se presenten los sistemas convectivos así: las salidas del modelo WRF de la FAC, las imágenes del satélite del GOES-13, cartas sinópticas de la NOAA y los radiosondeos de la estación 80222 o SKBO, para evaluar en ellos las condiciones meteorológicas asociadas con los sistemas convectivos en el SKBO. Los datos de presencia de nubosidad y humedad relativa del modelo WRF se analizaron por medio de perfiles. Los datos de precipitación y viento se analizaron por medio de cartas. Para el viento se tuvieron en cuenta tres niveles en la vertical de acuerdo a la metodología de análisis de líneas de corriente descrita por (http://www.meted.ucar.edu/tropical/textbook_2nd_edition_es/navmenu.php?tab=10&page=3.1.2), la cual permite observar en tres capas de la atmósfera la ocurrencia de difluencia, confluencia, dorsales, vaguadas, ciclones y anticiclones.

Debido a que el formato de los datos del modelo y las imágenes de satélite es netCDF se utilizó software libre para el procesamiento de datos especializados como CDO, IDV y MclDas. Con los cuales se realizaron scripts que permitieron el análisis y la visualización de la información meteorológica proveniente de las distintas fuentes.

4. Resultados y análisis

4.1 Análisis de reportes METAR Y SPECI

En la Tabla 1 se muestran las variables meteorológicas que se incluyen en los reportes de aeródromo para el diagnóstico de sistemas convectivos. En el Aeropuerto, las variables meteorológicas son monitoreadas por un observador humano y medidas por instrumentos emplazados en el techo del edificio de la UAEAC en el que se encuentra la torre de control del SKBO, las cuales se tienen en cuenta en este estudio para el análisis de superficie.

Tabla 1: Variables de reportes METAR y SPECI utilizadas para el análisis de las condiciones meteorológicas bajo las cuales se presentan sistemas convectivos dentro del SKBO.

Nombre de la variable
Intensidad del viento
Dirección del viento
Fenómeno de tiempo presente y tipo de nube (TS, TCU y CB)
Temperatura
Punto de rocío
QNH (presión)

Cabe resaltar que las series de datos de reportes METAR y SPECI del Aeropuerto El Dorado podría decirse que son de las más completas y mejores del país por lo que se utilizaron casi todos los datos disponibles y únicamente se realizó depuración o corrección de los reportes METAR en los cuales se podía determinar que habían existido errores de digitación. En los casos en los que no se podía determinar con

facilidad los errores en los reportes METAR y SPECI, los reportes fueron eliminados de la muestra, con ayuda del señor Carlos Roa del IDEAM, quien fue observador meteorológico del Aeropuerto El Dorado de Bogotá durante el período de estudio y quien corroboró que la eliminación de algunos reportes fuera por errores en el Sistema o del observador, dada su experiencia en la expedición de reportes METAR.

También hubo depuración de información a través de la consulta de la base de datos de reportes METAR del IDEAM, la cual está más depurada que la información proveniente de la red AMHS. Esta red alimenta la base de datos del SIMFAC y de la cual se pudo corroborar con personal de la UAEAC, que tiene problemas con el almacenamiento de reportes METAR al incluir dentro de los reportes para el Aeropuerto El Dorado valores de otros aeródromos.

A pesar de la situación descrita anteriormente, se presenta tan sólo el 2.71% de datos faltantes de reportes METAR en el período de estudio, siendo esto una gran ventaja para el nivel de significancia de los resultados que se obtuvieron.

En la Figura 11 se denota que el año con más reportes METAR faltantes fue el 2012-2013. Sin embargo apenas alcanza el 1.11% del total de datos, seguido del año 2013-2014 con 0.92%; también se puede observar en la gráfica la distribución de los datos faltantes en las 24 horas del día denotando que las horas en las que se presenta con mayor recurrencia el problema es en las horas de la madrugada entre las 06:00 UTC y las 11:00 UTC es decir las 01:00 y las 06:00 a.m. hora local y con mayor frecuencia en el año 2013-2014 para las primeras horas de este período.

Sin embargo cabe resaltar que no son las horas más congestionadas del aeropuerto y que por ende la carencia de estos informes no es crucial y menos aún para este estudio teniendo en cuenta que no son las horas de mayor ocurrencia de sistemas convectivos en el SKBO como se verá más adelante. Por otra parte, en el año 2012-2013 se presenta el mayor número de reportes METAR faltantes entre las 09:00 HLC y las 23:00 HLC (ver Figura 11), horas en las que se espera ocurra la mayor presencia de sistemas convectivos en el SKBO es decir en las horas del día y comienzos de la noche, lo que equivale a un 1.34% de faltantes de la cantidad total de metares.

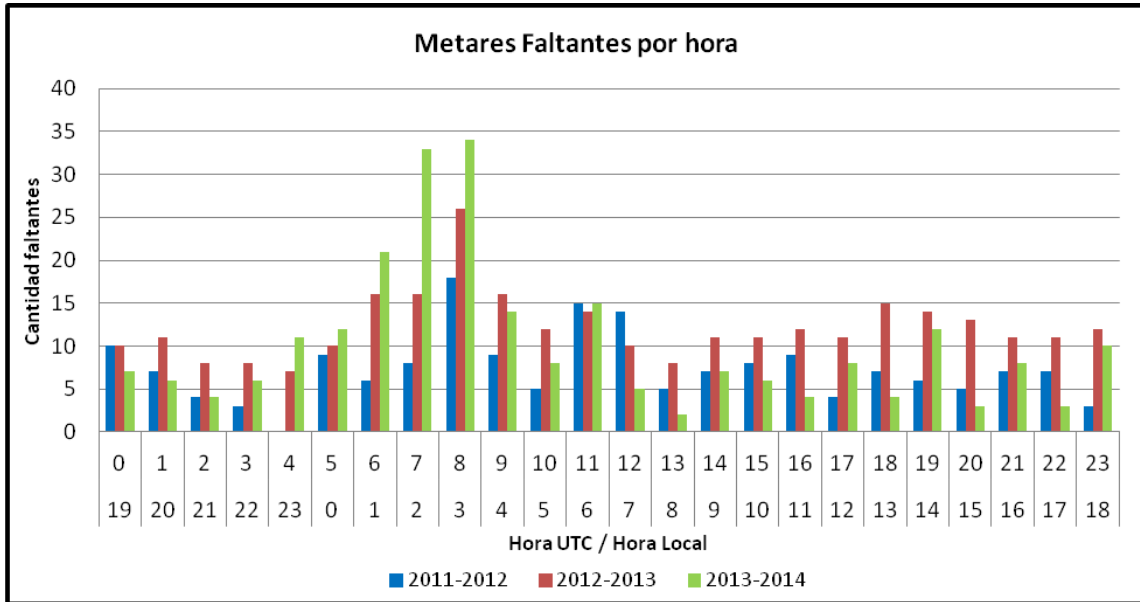


Figura 11: Reportes METAR faltantes por hora del SKBO en el período del 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014

4.1.1 Temperatura y punto de rocío de los reportes METAR y SPECI

En la Figura 12 se muestra la distribución de la temperatura en el período de estudio.

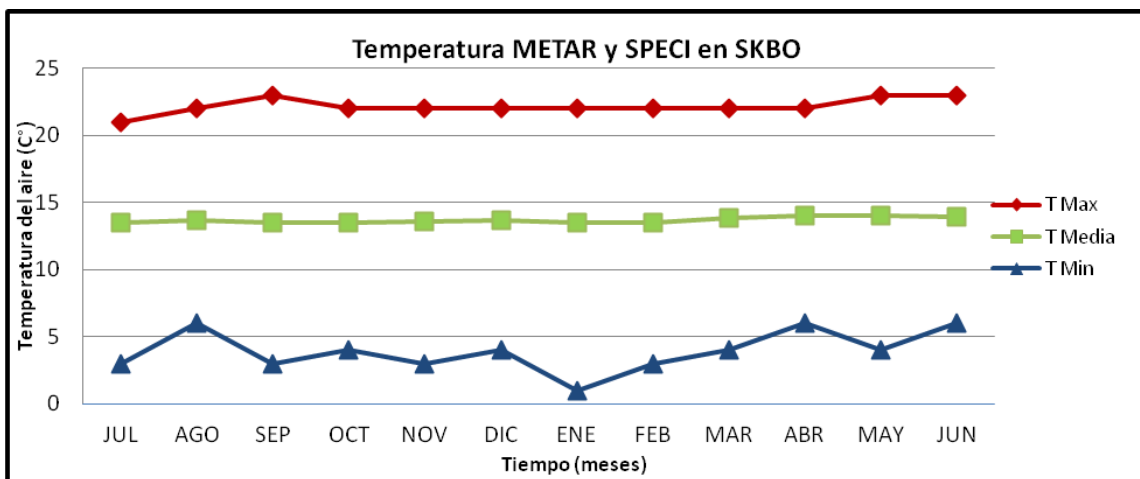


Figura 12: Promedios mensuales de la temperatura mínima, media y máxima en el SKBO en el período del 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014

La Figura 12 muestra el ciclo anual de la temperatura del aire medida en el METAR del SKBO, en la cual se aprecia un comportamiento en la media prácticamente constante a 13.7°C , con un rango de variación de 1°C y una desviación estándar de 0.2°C ; al igual que la temperatura máxima la cual tan sólo varía en 2°C con valores promedio de 22°C y una desviación estándar de 0.6°C . Por otra parte la temperatura mínima presenta variaciones un poco más amplias llegando a tener diferencia de hasta 5°C de amplitud entre el valor más alto y el más bajo, con un promedio de 4°C y una desviación estándar de 1.5°C . En la temperatura máxima se observa un valor máximo en los meses de septiembre, mayo y junio de aproximadamente 23°C . En la temperatura mínima se observa un valor mínimo en el mes de enero de 1°C .

Las variaciones de la temperatura mínimas, media y máxima en la Figura 12, no demuestran un ciclo anual definido. En la Figura 13 se muestran las gráficas que se encuentran para el SKBO en un período de tiempo más largo como lo es de 1974 a 1998 el cual contiene 24 años de datos medidos del Aeropuerto. En el panel b la Figura 13 se puede apreciar cómo en la temperatura máxima si corresponde el mínimo de la serie al mes de julio y que hay una diferencia más marcada hacia la bimodalidad que no se denota claramente en la curva de temperatura máxima absoluta descrita en la Figura 12.

En cuanto a la temperatura media también se puede observar que varía un poco más de 1°C , sin embargo el promedio también está de acuerdo con el encontrado en esta investigación. En cuanto a la temperatura mínima se puede decir que se coincide que el mes de valores mínimos es enero por lo que a partir de esta época se observa el ascenso de las temperaturas. Sin embargo la señal de mitad de año en adelante no se aprecia de la misma manera y definitivamente los valores absolutos del IDEAM son mucho menores que los del período de estudio actual, lo que claramente se ve con los valores mínimos absolutos puesto que el rango de valores no baja de los 0°C mientras que en las del IDEAM casi todas son menores a 1°C como se aprecia en el panel c de la Figura 13.

En la Figura 14 se aprecia el ciclo anual de la DP del SKBO, en la cual se muestra un comportamiento casi constante de la temperatura del punto de rocío (DP) media. En la

línea de valores máximos de la DP, se observa un valor máximo total en diciembre de 22°C. En la DP media se observa un valor promedio de aproximadamente 9.4°C casi sin variación a lo largo del año con una desviación estándar de 0.61°C y una amplitud de muestra de 1.8°C. Mientras que los valores mínimos tienen una oscilación periódica casi mensual en la cual se aumenta y disminuye la DP de manera alternada, casi la mayoría entre 0°C y 1°C.

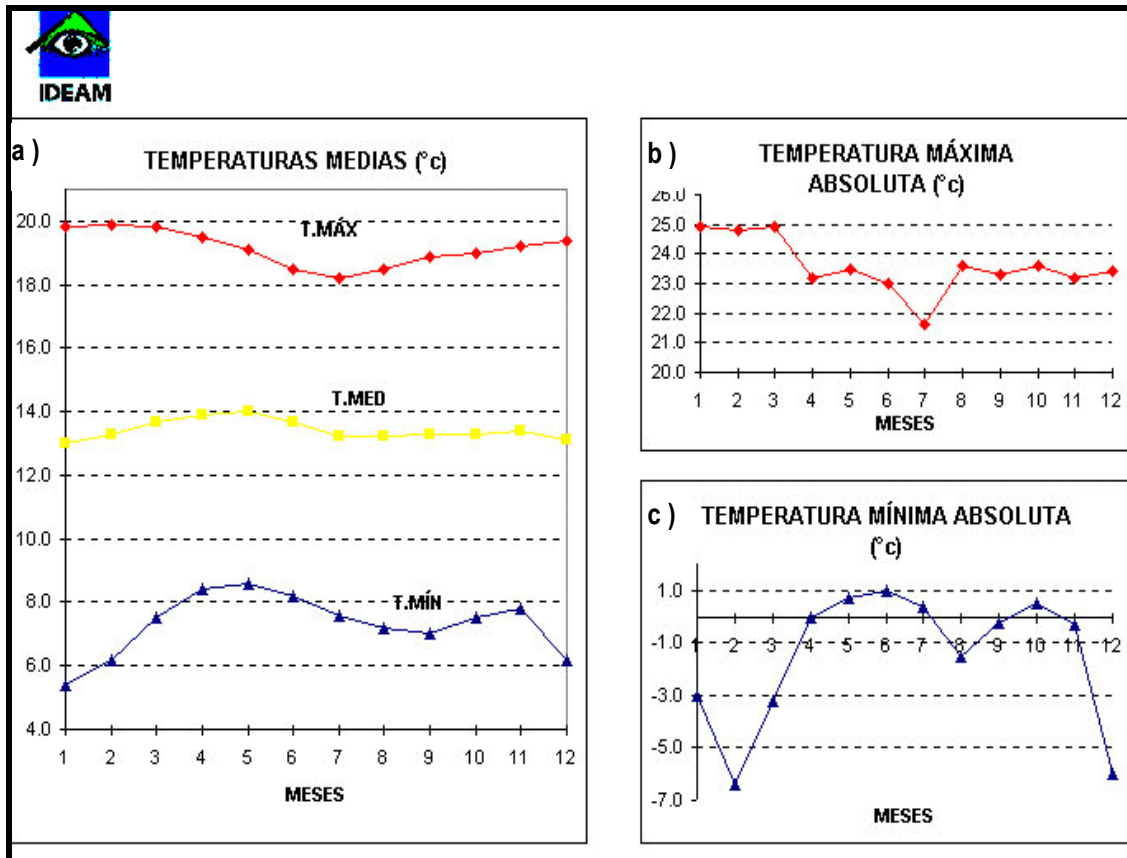


Figura 13: a) Promedios mensuales multianuales de la temperatura del aire mínima, media y máxima (°C); b) temperatura máxima absoluta multianual (°C) y c) temperatura mínima absoluta multianual (°C) en el SKBO en el período de 1974 a 1998 según el IDEAM (<http://bart.ideam.gov.co/cliciu/bogota/temperatura.htm>)

Las variaciones de la DP en general son pequeñas para los valores medio y mínimo y no muestran un ciclo anual marcado. Sin embargo para la DP máxima el rango de variación está entre los 14°C (presentada en agosto y octubre) y 22°C (presentada en diciembre) lo cual implica una diferencia de 8°C y un comportamiento irregular. La DP

mínima fluctúa alrededor de los 2°C con una desviación estándar de 1.48°C y la DP máxima fluctúa alrededor de los 18.1°C con una desviación estándar de 2.39°C.

La Figura 15 muestra los valores mensuales promedio de la temperatura del punto de rocío medio en el SKBO que fueron obtenidos a través de los datos de humedad relativa en la página del IDEAM. En esa página se reportan los valores promedios en el período de 1981 a 2010 de todas las estaciones climatológicas del país. A diferencia de la Figura 14, la Figura 15 si muestra un ciclo anual marcado.

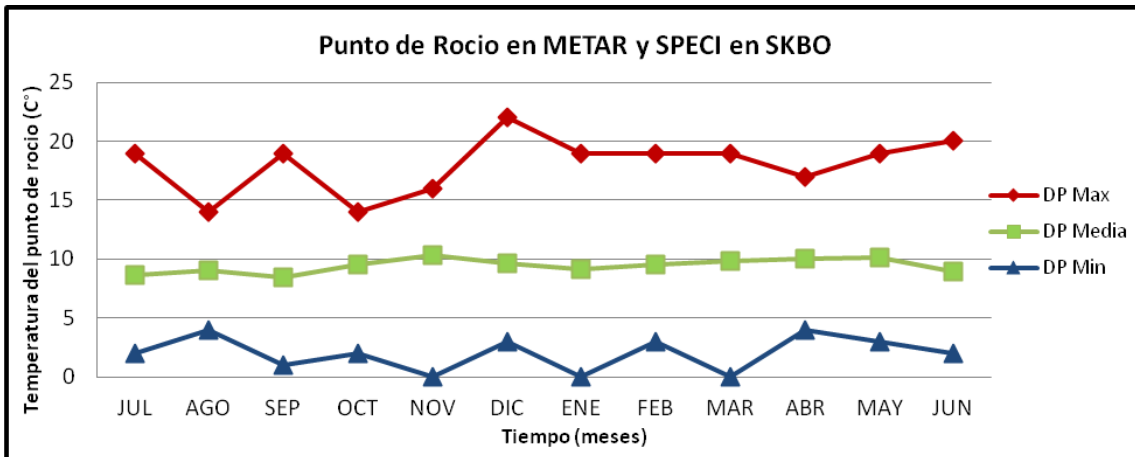


Figura 14: Promedios mensuales de la temperatura del punto de rocío mínima, media y máxima en el SKBO en el período del 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014

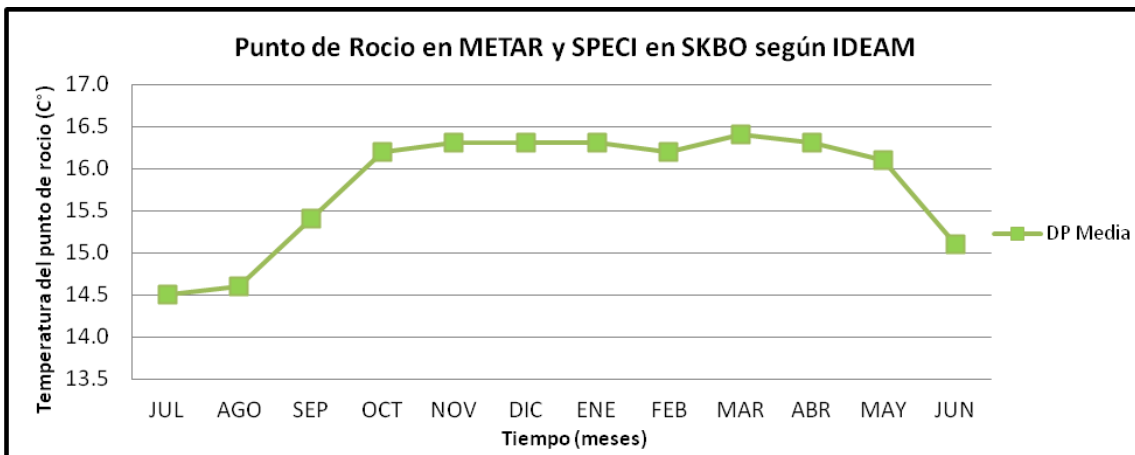


Figura 15: Promedios mensuales de la temperatura del punto de rocío media en el SKBO en el período del 1 de enero de 1981 al 31 de diciembre de 2010

La información del punto de rocío de la Figura 15 se obtuvo de aplicar la fórmula que se puede encontrar en la página web <http://www.astrosurf.com/astronosur/rocio.htm>, utilizando los datos de humedad relativa y temperatura media del SKBO en el período que se puede descargar de la página web del IDEAM <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/1769>:

$$Pr = \sqrt[8]{\frac{H}{100}} \cdot (112 + 0.9 \cdot T) + (0.1 \cdot T) - 112$$

Pr = Punto de rocío en grados Celsius (C).

T = Temperatura del aire en grados Celsius (C)

H = Humedad relativa en porcentaje (%).

4.1.2 Dirección e intensidad del viento de los reportes METAR y SPECI

En las Figuras 16 y 17 se muestra la distribución de la dirección del viento en el período de estudio. De los 26.562 reportes METAR y SPECI disponibles para el período del 01 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014, 4.533 indican viento variable (VRB), esto es un 17.1% del total, siendo el grupo con mayor cantidad de ocurrencias en el período de estudio, adicionalmente se aprecia cómo los faltantes de medición de viento dentro de la muestra de Reportes METAR (NNN en Figura 17) es casi despreciable. Además se aprecia que se presenta muy frecuentemente viento en calma en los tres años de estudio con alrededor de 1.133 ocurrencias.

Con el fin de conocer las direcciones del viento predominantes en el SKBO se realizó el gráfico de la rosa de vientos como se muestra en la Figura 16. En esta Figura en mención, se aprecia a la dirección nororiental (NE, 30° a 60°) como la predominante, siendo reportada en un 11.8% del total de registros (ver Figura 17). En general, los vientos que se presentan en el cuadrante oriental (E, 0° - 180°) son los más frecuentes, esto comprueba que en superficie se presenta el flujo de los alisios en gran parte del

año. Así mismo, se puede decir que los vientos provenientes de occidente se presentan en menor cantidad. El cuadrante con menor frecuencia de vientos es específicamente el cuadrante suroccidental (SW 210° a 240°).

En la Figura 18 se muestra la distribución de la intensidad del viento en el período de estudio. La intensidad del viento más común en la muestra es 02KT o 1,03 m/s, en general el viento es débil la mayoría del tiempo al tener los mayores valores de ocurrencia entre los 02 a los 08 nudos (KT) con un pico adicional menor en los 10KT. Adicionalmente, se aprecia que se pueden presentar en pocas ocasiones intensidades del viento de hasta 25KT pero que realmente a partir de los 14KT es muy baja la frecuencia y casi despreciable pues representan menos del 1% del total de reportes de intensidad del viento para el período de estudio.

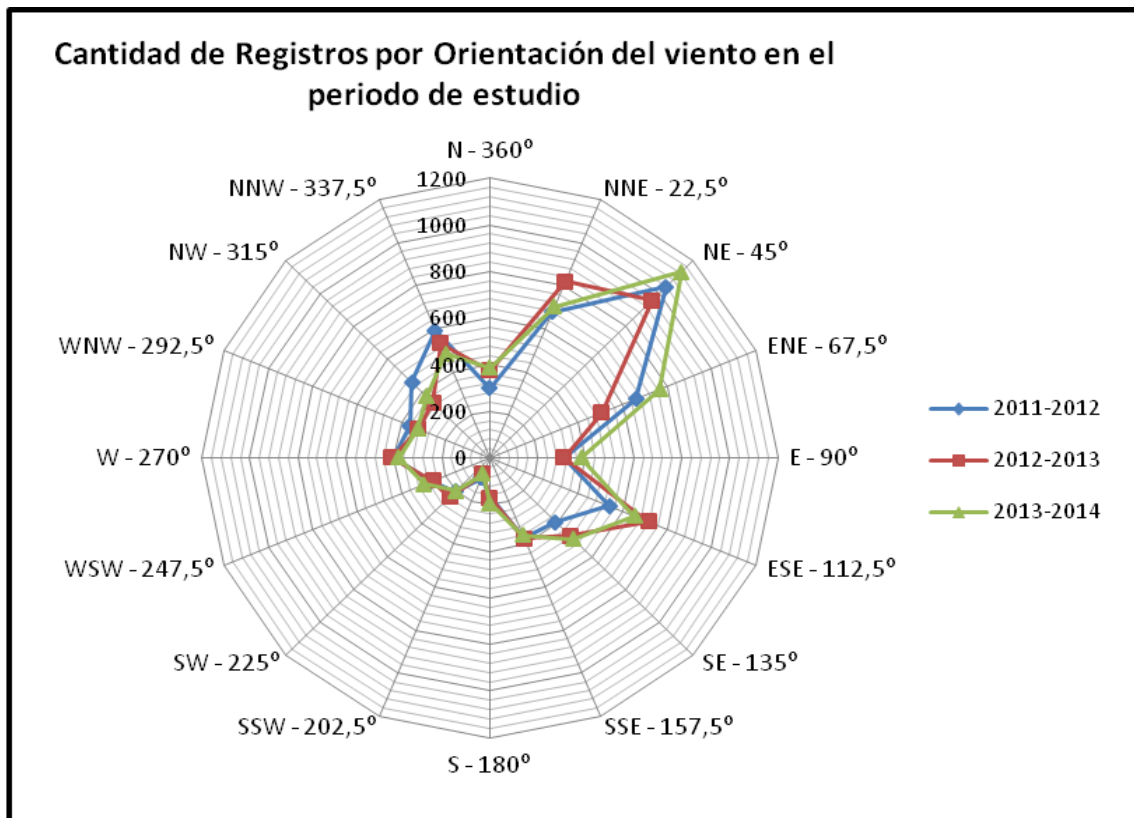


Figura 16: Rosa de los vientos de los reportes METAR y SPECI del SKBO para el período del 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014

De la Figura 18 se nota que los vientos que son reportados por el observador en calma (es decir aquellos que son menores a 1KT o que no está soplando el viento de ninguna dirección y sin fuerza aparente) no son muy comunes en el SKBO, pues apenas representan un 4,3% de la muestra. En cuanto a la distribución multianual de la intensidad del viento es muy similar en los 3 años en general exceptuando un leve aumento en el año 2013-2014 de la ocurrencia de vientos de 02KT, de 05KT y 10KT. Adicionalmente los máximos de intensidad se presentaron en este período, alcanzando hasta 25KT de intensidad en 8 oportunidades. El valor de 20KT correspondió a las intensidades máximas tanto del primer como del segundo año de estudio.

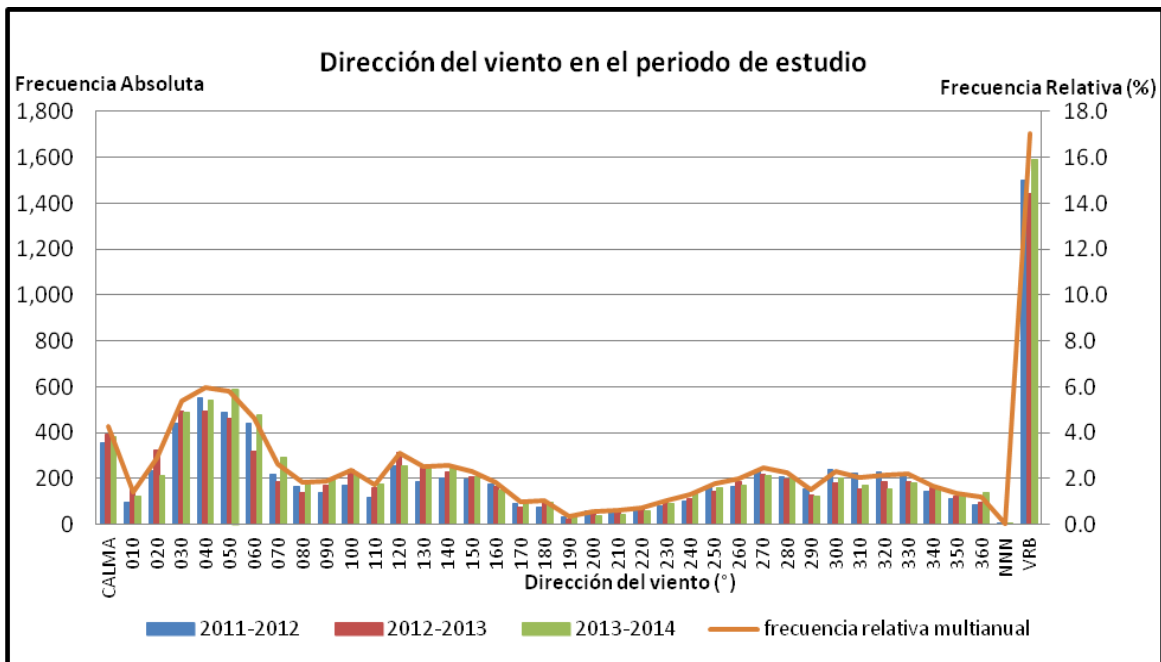


Figura 17: Frecuencia absoluta anual y frecuencia relativa multianual de la dirección de los vientos en reportes METAR y SPECI del SKBO para el período del 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014. (Donde NNN fueron reportes METAR sin dato de dirección del viento)

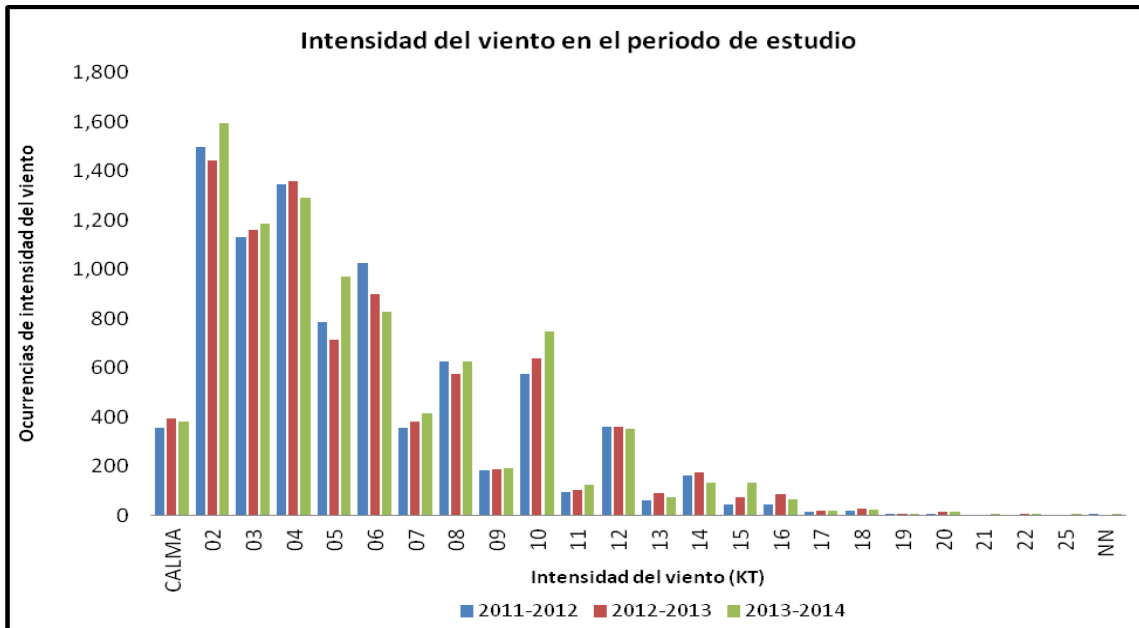


Figura 18: Intensidad de los vientos en reportes METAR y SPECI del SKBO para el período del 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014. (Donde NN fueron reportes METAR sin dato de intensidad del viento)

4.1.3 Presión de los reportes METAR y SPECI

El dato del reporte METAR es el del ajuste altimétrico, como se explicó en el marco teórico, con el cual se calibra el altímetro para que el piloto conozca la altura a la cual está volando, es así como los valores encontrados en SKBO son de aproximadamente 1022 mb y no de 700Mb (aproximación) como si lo debe ser el QFE o isobara que pasa por SKBO aproximadamente.

En la Figura 19 se muestra la distribución de la presión en el período de estudio en la cual se puede apreciar que los rangos de valores de las presiones máximas y medias son pequeños a lo largo de año. Sin embargo de la presión mínima se puede observar un mayor rango de variabilidad y que exhibe dos épocas de valores más altos en los meses de julio y abril (siendo 30.18”Hg y 30.17”Hg, respectivamente 1022.01 hPa y 1021.67 hPa), adicionalmente se presentan tres mínimos de los valores mínimos medios en los meses de junio, mayo y agosto (con 30.01”Hg, 30.05”Hg y 30.06”Hg, respectivamente 1016.25 hPa, 1017.61 hPa y 1017.95 hPa).

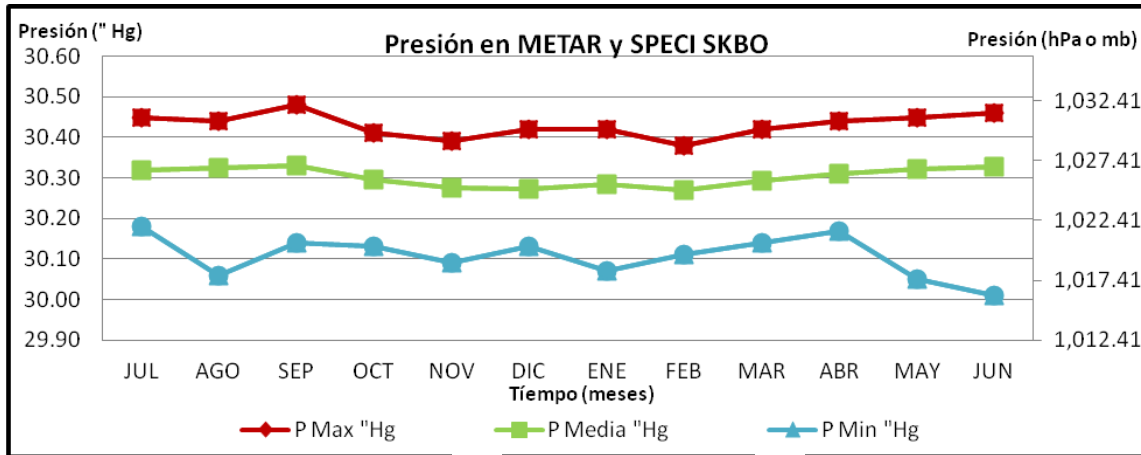


Figura 19: Promedios mensuales de la presión mínima, media y máxima en el SKBO en el período del 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014

Los valores encontrados en este estudio son consistentes con los encontrados por Rojas (2012), tanto para los valores máximos y mínimos absolutos en SKBO para un periodo de estudio más amplio como lo es la serie del 2001 al 2007, así mismo se aprecia que los valores medios mensuales son un poco más elevados para el periodo 2011-2014 que para los encontrados por Rojas (2012).

4.2 Ocurrencia de eventos relacionados con sistemas convectivos

Se analizaron inicialmente todos los 26.622 reportes METAR y SPECI para el SKBO para el período de estudio, 1 de julio de 2011 a 30 de junio de 2014, que se encontraban en la base de datos del Sistema de Información meteorológica de la Fuerza Aérea Colombiana - SIMFAC.

En una primera fase del trabajo se hizo una depuración de la base de datos del SIMFAC con el cual se eliminaron 59 registros que no correspondían a registros del SKBO sino que por error del sistema AMHS se introdujeron en la serie de datos. La AMHS es la red de distribución de datos de la UAEAC que alimenta a su vez la base de

datos del SIMFAC. La depuración se hizo comparando los datos del SIMFAC con la base de datos del IDEAM que ya estaba depurada manualmente.

De los 25.568 METAR y 995 SPECI reportados, para el período de estudio, en el SKBO faltaron 712 (2,7%) reportes METAR para tener la serie de datos completa, esto corresponde a 59 reportes eliminados y 653 reportes faltantes en la base de datos del SIMFAC, por lo que la muestra es lo suficientemente amplia para analizar la presencia de sistemas convectivos en el SKBO.

Después de la depuración se seleccionaron los reportes METAR y SPECI que informaban la presencia de: El fenómeno de tormenta (TS) o nubes de tipo convectivo como son los torrecúmulos (TCU) y los cumulonimbus (CB). Además, se determinaron los días y las horas en las que se presentaron estos fenómenos. Específicamente se extrajeron 2338 reportes, de los cuales 2128 son reportes METAR y 210 reportes son reportes SPECI para analizar los fenómenos de interés.

Se realizaron histogramas para evidenciar el número de eventos con los fenómenos de interés que para este estudio son TS, CB y TCU. Adicionalmente, se estudió también el criterio de gravedad de las condiciones meteorológicas para la aviación. Para el SKBO, la mayor afectación corresponde a los eventos en los cuales se reportó en los informes METAR o SPECI el cierre del aeródromo o la operación del aeródromo bajo Condiciones Meteorológicas por Instrumentos (IMC). Según Rojas (2012), estas dos condiciones especiales del aeródromo son bastante críticas porque reducen las 60 operaciones horarias promedio que se realizan en el Aeropuerto El Dorado y cada reducción de esta afluencia de tráfico se ve traducida en pérdidas monetarias para las compañías aéreas, las cuales deben ser minimizadas al máximo.

De acuerdo a las políticas de cierre y estatus de operación en instrumentos del SKBO, a pesar de que las condiciones meteorológicas en SKBO sean críticas (por ejemplo que haya presencia de sistemas convectivos tanto dentro del aeródromo como en el perímetro circundante, lo que se reporta como vecindad, o que el aeródromo deba operar bajo condiciones IMC), no siempre se toma la decisión de cierre o de operación restringida. En esos casos se efectúa la evaluación del sector o cuadrante afectado. Si la formación convectiva definitivamente afecta las dos pistas o las aproximaciones,

entonces si se declara el cambio del estado de operación del SKBO en el reporte METAR. Si por el contrario, la afectación es parcial, al interior de la UAEAC se toma la decisión de restringir el uso de una pista, o de cambiar el sentido de ingreso de los aviones o la cabecera de la pista en uso, o se restringen corredores de aproximación o de salida del aeródromo, o se priorizan los aterrizajes por encima de los despegues o se generan las demoras en tierra y no en vuelo. Las demoras en vuelo generan mayores riesgos y gasto de recursos, como el combustible.

De modo que, a pesar de que la presencia de sistemas convectivos es un fenómeno común y de gran impacto para la aviación, la verdadera magnitud de la afectación de SKBO por su presencia no se puede determinar a través de los estatus de cierre u operando bajo condiciones IMC en el reporte METAR. Por otra parte y sin demeritar la afectación monetaria, no se puede descartar la posible ocurrencia de accidentes o incidentes a causa de todos los fenómenos adversos a la aviación implicados en los sistemas convectivos. Como ejemplo de afectación en el área terminal de un aeródromo por presencia de sistemas convectivos en la vecindad y sobre la estación, está el caso del vuelo de la compañía Aires, que se accidentó en San Andrés Isla el 16 de agosto de 2010.

El total anual de reportes METAR o SPECI por hora del día en presencia de cualquiera de los fenómenos (TCU, CB y/o TS) se muestra en la Figura 20. Las horas en las que se producen más de 20 reportes están entre las 11:00 HLC (16 UTC) y las 20:00 HLC (01 UTC). El año en el cual se presentó la mayor cantidad de reportes de los 3 fenómenos fue el 2011-2012. Por el contrario, el que menos reportes presentó fue el año 2012 – 2013.

Se tendrán en cuenta más adelante la presencia de los 3 fenómenos que generan cierres y que reportan la operación instrumentos del SKBO pues hacen que la visibilidad esté por debajo de 1000 m, el techo de nubes esté por debajo de 500 pies de altura o ambas condiciones. Criterios con los cuales se realiza la selección los casos de estudio.

Desde las 02 UTC (21:00 HLC) hasta las 15 UTC (10:00 HLC) disminuye significativamente la cantidad de reportes, incluso llegando a ser cero entre las 08 UTC a las 10 UTC y las 12 UTC a las 13 UTC.

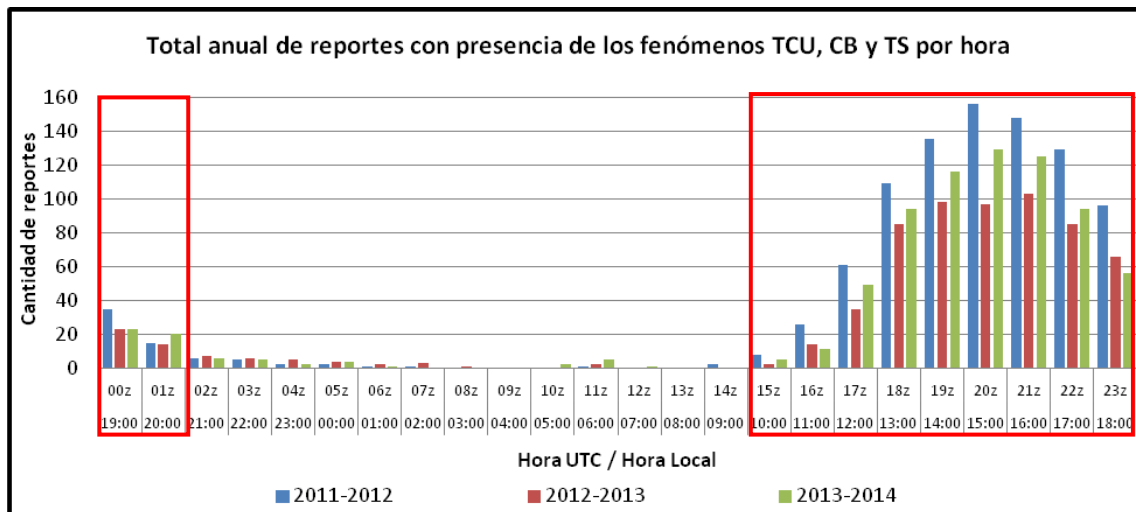


Figura 20: Número de reportes METAR y SPECI en cada hora del día, con presencia de los fenómenos TCU, CB y TS en el SKBO en el período 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014

Es interesante ver la cantidad de reportes entre las 17 UTC y las 00 UTC es considerablemente mayor. Dentro de este lapso se observa que las horas más críticas en las que los fenómenos convectivos se pueden presentar con mayor frecuencia son entre las 18 UTC y 22 UTC, alcanzando más de 80 casos cada año. Se puede afirmar que en horas de la tarde la posibilidad que se presente un evento convectivo es definitivamente mayor que en horas de la madrugada o de la mañana cuando es poco probable que se presente.

Esta distribución a lo largo del ciclo diurno a raíz de la rotación de la Tierra, nos permite afirmar que se requiere del factor calentamiento como ingrediente de importancia para que se presenten las condiciones atmosféricas propicias para la presencia de fenómenos convectivos en SKBO y que por ende, es correcto decir que los fenómenos son especialmente diurnos.

La Figura 21 muestra que el mes de noviembre es el mes en el cual los fenómenos TCU, CB y TS se presentan con mayor frecuencia para el período de estudio. Este mes también pertenece al trimestre para el cual se produce el mayor número de reportes, que es octubre-noviembre-diciembre (OND). Esto se atribuye al paso de la zona de confluencia intertropical (ZCIT) por el centro de Colombia, lugar donde está ubicado geográficamente el aeródromo SKBO, de modo que hay una mayor inestabilidad en la atmósfera que da lugar a sistemas convectivos. En la gráfica se aprecia que las nubes de tipo TCU son las más comunes dentro de los 3 años de estudio, seguido de los CB que tienen casi la misma ocurrencia que las TS. También es importante notar que los meses con menor ocurrencia de los fenómenos son los meses de junio y julio, incluso los meses de agosto y septiembre también presentan cifras bajas de ocurrencia.

Por otra parte se aprecia que el trimestre que más cantidad de fenómenos convectivos en el aeródromo SKBO durante el tiempo de estudio corresponde al cuarto trimestre del año 2011 (OND de 2011) en el cual según información del índice ONI reportan se presentó un evento La Niña leve (<http://ggweather.com/enso/oni.htm>, 2014)

Por otra parte es interesante notar que en meses como julio la actividad convectiva es casi nula prueba de esto es que sólo se presentan nubes tipo TCU y casi no hay TS ni nubes CB. En julio la atmósfera se presenta más estable al encontrarse la ZCIT en el norte del país debido al verano del hemisferio norte.

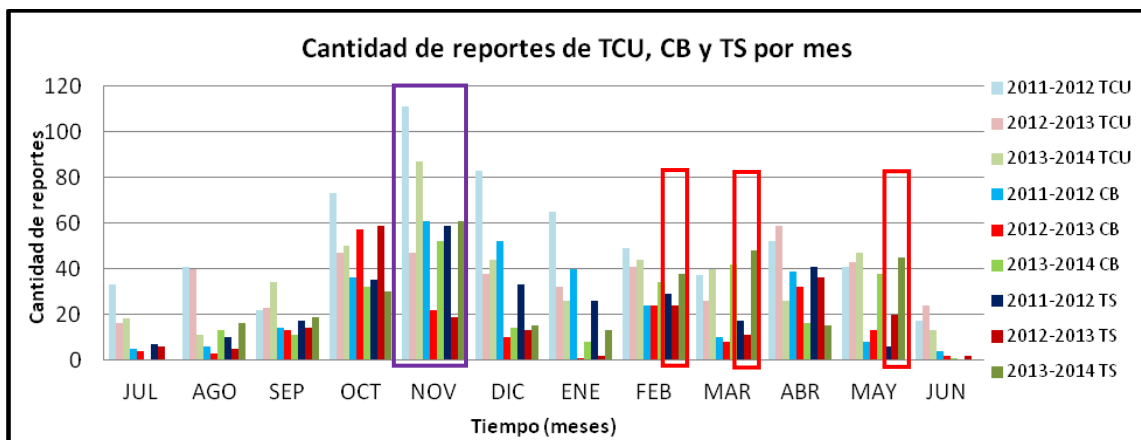


Figura 21: Número de reportes METAR y SPECI que reportaron, en cada mes del año, los fenómenos TCU, CB y TS en el SKBO en el período 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014

Es interesante ver como en los meses de junio y julio no se presenta ningún reporte de TS en el último año de estudio. También es interesante ver que éste fenómeno (TS) en el año 2014 se presenta con mayor frecuencia que en los años 2012 y 2013 para los meses de febrero, marzo y mayo, especialmente en los dos últimos meses en mención donde aumentan casi al doble la cantidad de reportes de TS. Situación que también ocurre con los CB en los mismos meses. En el resto de meses el patrón es el contrario, en la que en la mayor cantidad de los meses, se observa que los hay menor número de fenómenos tipo CB o TS en el año 2013-2014 que en los demás años.

También se observa que no se presenta ningún reporte de CB en el mes de julio de 2013 y sólo hay un caso en junio del año 2014, siendo esto consistente con la no presencia de TS en el aeródromo. Por otra parte, se puede apreciar que se disminuye casi a cero la cantidad de reportes de CB y por ende de TS en el año 2012-2013 para los meses de junio y enero.

En la Figura 22 se aprecia la distribución de eventos por mes de acuerdo al período de doce meses escogido. Al hablar de **un evento** se entiende la presencia de uno o varios de los fenómenos de estudio TS, TCU y CB en reportes METAR consecutivos y esta aclaración se debe a que existen dos clases de reportes METAR para este estudio:

- clase 1: reportes METAR que registran un sólo fenómeno, siendo este el más común de los casos y
- clase 2: reportes METAR que registran dos fenómenos de interés a la vez o incluso los tres.

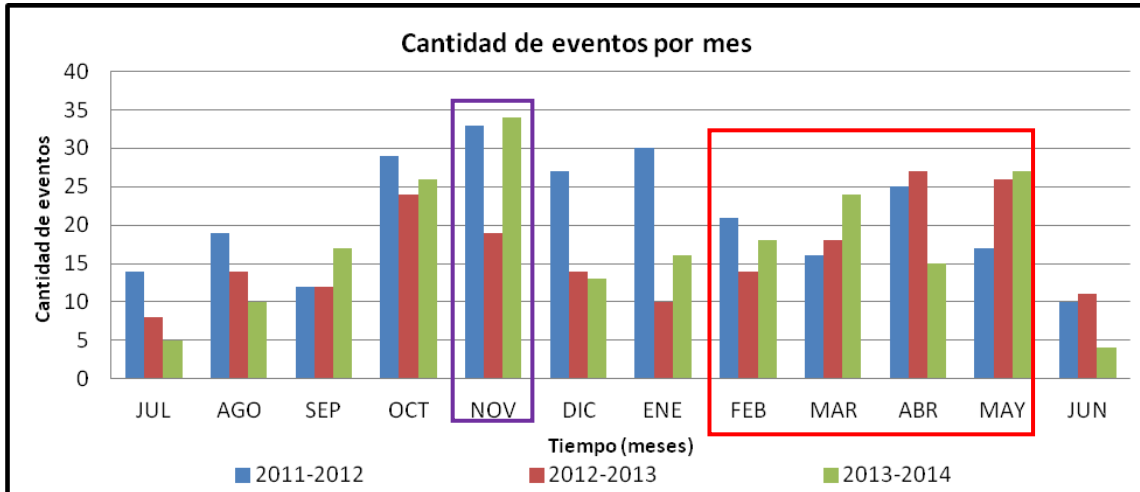


Figura 22: Cantidad de eventos mensuales en el SKBO en el período 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014

En la Figura 22 se aprecia como en 2 de los 3 años de estudio tiende a haber más eventos en el mes de noviembre, exceptuando el período 2012 -2013 en el cual el mayor número de eventos se presentó en el mes de abril. En general el bimestre de más eventos fue el de octubre-noviembre seguido del bimestre abril-mayo. Por otra parte existe un pico no tan pronunciado como el de noviembre en el cual se observa un ligero aumento de los casos en los meses de marzo, abril y mayo.

Para los años neutros de ENSO, es decir desde 2012 a 2014, se pueden observar unos meses de relativa poca frecuencia de eventos convectivos como lo son los meses de enero, febrero, e incluso diciembre tiene una baja frecuencia, y la época de junio y julio, en especial son épocas en las cuales hay mucha menos ocurrencia de sistemas convectivos en SKBO. Como ya se mencionó antes, esta forma bimodal de la presencia de los sistemas convectivos se debe al paso de la ZCIT por el centro del país donde geográficamente se ubica el aeródromo de interés, la cual favorece la presencia de sistemas convectivos.

En la Figura 23 se muestra la distribución de la duración en horas de los eventos por año, en el cual se puede apreciar que la mínima duración para los eventos es media hora que es la mínima cantidad de tiempo que se puede apreciar con los reportes

SPECI disponibles y que la máxima duración en horas de evento fue de 9 horas continuas.

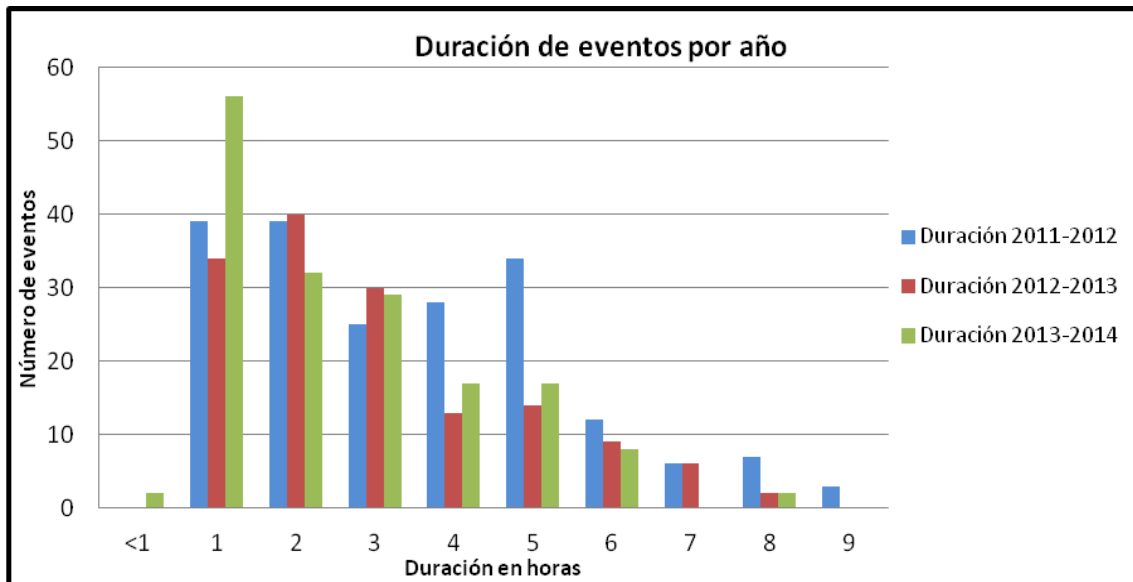


Figura 23: Número de eventos en el SKBO en el período 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014 según la duración en horas

Así mismo, se puede apreciar que la duración más común en la cual se encuentra la mayor cantidad de eventos en los tres años es 1 hora, la segunda duración más común fue la de 2 horas. En los años 2012-2013 y 2013-2014 se puede apreciar casi un mismo tipo de distribución en la cual a partir de la duración 2 horas, el número de eventos disminuye a medida que aumenta el tiempo de duración de evento. En el año 2011-2012 hay un gran número de eventos de duraciones entre 1 y 5 horas y sólo a partir de la duración de 5 horas, el número de casos disminuye monótonamente a medida que aumenta el tiempo de duración de evento.

La duración prolongada de eventos, superior a 6 horas, denota la posible presencia de eventos de tipo sinóptico que por su duración serían considerados sistemas convectivos de mesoescala. La presencia del evento La Niña leve, también influye en el número elevado de eventos de larga duración del año 2011-2012.

4.2.1 Análisis de reportes METAR y SPECI que registran actividad convectiva

Por otra parte se evaluaron cada una de las variables meteorológicas que se explicaron con anterioridad en el documento pero esta vez sólo en las ocasiones en las cuales los reportes METAR registran ya sea TCU, CB o TS en cualquiera de sus combinaciones. En comparación con los valores que se presentan en la Figura 12 (de temperaturas del aire máxima, media y mínima para todo el período de estudio sin hacer distinción por la ocurrencia de sistemas convectivos), el comportamiento de la temperatura del aire varía en presencia de TCU, CB o TS, como se aprecia en la Figura 24. Las temperaturas máximas en el aeródromo fluctúan alrededor 20° C (y no alrededor de 22° C como en la Figura 12). Las temperaturas promedio fluctúan alrededor un valor más alto, 16°C (y no alrededor de 13.7° C) y las temperaturas mínimas fluctúan alrededor de los 10.3° C (en vez de los 4° C).

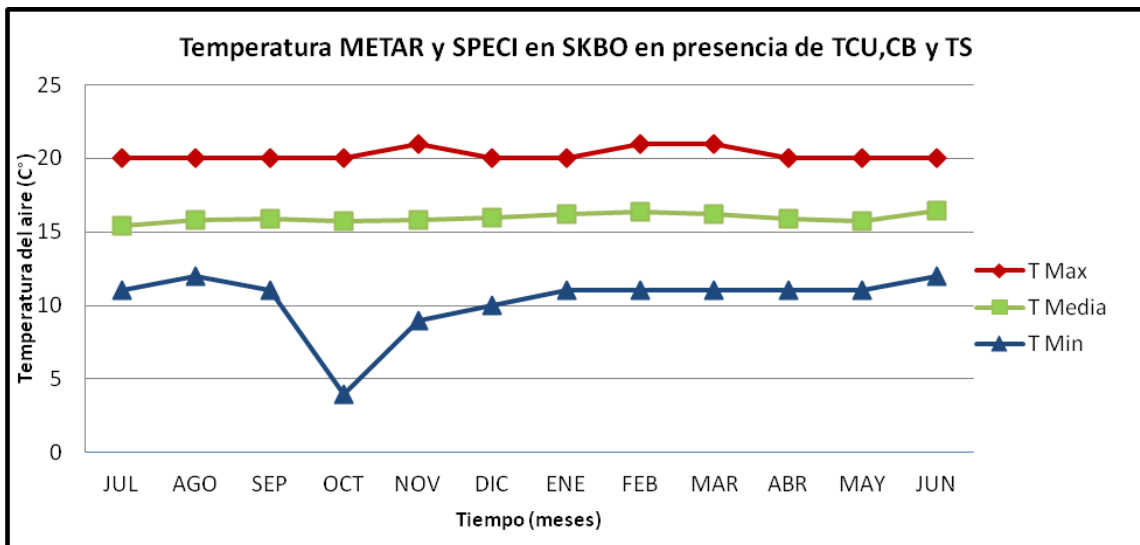


Figura 24: Temperatura en el SKBO en el período 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014 en presencia de TCU, CB y TS

Es de resaltar que en cuanto más calentamiento se presenta, hay más posibilidades que se presente la evaporación de los cuerpos de agua y que cualquier tipo de humedad disponible en capas bajas estará disponible para ascender con mayor intensidad hacia capas más altas de la atmósfera, haciendo que la parcela cambie

rápidamente de estado al enfriarse a medida que sube en la vertical. De este modo se crean corrientes ascendentes que forman nubes de desarrollo vertical como las nombradas en los reportes METAR (TCU y CB) y que finalmente desatan TS en muchas ocasiones.

Un análisis similar se realizó con las variables DP y P y no se encontraron mayores cambios que aporten a la investigación.

Como se aprecia en la Figura 25, el comportamiento de la dirección del viento en presencia de TCU, CB o TS varía considerablemente en comparación con los valores que se presentan en la estadística total para todo el período de estudio (Figura 17). La dirección del viento en el aeródromo muestra que en presencia de actividad convectiva las componentes predominantes son SW (210° - 231°), W (254° - 275°) y NW (298° - 319°) en vez de E (078° - 099°) o SE (122° - 143°). Esto quiere decir que los sistemas convectivos implican otro tipo de fuentes de humedad como la que por advección proviene del valle del río Magdalena, que es uno de los ríos más importantes del país.

Por otra parte los casos con viento en calma son poco comunes, con menos de 10 casos por año, así mismo es importante notar que la dirección del viento variable (VRB) antes de las más comunes en las estadísticas totales, es de 16%. Se destaca que, en el año de 2011 – 2012 las dos direcciones de viento más comunes son 280° y 270°, representando un 30.5% y 28.3% de la muestra, respectivamente.

Con el fin de hacer énfasis en las direcciones del viento predominantes en SKBO en presencia de los fenómenos de interés, se realiza adicionalmente el gráfico de la rosa de vientos como se muestra en la Figura 26, en la cual se aprecia que la dirección W como la predominante lo que implica que en superficie se presenta una inversión del flujo de los alisios en la mayoría de los casos y que los vientos provenientes del Occidente son los más comunes cuando hay actividad convectiva.

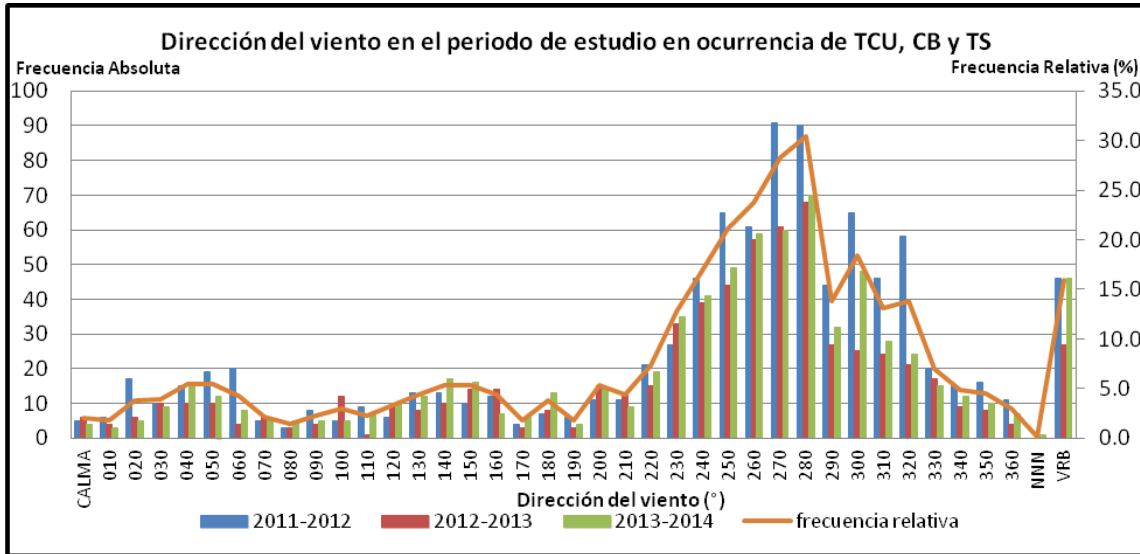


Figura 25: Dirección de los vientos en reportes METAR y SPECI del SKBO para el período del 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014 en presencia de TCU, CB y TS (Donde NNN fueron reportes METAR sin dato de dirección del viento)

En la Figura 27 se muestra la distribución de la intensidad del viento en el período de estudio para los casos que presentan al menos uno de los 3 fenómenos de interés. Donde se aprecia que en general en SKBO el viento aumenta su intensidad en presencia de los fenómenos TCU, CB y TS. También se aprecia que los vientos con mayores valores de ocurrencia están entre los 02 y los 14KT, siendo 10KT la intensidad del viento más frecuente en la muestra. En cambio, los vientos en calma son los menos frecuentes. Adicionalmente se aprecia que en pocas ocasiones se pueden presentar intensidades del viento de hasta 25KT. Realmente, los eventos con vientos a partir de los 16KT son de muy baja frecuencia, casi despreciable, pues representan menos del 1% del total de reportes de intensidad del viento para el período de estudio. La Figura 27 muestra que para el año 2011-2012 se reportan mayores intensidades del viento.

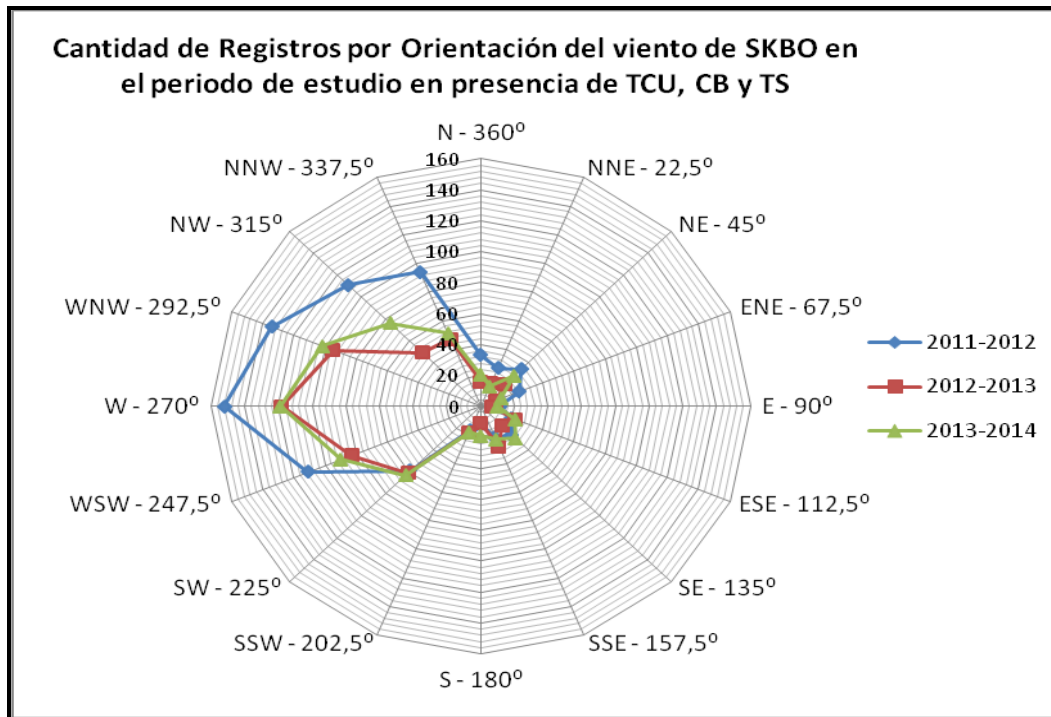


Figura 26: Rosa de los vientos de los reportes METAR y SPECI del SKBO para el periodo del 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014 en presencia de TCU, CB y TS

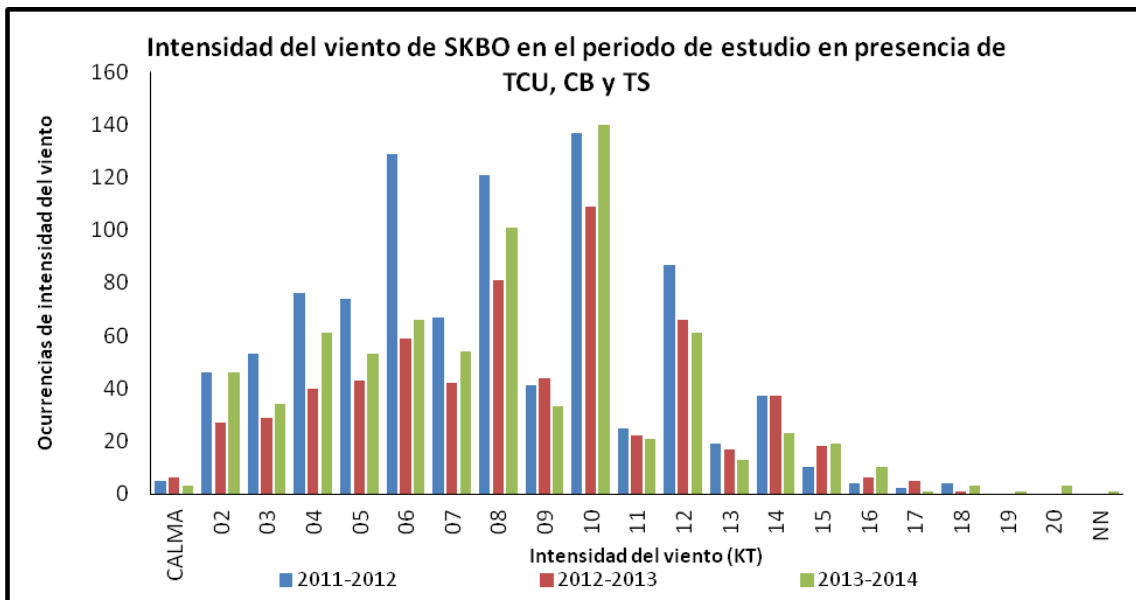


Figura 27: Intensidad de los vientos en reportes METAR y SPECI del SKBO para el periodo del 1 de julio de 2011 al 30 de junio de 2014 en presencia de TCU, CB y TS (Donde NN fueron reportes METAR sin dato de intensidad del viento)

4.3 Casos de Estudio

Se tuvieron en cuenta tres eventos en los cuales se presentó TCU, CB o TS considerados de larga duración (segundo episodio del 22-11-11) e intensidad (gravedad o importancia para la aviación, el primer episodio del 22-04-14). El último caso fue escogido por presentarse en condiciones poco comunes (tercer episodio ocurrió en un mes poco común el 25-06-13).

4.3.1 Episodio 1, 22 de abril de 2014

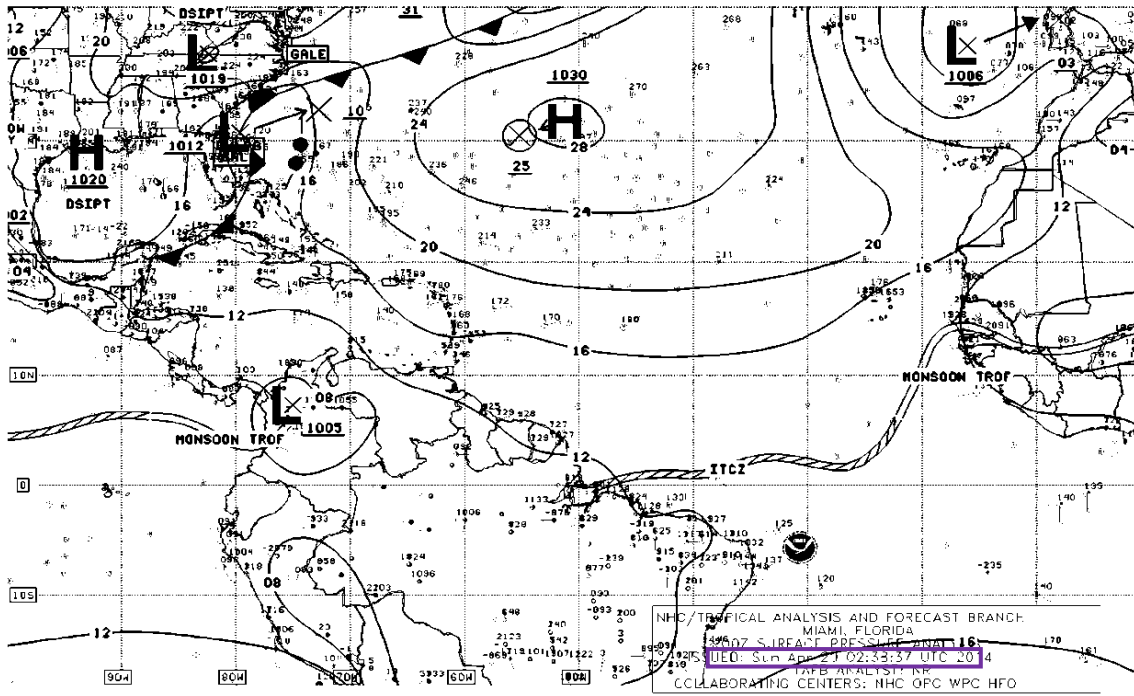
Descripción del evento:

El presente evento es escogido por la grave consecuencia que tuvo sobre el SKBO, puesto que es el único caso en los 3 años de estudio en el cual fue necesario cerrar el aeropuerto Internacional El Dorado al menos por 45 minutos debido a condiciones meteorológicas y con presencia del fenómeno de tiempo presente tormenta con lluvia (TSRA). De acuerdo al análisis de superficie (Figura 28), el día 22 de abril de 2014 el día anterior a la ocurrencia del evento, sobre el territorio colombiano se encontraba desplazándose el centro de una baja presión desde el noroccidente hacia el centro de la región Andina, favoreciendo la formación de nubosidad de tipo cumuliforme de desarrollo vertical en la región Andina, debido a la convergencia en capas bajas que la baja presión crea, adicionalmente teniendo en cuenta que la Zona de Convergencia Intertropical se encuentra sobre el Pacífico entre las latitudes 4°N y 5° N (en la cual se encuentra Bogotá) y en el Atlántico se encuentra sobre la latitud del Ecuador más cerca al continente americano y subiendo de latitud lentamente hasta la longitud 30°W a partir de la cual asciende de latitud abruptamente llegando a los 20°W a los 10 °N de latitud.

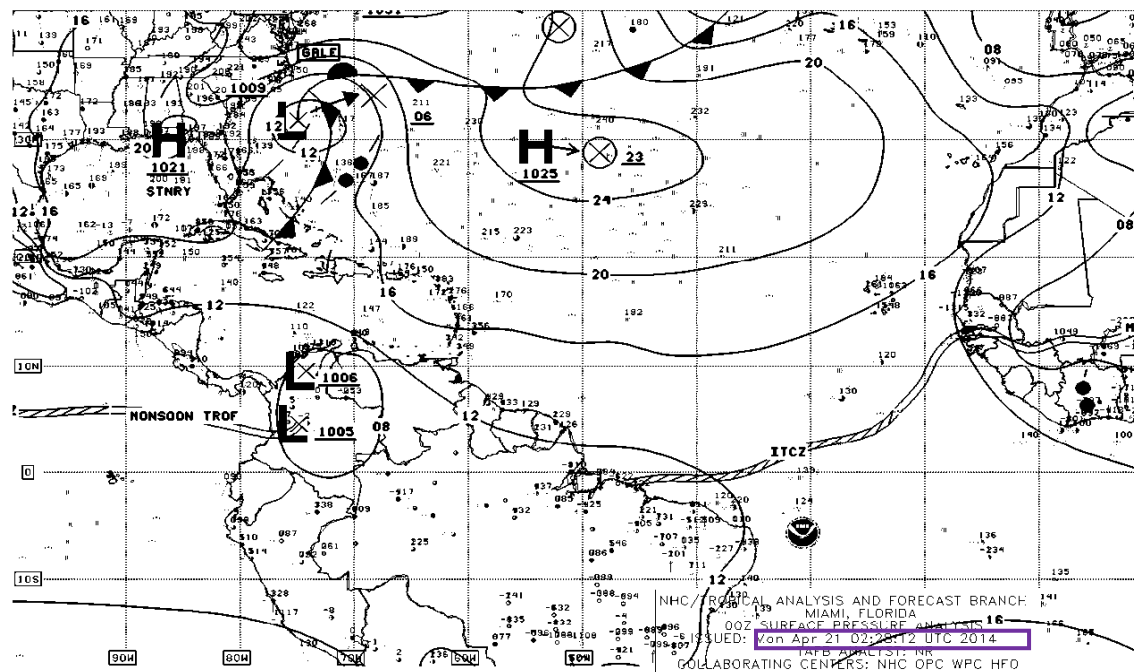
Dentro del territorio Colombiano se espera que haya una conexión entre la ZCIT con las bajas presiones presentes en ese momento sobre SKBO, lo que hace que se advectione humedad y se genere una mayor inestabilidad que favorezca la convección profunda sobre el Aeropuerto. A pesar del desplazamiento de la baja presión hacia el

nororiente, se ve que el área que encierra la isobara de 1008 mb incluye siempre la posición del SKBO.

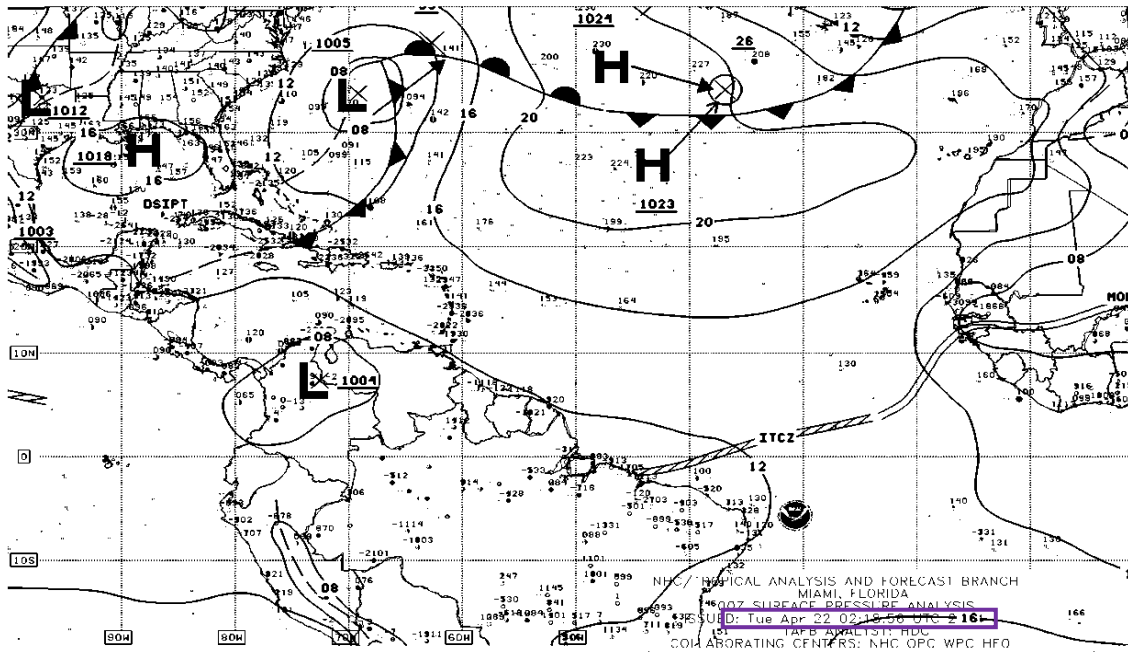
a)



b)



c)



d)

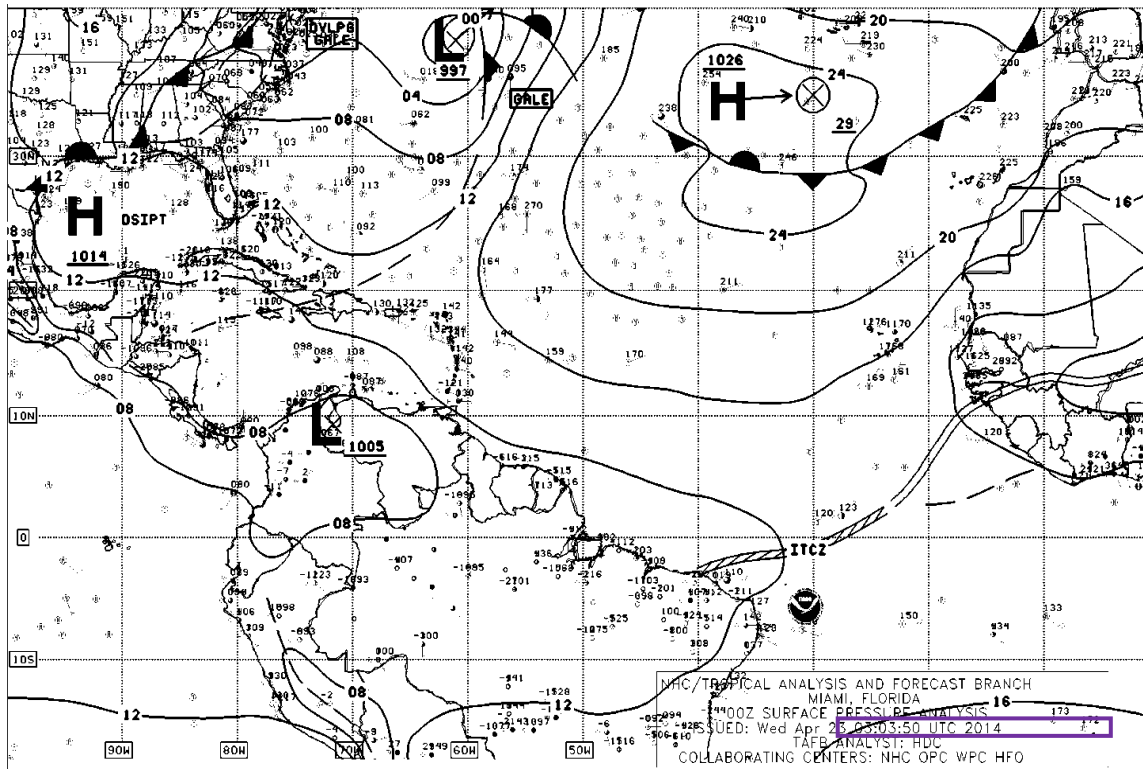


Figura 28: Análisis de superficie para el 20 (a), 21 (b), 22 (c) y 23 (d) de abril de 2014, 00 UTC (NWS DIFAX Weather Map Archive, 2015)

Se realizó adicionalmente un nefoanálisis de las imágenes de satélite del GOES 13 para Colombia, con el fin de efectuar un análisis de la nubosidad para verificar la presencia de sistemas convectivos. En la Figura 29 se pueden observar sistemas convectivos sobre el SKBO. Al observar las imágenes de los diferentes canales, se aprecia una alta respuesta de pixel en cada uno de ellos durante las horas que componen el evento.

En el canal visible, a partir de las 18:15 UTC se observa un alto albedo lo que implica una composición de nubes de hielo en la región que incluye el SKBO y su área circundante. Adicionalmente, se aprecia un desplazamiento de la masa nubosa de SE a NW y se puede apreciar cómo se van generando más nubes tipo cirrus en la parte más alta de los sistemas a medida que transcurre el tiempo. Las nubes tipo cirrus tienen un aspecto lechoso que se aprecia en las imágenes del canal visible. Es interesante ver cómo en las primeras horas del evento (ver Anexo B Figura 53, imágenes del canal visible) se denotan los bordes redondeados de los sistemas haciendo referencia a torrecúmulos bien definidos y cómo aparece el penacho de cirrus al final del período en el que se reporta el evento.

El canal infrarrojo permite ver topes bastante fríos de la nubosidad denotando que estos topes alcanzan un nivel alto de la atmósfera en la que los topes pueden contener agua sobrenfriada y cristales de hielo. En especial, en las primeras horas del evento (ver Anexo B Figura 53, imágenes del canal IR) se observa en la atmósfera media y alta una alta cantidad de humedad así como en el canal visual se observa nubosidad cumuliforme bastante brillante por el alto albedo de su tope sobre el SKBO de formas redondeadas y en las cuales se aprecian las sombras que permite ver la profundidad de la nube en la vertical.

En las imágenes del vapor de agua (ver Anexo B Figura 54, imágenes del canal vapor de agua) se puede ver como el sentido de movimiento se encuentra de SE a NW esto por la influencia de los sistemas de latitudes altas los cuales están jalando la nubosidad en capas medias y altas desde la Amazonia y el pie de monte llanero hacia las cordilleras. Es así como a las 18:15UTC también se presentan los valores más altos de humedad en la columna de aire y se aprecia cómo se desplazan hacia el NW. Cabe

aclarar que durante todo el lapso que dura el evento hay valores considerables de vapor de agua en capas medias y altas de la atmósfera denotando la presencia de sistemas convectivos en el sector.

Analizando los reportes METAR y SPECI previos al evento y durante el evento (como se pueden observar en el Anexo A) se encontró lo siguiente: El evento se presenta entre las 18:35 UTC y las 22:00 UTC, para un total de 3 horas y media de duración del evento. Se incluye la descripción de 5 reportes anteriores (4 reportes METAR y 1 reporte SPECI) para tener en cuenta los acontecimientos previos al evento.

Entre las 15:00 UTC (10:00 HLC) y las 18:00 UTC (13:00 HLC) del 22 de abril de 2014, los informes METAR y SPECI reportaron viento variable o procedente del cuadrante NW de la rosa de los vientos y con intensidad leve entre los 02 (1,03 m/s) y los 06 KT (3,09 m/s), visibilidad ilimitada (superior a 10 km) o de 8000 m. La visibilidad se redujo a 8000 m entre las 17:00 UTC (12:00 HLC) y las 18:00 UTC (13:00 HLC) por el fenómeno de llovizna ligera (-DZ), la cual se formó en la hora y media anterior al inicio del evento.

La temperatura del aire estuvo entre los 16°C y 17°C, el punto de rocío se va acercando a la temperatura del aire encontrándose a 6°C de diferencia en los reportes entre las 15:00 UTC (10:00 HLC) y 17:00 UTC (12:00 HLC), y en los dos últimos reportes a tan sólo 4°C de diferencia de la temperatura del aire (17:20 UTC a 18:00 UTC). Asimismo el QNH se encuentra disminuyendo desde los 30,36" Hg (1024,72 mb) hasta los 30,29" Hg (1025,73 mb), disminuyendo 0.07" Hg (2,37Mb) en total en fase previa al evento.

Durante el evento se aprecia un cambio en la dirección del viento significativo al venir del cuadrante SW de la rosa de los vientos y variable en 3 ocasiones (ver Figura 30b). Hay un aumento significativo de intensidad del viento en el inicio del episodio de 2KT a 8 KT en media hora y llegando a un máximo de 16KT en presencia del fenómeno de interés TS (ver Figura 30c) y de forma fuerte acompañada de lluvia (+TSRA) posterior baja la intensidad del viento y permanece a partir de las 20:00UTC con viento variable de 02 KT de intensidad. La visibilidad horizontal se encontró entre los 8000 metros y 1000 metros durante el evento como se puede observar en la Figura 30a.

Los fenómenos de tiempo presente durante el evento son tormenta con lluvia leve, fuerte y moderado (-TSRA, +TSRA, TSRA), todos en presencia de nubes tipo CB, tanto sobre la estación como en las vecindades y llovizna moderada (DZ) con tormenta con lluvia reciente en la estación (RETSRA). La temperatura del aire va disminuyendo durante el evento desde los 16°C hasta los 12°C y la temperatura del punto de rocío se acerca cada vez más a la temperatura del aire estando inicialmente separada por una diferencia de 3°C (16/13) hasta encontrarse a un grado de diferencia (14/13 y 12/11). Por otra parte la presión que se encontraba en descenso continua con ese patrón y termina el evento en un mínimo de 30.26" Hg (1024,72 mb), la cual en horas subsiguientes comienza a aumentar paulatinamente.

Por otra parte, analizando los reportes METAR y SPECI de los días previos a la ocurrencia del evento, se evidenció que se no se reportaron eventos similares de presencia de TS en el SKBO, sin embargo si fue posible observar varias ocurrencias de VCSH y algunos fenómenos de precipitación en el SKBO de casi la misma duración entre las 16:00UTC y las 22:00 UTC a horas similares al menos en los dos días anteriores.

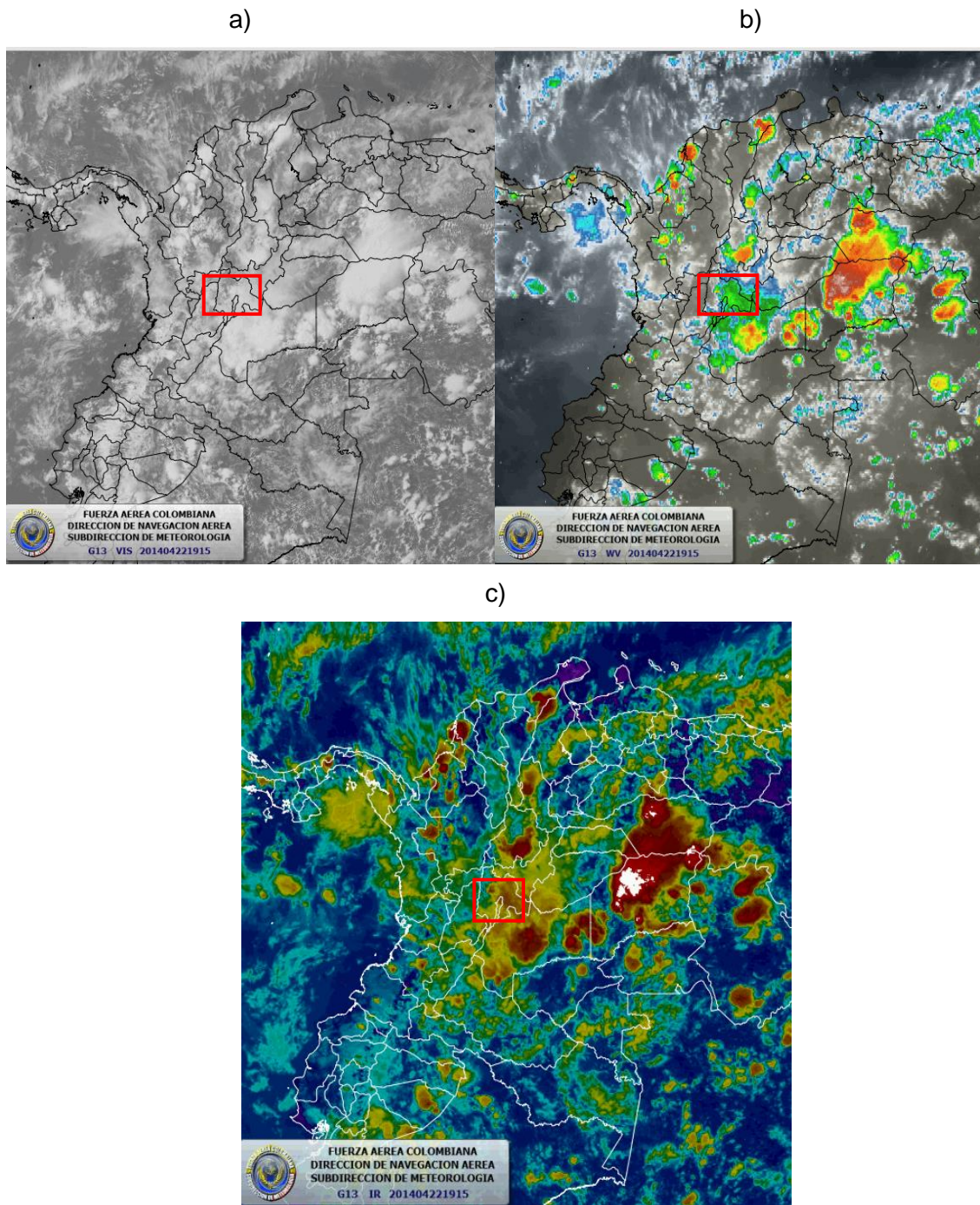


Figura29: Imágenes de los canales: visible a), vapor de agua b) e infrarrojo c). Del satélite GOES-13 el 22 de abril de 2014 a las 19:15 UTC (16:15 HLC) en donde se presentó el fenómeno más violento y el cierre del SKBO

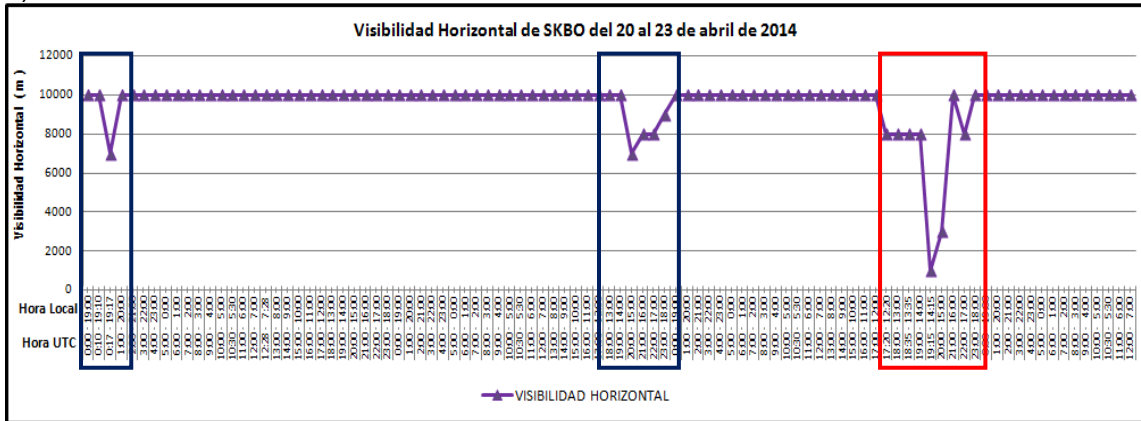
Se confirma la ocurrencia de eventos de precipitación en inmediaciones del SKBO al menos el día anterior y por supuesto durante el evento por medio de la información de los reportes METAR y SPECI con los datos de visibilidad (Figura 30a). Este tipo de análisis se realiza únicamente con la información observada, ya que el modelo WRF 2.1.1 no cuenta con una variable física que permita monitorear la visibilidad horizontal. En la Figura 30a se aprecia que la visibilidad se reduce por debajo de los 2000 metros, esta hace que se cumpla una de las condiciones para reportar cerrado el aeródromo como ocurrió en el caso en mención. El día anterior se presenta un caso similar de reducción de la visibilidad casi en el mismo lapso de horas sólo que de menor intensidad pues lo máximo que logra reducirse la visibilidad horizontal es a 7000 metros.

En este caso de estudio como se mencionó anteriormente en la descripción del comportamiento de los reportes METAR y SPECI, el viento presenta un cambio de dirección importante (ver Figura 30b), es decir que en períodos en los que no se presenta el evento el viento tiene componente E, mientras que durante las horas del evento el viento tiene componente W y especialmente NW y la frecuencia del viento variable representada por 0° es muy común durante el evento.

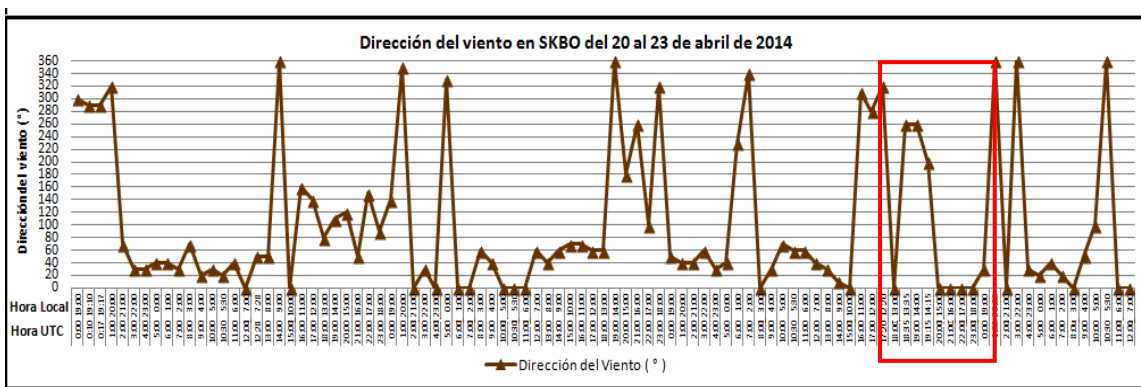
Por otra parte se aprecia un aumento de la intensidad del viento de hasta 16 KT como se observa en la Figura 30c, siendo este aumento de la intensidad la más alta del período analizado, así mismo se puede ver que, en los días anteriores en presencia de precipitación aumenta también el viento de manera significativa, hasta los 10KT.

En la Figura 30e se observa que la presión (QNH) comienza a descender paulatinamente desde las horas previas a la presencia de los eventos. Así mismo en la Figura 30d se puede apreciar el comportamiento de la temperatura y la temperatura del punto de rocío durante los 2 días previos al evento y el día del mismo en la cual se aprecia hay una tendencia a la disminución de las temperaturas debido a la hora del día en la cual según el ciclo diurno por ser el final de la tarde e inicio de la noche; así mismo como un acercamiento entre las mismas denotando un aumento de la humedad relativa en ese momento y presencia de precipitaciones en el aeródromo.

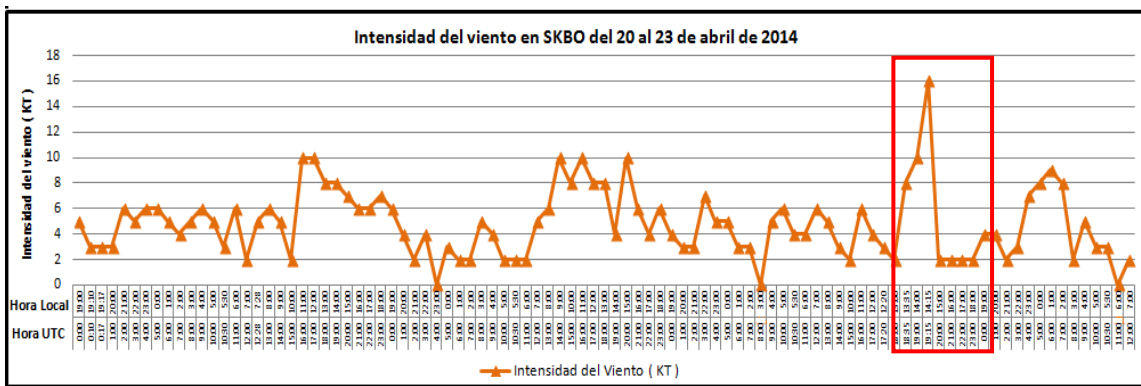
a)



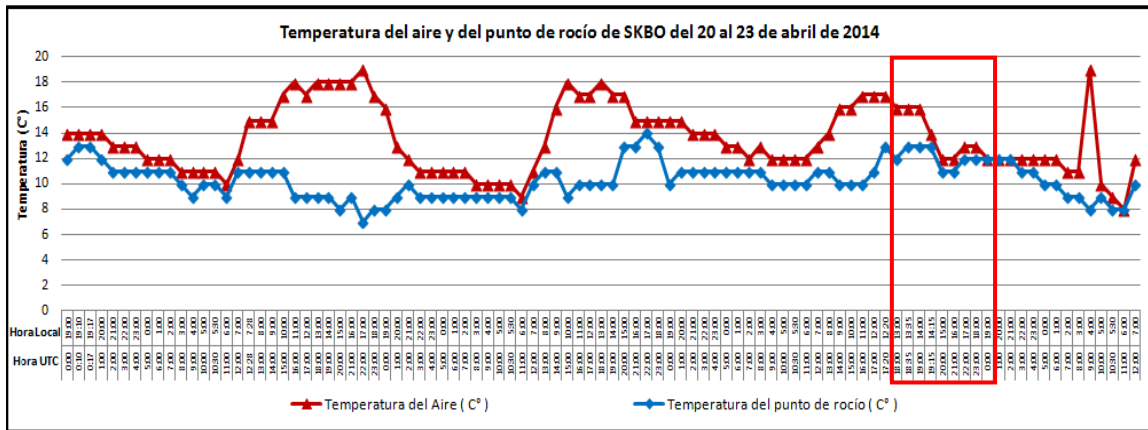
b)



c)



d)



e)

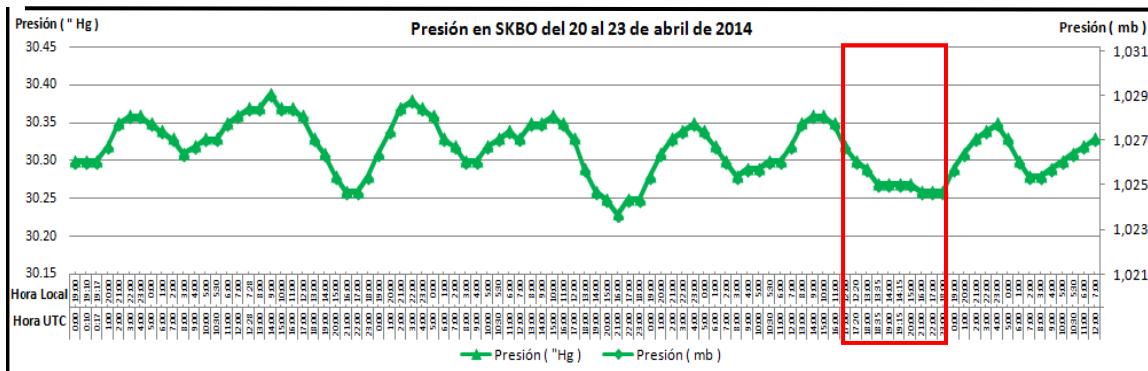


Figura 29: a) Visibilidad horizontal según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 20 de abril de 2014, 00 UTC al 23 de abril de 2014, 12 UTC b) Intensidad del viento según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 20 de abril de 2014, 00 UTC al 23 de abril de 2014, 12 UTC; c) Dirección del viento según METAR/SPECI del SKBO entre el 20 de abril de 2014, 00 UTC al 23 de abril de 2014, 12 UTC; d) Temperatura del aire y temperatura del punto de rocío según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 20 de abril de 2014, 00 UTC al 23 de abril de 2014, 12 UTC; e) Presión según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 20 de abril de 2014, 00 UTC al 23 de abril de 2014, 12 UTC

Por otra parte se tiene en la Figura 31 el Radiosondeo del día 22 de abril de 2014 con el fin de apreciar qué comportamiento de la atmósfera en la vertical antecedió el evento a las 12:00 UTC del mismo día.

En primer lugar se puede ver una atmósfera muy saturada especialmente en capas bajas en las que incluso se encuentran igualadas las temperaturas del aire y del punto de rocío en las siguientes isobaras de presión en la vertical: 700 mb (9878,4 FT de altitud o 3010,94 m), 640 mb (12169,1 FT de altitud o 3709,14 m) y 530 mb (16864,3 FT de altitud o 5140.24 m) aproximadamente, lo cual indica la presencia de nubosidad en estas capas.

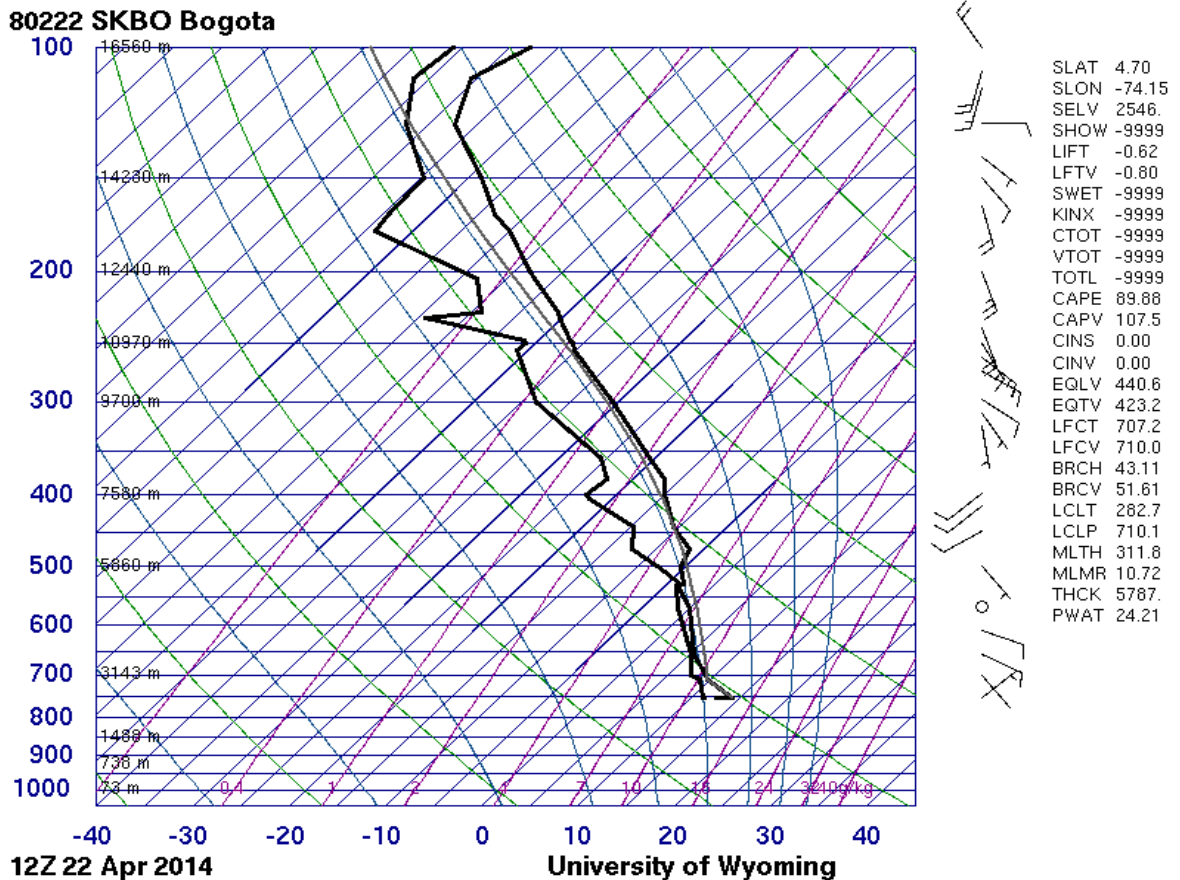


Figura 30: Diagrama SKEW-T del radiosondeo del SKBO para el 22 de abril de 2014, 12 UTC tomada de <http://weather.uwyo.edu/cgi-bin/sounding?region=samer&TYPE=GIF%3ASKEWT&YEAR=2014&MONTH=04&FROM=2212&TO=2212&STNM=80222>, 2015

Por otra parte el viento se observa cómo se encuentra a lo largo de la vertical, es así como en capas bajas está casi en calma y con una intensidad de hasta 5 KT y de componente E hasta los 500 mb altitud en la cual cambia la dirección del viento del W con intensidad de 10 KT y aproximadamente por encima de los 350 mb (=8.5 km)

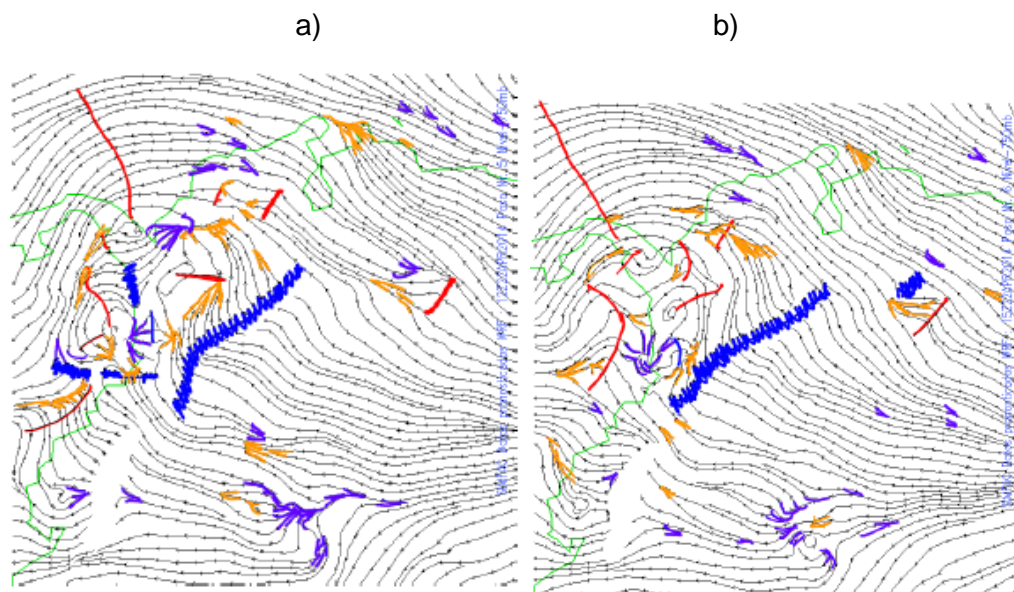
cambia nuevamente a tener componente sur y la intensidad aumenta con la altura hasta una máxima de 25 KT en 240 mb (=11 km), que a pesar de ser la mayor intensidad no es tan significativa en comparación a otros días.

Con el fin de evaluar el desempeño del modelo WRF 2.1.1 de la FAC (tomadas de https://www.simfac.mil.co/viento/wrf_animacion/viento.php, 2015) en relación a patrones sinópticos de comportamiento del viento como confluencia y difluencia en la atmósfera sobre el territorio nacional, se hizo el análisis de 3 capas de la atmósfera usando cartas de viento. Esto se hizo con la expectativa de poder apreciar en las mencionadas cartas, confluencia en capas bajas y medias de la atmósfera, así como difluencia en capas altas sobre el centro del país específicamente sobre el SKBO para las horas del evento, es decir entre las 18:00 UTC y 22:00 UTC, debido a que la salida del modelo es cada 3 horas se utilizan las cartas de las 12 UTC a las 21 UTC.

Se utilizaron 3 niveles de referencia, uno en capas bajas, el de capas medias y otro en capas altas. Debido a que el más cercano a la superficie de Bogotá es el nivel de 750 mb de los que tiene el modelo configurado, este fue el utilizado, a pesar que en otras partes del país existan niveles de presión más bajos. De los niveles medios se escogió el nivel de 500 mb por ser el nivel a partir del cual se puede distinguir la convección profunda es decir la que estamos buscando en la que las nubes de desarrollo vertical como torrecúmulos y cumulonimbus se presentan. Finalmente el nivel de 250 mb se utiliza como referencia de lo que ocurre en la atmósfera superior, y en la cual se quiere observar qué tipo de ventilación ofrece a los sistemas convectivos que se formen.

En las cartas producto de la simulación con hora inicial (corrida de las 00 UTC) del mismo 22 de abril de 2014, se aprecia que en capas bajas (750 mb, ver Figura 32) hay una vaguada en el occidente situando su centro en las cordilleras central y occidental acercándose en la carta de las 15 UTC un poco más a la cordillera oriental estando inclinada hacia el oriente, el flujo se presenta del oriente todo el tiempo y hay una señal de convergencia al oriente antes de la cordillera oriental.

En las cartas de 500 mb (ver Figura 33) se observa flujo del oriente con componente sur hacia el norte le cual confluye en un punto en el Urabá en las 4 cartas lo que hace que esté dentro de la curvatura de la vaguada y que el centro de la vaguada se encuentre ubicado casi sobre la cordillera central y al W de una dorsal situada en el pie de monte llanero a la altura de la latitud en la que está ubicada el SKBO. Así mismo en las cartas de 250 mb (ver Figura 34) se aprecia una gran dorsal cuyo centro se observa atravesando el territorio nacional en norte de Santander y con una pendiente inclinada hacia el Magdalena, posterior cruza más al norte por San Andrés y Providencia. En el área de la cordillera oriental se observa bastante ventilación debido a la difluencia que alimenta la dorsal en altura lo que favorece la convección profunda en esta misma región.



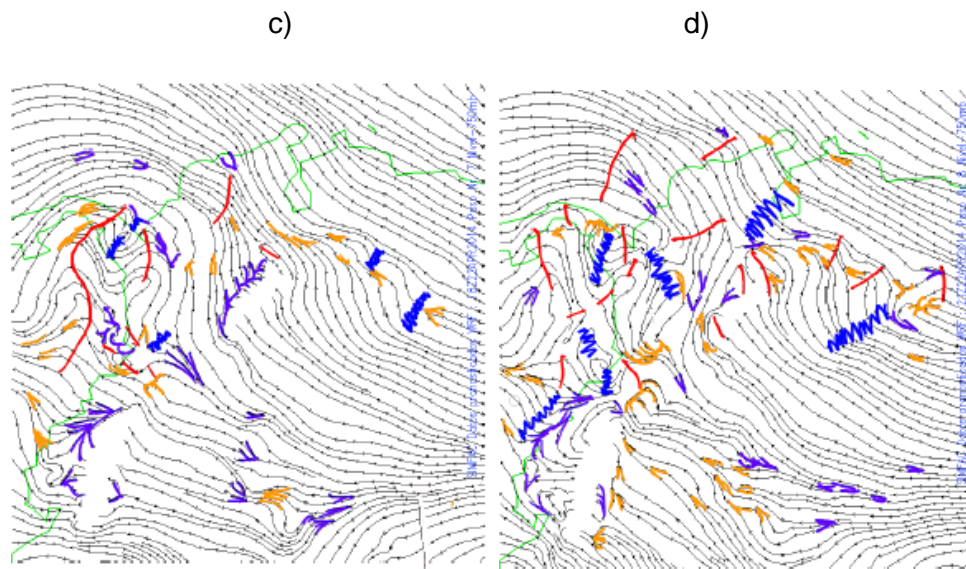
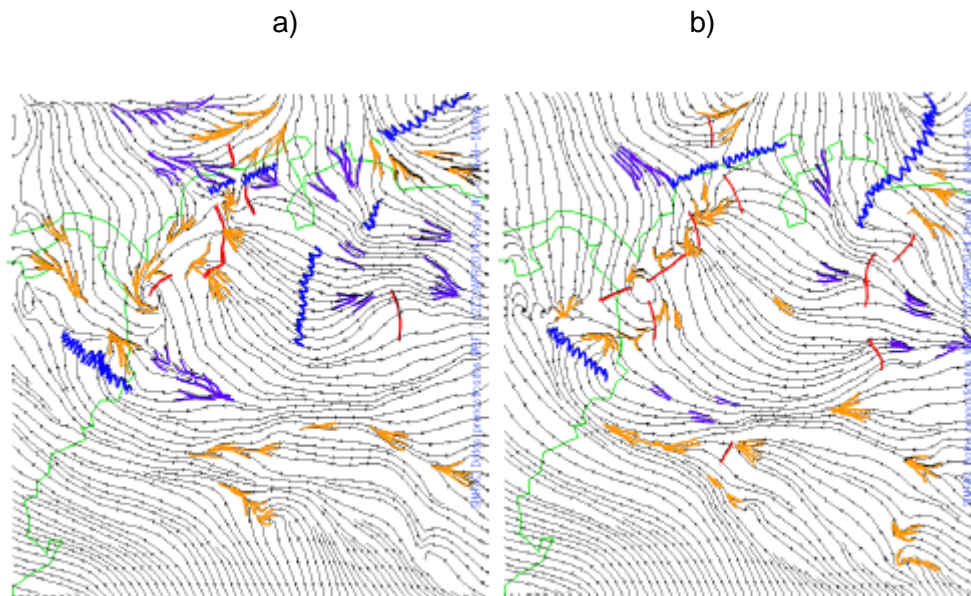


Figura 31: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 22 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c) y 21 (d) UTC



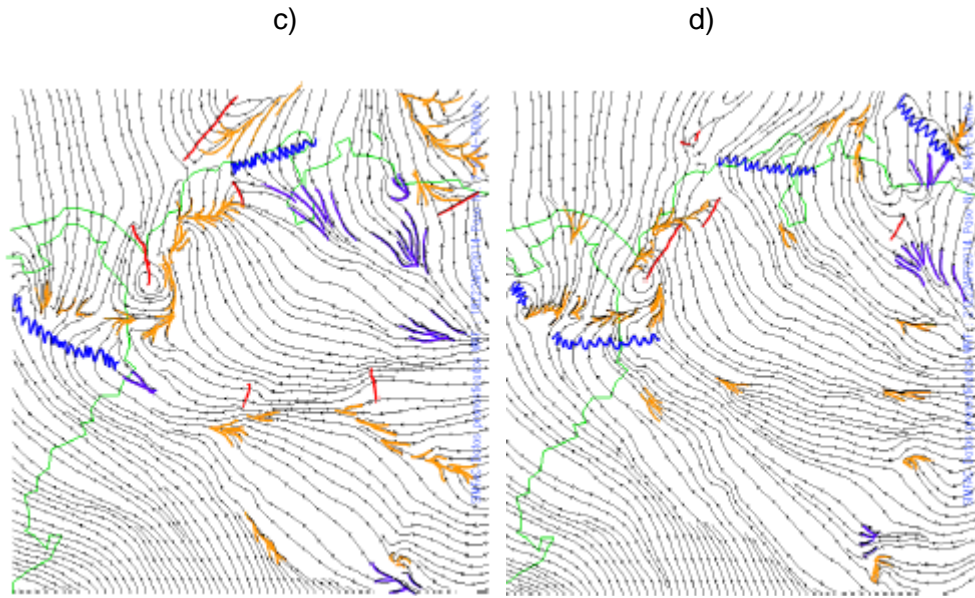
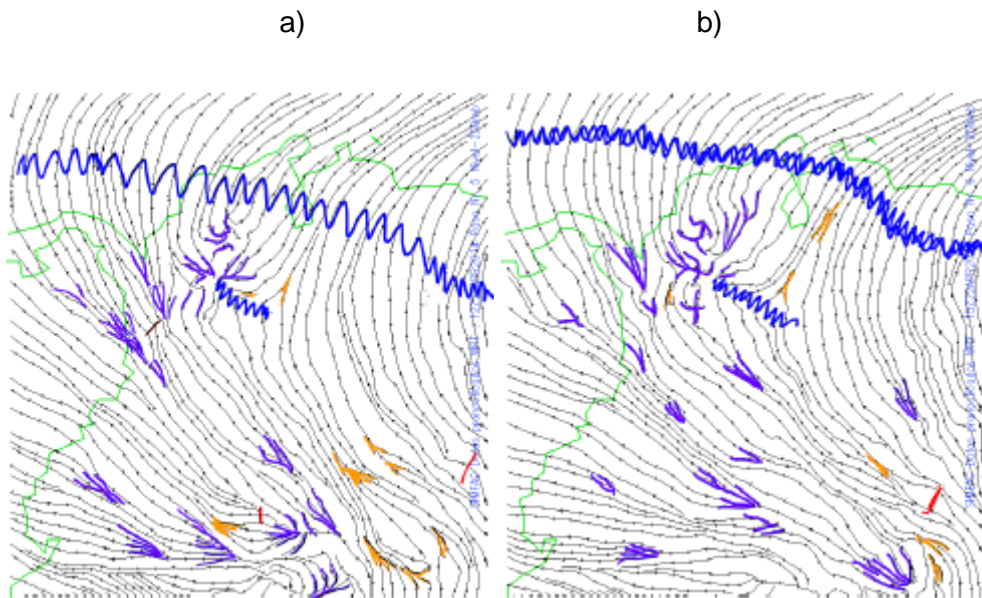


Figura 32: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 22 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c) y 21 (d) UTC



c) d)

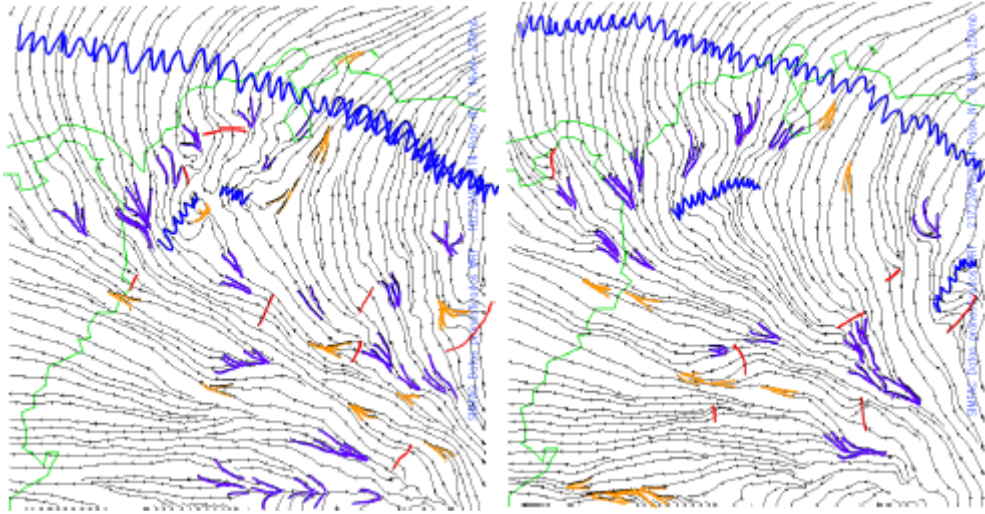


Figura 33: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 22 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c) y 21 (d) UTC

Debido a que las condiciones que se observaron según el modelo en las cartas de viento en las 3 alturas de la corrida de las 00 UTC del 22 de abril de 2014 y en razón a que el horizonte de pronóstico del modelo WRF 2.1.1 de la FAC es de 72 horas también podemos observar el intervalo de tiempo del evento en las corridas de los dos días anteriores en sus 2 actualizaciones diarias, es decir el de las 00 UTC y el de las 12 UTC por lo que también se efectuó un análisis de las condiciones indicadas por el modelo en las 4 corridas anteriores.

Según las cartas de viento de la corrida de las 00 UTC del 20 de abril de 2014 que pronostican las 12 UTC, 15 UTC, 18 UTC y 21 UTC a 750 mb (ver Anexo C, Figura 61) hay un patrón de vientos que se mantiene del E hacia el W sobre SKBO. En la carta de las 12 UTC, sobre la posición geográfica del SKBO se observó el eje de una vaguada que nace en Cundinamarca y se extiende hacia la región Caribe y que persiste hasta las 18 UTC. En la carta de las 21 UTC se ve claramente un área de confluencia que favorece la formación de nubosidad convectiva.

En cuanto a las cartas de viento de los 500 mb (ver Anexo C, Figura 62) se observa contiguo al SKBO hacia el W un área de confluencia de vientos la cual se debilita de las 12 UTC a las 15 UTC, para las 18 UTC se encuentra un área de difluencia y a las 21 UTC se observa de nuevo un área de divergencia lo que indica que en capas medias no hay suficiente apoyo para exista convección profunda o por lo menos desde las 18 UTC en adelante.

En cuanto a la ventilación en altura para brindarle apoyo a la posible convección entre las 12 UTC y las 15 UTC en las cartas de viento a los 250 mb (ver Anexo C, Figura 63) se aprecia un área de difluencia que alimenta una dorsal muy pronunciada que se encuentra en el norte de país, cuyo centro o eje de dorsal cruza en dirección NW el territorio nacional a la altura de Norte de Santander y en dirección al sur de Nicaragua. Esta situación persiste desde las 12 UTC hasta las 21 UTC en esta corrida y apoya cualquier desarrollo vertical que se produzca sobre Bogotá por tener la ventilación suficiente en altura.

Por lo que se puede concluir de esta corrida que las condiciones ideales para la formación de sistemas convectivos se presentan entre las 12 UTC y las 15 UTC y que se reduce la posibilidad de ocurrencia de los mismos después de las 18 UTC, lo cual indica que el modelo está corrido aproximadamente 6 horas puesto que pronostica la presencia de sistemas convectivos en el SKBO en un horario anterior al que realmente se presentó y ubicados en la región norte de Cundinamarca y el W de la posición del SKBO.

Para el caso de la corrida de las 12 UTC del 20 de abril de 2014 lo observado de las cartas de viento de los 750 mb (ver Anexo C, Figura 64) es flujo de SE a NW sobre el SKBO el cual tiene una pequeña insinuación de ser una pequeña vaguada para las 12 UTC, eje el cual se desplaza hacia el W para las 15 UTC, tanto a las 18 UTC como a las 21 UTC se disminuye la pendiente o ángulo de excentricidad de la vaguada pero continua teniendo una insinuación de giro ciclónico. En cuanto a lo que muestran las

cartas de viento de los 500 mb (ver Anexo C, Figura 65) se aprecia en la carta de las 12 UTC un eje de una vaguada que se presenta producto de un centro de difluencia o collado (<http://www.um.es/geograf/clima/tema03.pdf>) debido su forma como una silla de montar el cual está situado al norte, en el Mar Caribe a la altura de la Guajira.

Para las cartas de las 15 UTC el movimiento persiste de modo ciclónico pero con una menor intensidad puesto que el eje de la vaguada se presenta mucho más al norte, efecto que parece desaparecer para las 18 UTC en la cual se observa muy cerca al E un área de difluencia pero que se modifica para las 21 UTC en las que se observa muy cerca al W una zona de confluencia de vientos. Lo que hace que el soporte para que haya convección sobre el SKBO que se requiere para que sea profunda solo es clara para las 12 UTC y que a medida que transcurre el tiempo se va haciendo leve o casi nulo.

En cuanto a las cartas de viento de los 250 mb (ver Anexo C, Figura 66) de la corrida de las 12 UTC del 20 de abril de 2015 en todo el período de tiempo entre las 12 UTC y las 21 UTC se aprecia un área de difluencia que alimenta la dorsal en altura que cubre todo el norte y parte del centro de Colombia, así mismo como en las corridas anteriormente nombradas esto nos indica que estos patrones de dorsales en altura tan grandes y significativos de escalas sinópticas persisten en cada una de las corridas y que apoyan con ventilación en altura la formación de sistemas convectivos profundos a lo largo del eje de la vaguada y por su puesto debido al área de difluencia sobre las capas altas de la atmósfera sobre el SKBO para el período del evento. Se puede concluir que para esta corrida la convección profunda es más probable que se presente sobre el SKBO sobre las 12 UTC y en menor medida entre los horarios en los cuales se presentó realmente, es decir, posterior a las 18 UTC.

A continuación se evaluara el desempeño del modelo WRF 2.1.1 para la corrida de las 00 UTC del 21 de abril de 2014. En las cartas de los 750 mb (ver Anexo C, Figura 67) se puede apreciar que en la carta de las 12 UTC sobre SKBO se observa el flujo del

NE hacia el SW, flujo proveniente de una vaguada cuyo centro se presenta en el pie de monte llanero, esta misma condición persiste en las cartas de las 15 UTC, 18 UTC y 21 UTC en la cual se observa que la cuña de vaguada se agudiza e inclina hacia el E, pero que continúa generando flujo del N en la cual se aprecia un eje de vaguada al W al N de Panamá en el Caribe. Lo que hace que en todo el período sobre el SKBO se observan todas las condiciones de favorabilidad para que se presente confluencia en capas bajas y se presente un movimiento ciclónico que dé inicio a la convección en esta área del país.

En las cartas de 500 mb (ver Anexo C, Figura 68) por el contrario si se ve una señal clara de apoyo de la convección en capas medias puesto que se observa una pequeña vaguada sobre SKBO que apoya una zona de confluencia del viento de centro en el Urabá, la cual prevalece desde las 12 UTC hasta las 18 UTC y que a medida que transcurre el tiempo se desplaza hacia el S en la carta de las 21 UTC. Se observa un movimiento ciclónico sobre el SKBO para alimentar este gatillador de capas medias.

Por otra parte en las cartas de 250 mb (ver Anexo C, Figura 69) se sigue mostrando al igual que en las demás corridas la ventilación en altura que apoya la formación de sistemas convectivos durante todo el período, es decir de 12 UTC a 21 UTC, debido a la presencia de una gran dorsal sobre el norte de Colombia, que forma sobre el sector del SKBO un área de difluencia de vientos.

Con lo cual se puede concluir que esta corrida debería subestimar la presencia de sistemas convectivos de características sinópticas. A pesar de la clara presencia del patrón de confluencia en capas medias y altas, en capas bajas no se muestra el patrón determinante de confluencia que permita asegurar el correcto pronóstico especialmente en el período de las 18 UTC y 21 UTC.

Finalmente se evalúa el desempeño del modelo WRF 2.1.1 para la corrida de las 12 UTC del 21 de abril de 2014. En las cartas de los 750 mb (ver Anexo C, Figura 70) se puede apreciar un buen patrón de difluencia en capas bajas de la atmósfera en la carta de las 12 UTC, el cual disminuye para las 15 UTC por la presencia de una vaguada al W de la posición del SKBO, sin embargo el mismo patrón de circulación del SE hacia el NW permanece durante todo el período de tiempo con menor señal de movimiento ciclónico desde las 12 UTC hasta las 18 UTC, sin embargo a las 21 UTC se observa una pequeña área de confluencia un poco al norte del SKBO.

En las cartas de 500 mb (ver Anexo C, Figura 71) lo que se observa es una zona de confluencia del viento al NW sobre la cordillera central sin embargo se aprecia una señal de movimiento ciclónico que alimenta el patrón en mención de capas medias por lo cual se puede decir que hay un gatillador moderado del movimiento ciclónico que favorece la convección en este punto del país.

Adicionalmente, en las cartas de los 250 mb (ver Anexo C, Figura 72) se confirma el apoyo a la convección profunda por la presencia de la misma dorsal mencionada en todas las cartas de la misma superficie isobárica, que en esta corrida se muestra con el eje sobre La Guajira y sobre el SKBO se aprecia difluencia que apoya la presencia de la dorsal en altura.

En conclusión esta corrida no muestra una señal clara de presencia de sistemas convectivos por lo menos desde las 12 UTC hasta las 18 UTC, sin embargo hay una señal más fuerte sobre SKBO para las 21 UTC en la cual en las tres capas de la atmósfera se puede apreciar un comportamiento propio de la convección. En las capas medias y altas es en donde más fuerte se encuentra este patrón y en las capas bajas hay una diferencia marcada.

De acuerdo a la Figura 35 que muestra la sección temporal mostrada en la cual se resalta el intervalo de tiempo en el cual ocurrió el evento de acuerdo a la simulación con hora inicial 00 UTC del mismo día del evento. La dirección del viento en superficie varía con el tiempo durante el evento, el viento proviene del suroeste y proviene de los 230° aproximadamente con una intensidad de 10 KT, con lo cual se confirma que el modelo si observa el cambio de dirección del viento e intensidad característicos de la presencia de nubes de desarrollo vertical, hay nubosidad suficiente en capas bajas y medias pero la señal en el campo de la nubosidad no es clara para determinar sin duda que se trata de nubosidad convectiva de desarrollo vertical. En el campo de la humedad relativa no se observa un incremento especial en capas bajas pero si es un valor alto por encima del 70%. Adicionalmente se puede observar cómo en toda la sección temporal, el modelo sobrestima la nubosidad por encima de los 34.000 pies mostrando gran cantidad de nubes.

Así mismo se realizó el mismo análisis con las secciones temporales de los dos días anteriores para ver en qué forma mejoraba o empeoraba el pronóstico de los sistemas convectivos en el lapso de tiempo del evento. Figuras similares a la Figura 35 se pueden observar en el Anexo C (ver Figura 73, 74, 75 y 76) al final del documento. La señal más clara de presencia de nubosidad cumuliforme de desarrollo vertical tal cual y como se presentó en el lapso de tiempo de las 18 UTC a las 22 UTC se presenta en la sección temporal de la corrida de las 12 UTC del día 21 de abril de 2014 (ver Anexo C, Figura 76). Allí se observan altos valores de humedad en toda la columna y fuerte presencia de nubosidad de desarrollo vertical. Así mismo en la corrida de las 00 UTC del 21 de abril de 2014 (ver Anexo C, Figura 75) también se tiene una muy buena señal de la alta humedad y de nubosidad cumuliforme, aunque no con tanta precisión como la observada en la corrida de las 12 UTC del mismo día: Señal que no se ve en las corridas de las 00 UTC (ver Anexo C, Figura 73) y de las 12 UTC (ver Anexo C, Figura 74) del 20 de abril de 2014 en las que solo se aprecia nubosidad baja pero no humedad alta ni nubosidad de desarrollo vertical. Esto mismo sucede para la corrida de las 00 UTC del mismo día del evento.

Así mismo se realizaron las cartas de precipitación acumulada en lapsos de a 3 horas con el fin de observar la respuesta en esta variable las cuales pueden ser consultadas en el Anexo C (Figuras 77, 78, 79, 80 y 81) al final del documento. Para la corrida de las 00 UTC del día 20 de abril de 2014 (ver Anexo C, Figura 77) se puede apreciar en el sector del SKBO un máximo de precipitación de 10 mm acumulados para el lapso entre las 15 y las 21 UTC del día 22 de abril de 2014. Valor que no es considerado una precipitación importante. En el departamento de Guaviare para el lapso de 18 a 21 UTC el modelo WRF si mostró precipitaciones importantes (ver Figuras 79 a y b). A pesar que la mejor respuesta entre las corridas de los dos días anteriores es la corrida de las 12 UTC del día 21 de abril de 2014(ver Anexo C, Figura 80), por lo menos en el campo de la precipitación acumulada mostrada en la corrida de las 00 UTC del 21 de abril de 2014 de 18 UTC a 21 UTC (ver Anexo C, Figura 79), se puede apreciar que los valores aumentan un poco sobre SKBO, aunque subestimando la cantidad de precipitación que se presentó y que incluso a las 19 UTC que hizo que cerraran por condiciones meteorológicas el SKBO.

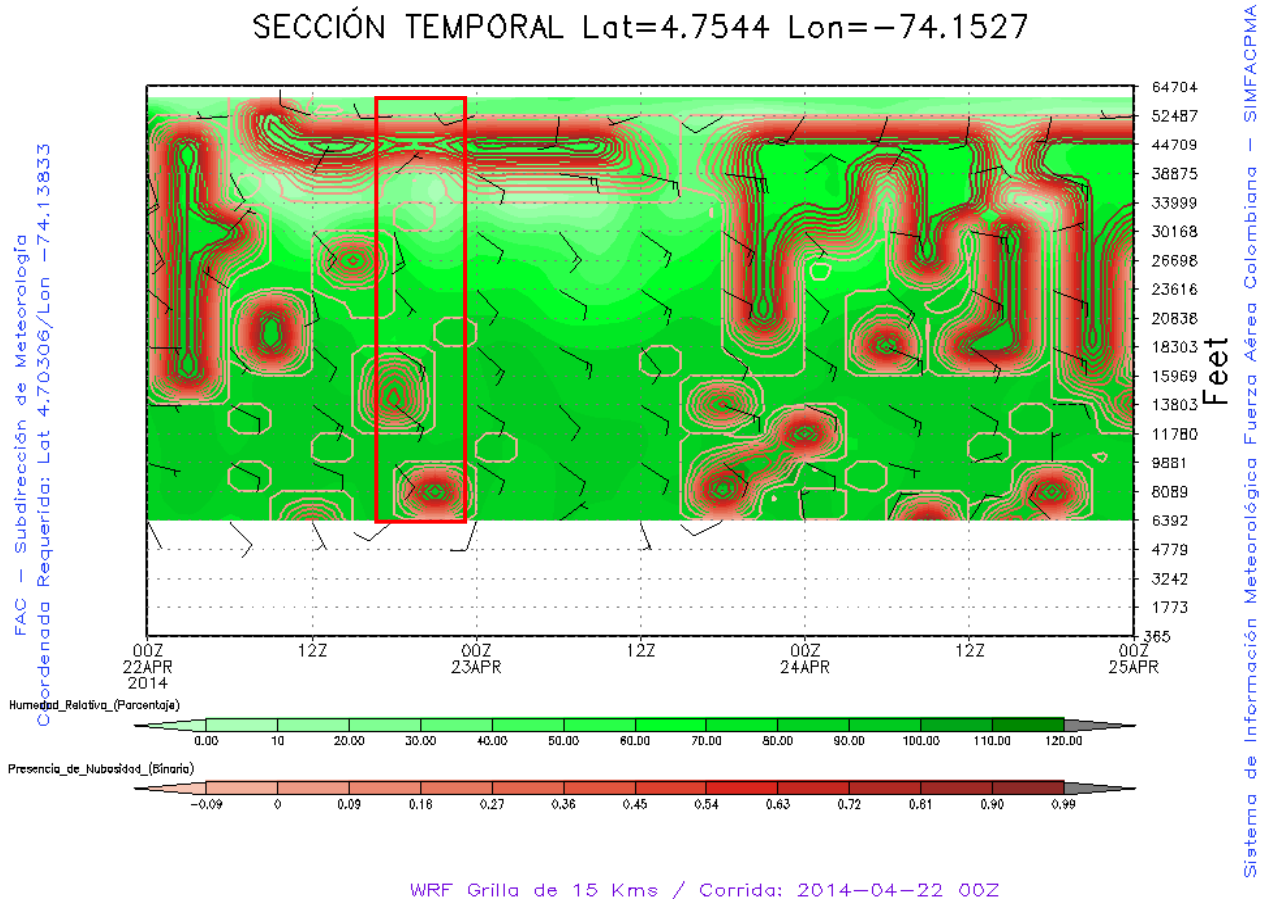


Figura 34: Sección temporal del SKBO de la corrida del 22 de abril de 2014 a las 00 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas

4.3.2 Episodio 2, 22 de noviembre de 2011

Descripción del evento:

El presente evento es escogido por la longitud de su duración del evento sobre el SKBO, puesto que es el único caso en el que se presentan condiciones de TCU, CB y TS en la secuencia esperada y que dura aproximadamente 10 horas, puesto que a pesar que en la hora 9 del evento no se reporta como tipo de nubosidad o tiempo presente los fenómenos de interés se nota en las imágenes de satélite que es la misma nubosidad la que se reporta en la hora 10 y por ende estamos hablando de sistemas convectivos que afectaron el SKBO durante gran parte del día, incluso se pueden

hablar de familias de sistemas convectivos que afectan el aeródromo y que se retroalimentan entre sí permitiendo que la convección perdure tanto tiempo.

De acuerdo al análisis de superficie (Figura 36) para el día 22 de noviembre de 2011 y de los 2 días anteriores a la ocurrencia del evento, se encontraba en tránsito una onda del este por el norte del país que está conectándose con una baja presión que se estuvo moviendo desde la latitud 15° N hacia los 30 °N pero que a su vez se conjuga al norte con un frente estacionario. Este tipo de conexiones hacen que se afecte el flujo normal de los alisios (los cuales se desplazan de E a W) y hacen que ingrese más humedad de lugares como el NW o W. Adicionalmente genera vórtices de convergencia en capas bajas, puesto que el flujo del E tratara de prevalecer por encima del cambio de dirección del viento debido a conexiones de masas de aire. Estas masas a pesar de ser de latitudes medias o altas ingresan a la región tropical, creando así inestabilidad en la atmósfera, favoreciendo la formación de nubosidad de desarrollo vertical en el territorio nacional con ayuda de la orografía de la región andina.

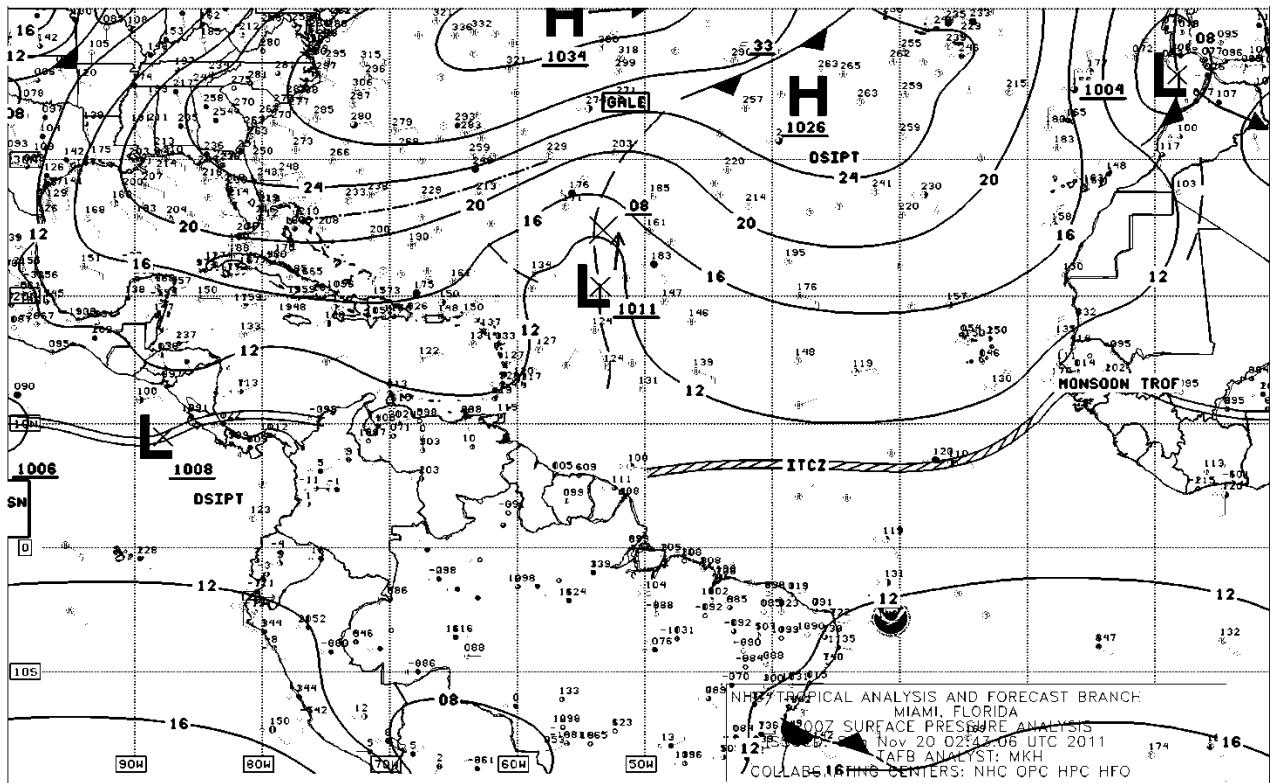
Por otra parte, se aprecia que la Zona de Convergencia Intertropical se localiza entre los 8 y 11°N de latitud, favoreciendo la conexión con los sistemas de latitudes medias y altas. A pesar de no ser la responsable de la presencia de sistemas convectivos en el SKBO, si es uno de los factores de conexión y favorecimiento de una rama adicional ascendente en contraprestación a la presencia de la ZCIT en el norte que crea el gatillador para que la convección sea profunda a la altura del SKBO.

Debido a que los factores que favorecen la convección son de escala sinóptica e incluso trascienden las latitudes de la franja intertropical hacen que la intensidad del movimiento y la advección de humedad sean mayores, esto provoca que se presente el evento durante todo el día (sin sumar el efecto de ascenso provocado por la convección de las primeras capas de la atmósfera a causa de la radiación solar entrante durante todo el día) siendo el de mayor duración de todo el período de estudio. La presencia reiterada de varios sistemas convectivos en tránsito por el aeródromo es provocada por la retroalimentación de los mismos y a las celdas que se presentan por la magnitud de la fuerza ascensional, según lo que se puede apreciar en las imágenes de satélite del día del episodio (Ver Anexo B, Figuras 55, 56 y 57, esta es de las nuevas de imágenes).

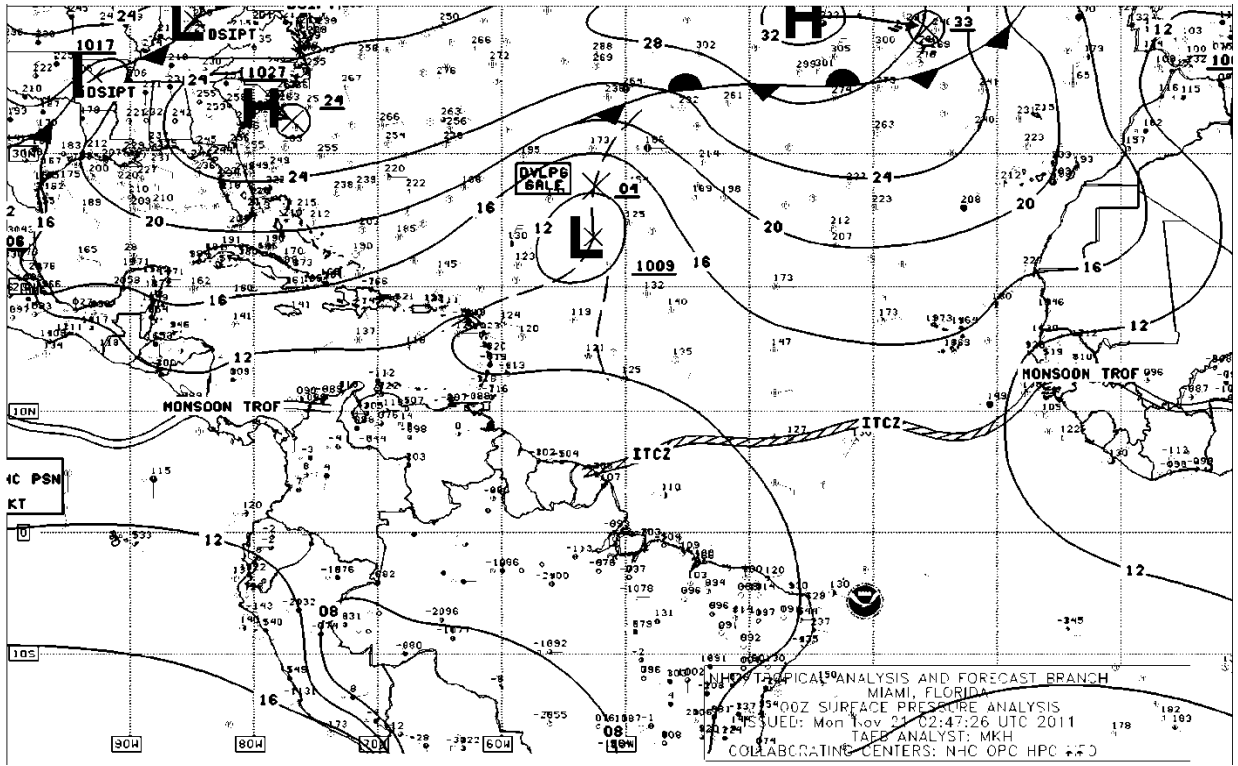
Se realizó un neofanálisis de las imágenes de satélite del GOES 13 para Colombia durante las horas del evento, es decir desde las 15:00 UTC del día 22 de noviembre de 2011 hasta las 01:00 UTC del día 23 de noviembre de 2011. En las Figuras 55 a 57 se pueden observar sistemas convectivos sobre el SKBO puesto que al revisar los diferentes canales se aprecia una alta respuesta de pixel en cada uno de ellos durante las horas en que se presentó el evento.

En las imágenes del canal visible (ver Anexo B, Figura 55) se puede apreciar la evolución lenta de los sistemas convectivos y es solo casi hasta las 20:45 UTC cuando se organiza bastante bien y se agrupan algunas nubes tipo TCU creando un sistema convectivo de grandes proporciones y que alcanza a tener un penacho o nubes cirrus en su cima, y al menos hasta que anochece se puede apreciar cómo crece, se retroalimenta y se desplaza hacia el W, especialmente recargado al costado S del SKBO.

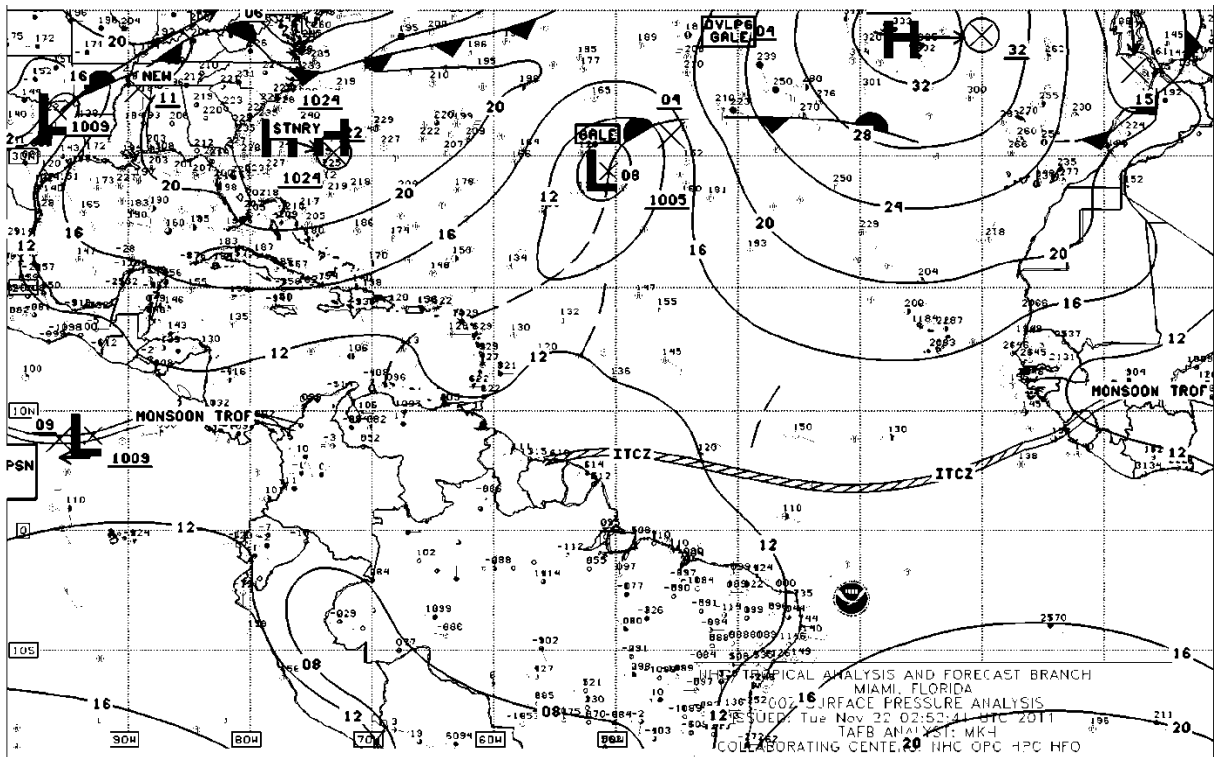
a)



b)



c)



bajos de temperatura se concentran en las áreas de alta montaña de las tres cordilleras del país y de manera casi estacionaria se observa el crecimiento, fortalecimiento y retroalimentación de los sistemas convectivos que representan estos topes fríos, a medida que la diferencia de temperatura entre los valles y las montañas aumenta. Los valores más altos de temperatura de la escena están sobre todas las áreas llanas. También se observa que se presentan conexiones entre los sistemas convectivos, permitiendo que ellos se retroalimenten y se fortalezcan creando sistemas convectivos de mesoescala al final de la tarde y comienzos de la noche.

En la Figura 37-b, imagen del canal vapor de agua, se observa que en la atmósfera media y alta hay una alta cantidad de humedad. Por su parte, en el canal visual se observa nubosidad cumuliforme bastante brillante por el alto albedo de su tope sobre el SKBO de formas redondeadas y en las cuales se aprecian las sombras que permiten ver la profundidad de la nube en la vertical.

En las imágenes del vapor de agua (ver Anexo B Figura 57, imágenes del canal vapor de agua) se puede ver paulatinamente como los sistemas se van formando y fortaleciendo a lo largo del día concentrándose en las áreas de alta montaña, y no en los valles secos, es claro como el proceso de crecimiento es casi simultáneo en todas las cordilleras, comenzando a subir hacia capas medias y altas en la atmósfera con casi la misma intensidad. Por otra parte, se presentan fenómenos de unión de varios sistemas convectivos los cuales al juntarse se fortalecen creando en horas de la tarde y noche sistemas convectivos de mayor escala. En el caso del SKBO, se convierten en una TSRA nocturna.

Analizando los reportes METAR y SPECI de las horas previas al evento y durante el evento se encontró lo siguiente: El evento se presenta entre las 15:00 UTC del 22 de noviembre de 2011 y las 01:00 UTC del 23 de noviembre de 2011 los cuales se encuentran en el Anexo A, para un total de 10 horas de duración del evento. En el análisis se incluyen 4 reportes METAR anteriores y el METAR de las 00:00 UTC del 23 de noviembre de 2011 el cual no contiene ninguno de los tres factores para ser considerado parte del evento pero que debido a la continuidad de las imágenes de satélite se puede saber que es el mismo evento.

Entre las 11:00 UTC (06:00 HLC) y las 14:00 UTC (09:00 HLC) del 22 de noviembre de 2011, los informes METAR y SPECI reportaron viento entre variable o procedente del cuadrante NE (040° y 050°) de la rosa de los vientos y su intensidad es muy débil al oscilar entre los 02 y los 03 KT, sin embargo la visibilidad horizontal se ve afectada pasando de estar ilimitada (superior a 10 km) a 7.000 metros reducida por el fenómeno reciente de llovizna (DZ) y bruma (HZ) la cual antecede el inicio del evento. La temperatura del aire estuvo subiendo rápidamente entre los 11°C hasta los 16°C, la temperatura del punto de rocío se mantuvo casi constante entre los 10°C y los 11°C, reduciéndose cada vez más la diferencia con la temperatura del aire, pasando de 1°C a 5 °C. Asimismo la presión aumentó desde los 30,28"Hg (1025,4 mb) hasta los 30,35"Hg (1027,8 mb), aumentando 0.07" Hg (2,37 mb) en total en fase previa al evento.

Durante el evento se aprecia un cambio en la dirección del viento significativo, ya que al iniciar el evento el viento proviene del cuadrante SW posterior cambiando radicalmente por dos horas del cuadrante NW y terminando en el cuadrante SW, también se encontró el viento variable en 3 ocasiones; esto en conjunto con un aumento escalonado de intensidad del viento llegando a subir en el inicio del evento de 2KT a 8 KT desde las 14:00 UTC hasta las 18:00 UTC del 22 de noviembre de 2011. Durante el episodio el viento baja su intensidad hasta 03KT (en presencia de TSRA a las 21:00 UTC del 22 de noviembre de 2011) y presenta a un máximo de 10KT en presencia de -TSRA desde las 01:00 UTC del 23 de noviembre de 2011.

La visibilidad horizontal se encontró entre los 9.000 metros y aumentando a ilimitada (mayor a 10 Km), sin embargo en presencia de una llovizna ligera y posterior a una tormenta reciente en el aeródromo la visibilidad baja a un mínimo de 6000 metros a las 23:00 UTC del 22 de noviembre de 2011. Los fenómenos de tiempo presente sobre la estación durante el evento son -RA, VCSH, TSRA, -DZ y -TSRA todos en presencia de nubes tipo TCU y posterior CB. En cuanto a los fenómenos de tiempo presente reportados dentro del SKBO se encuentran los siguientes fenómenos en las inmediaciones del SKBO, REDZ, HZ, RETSRA, más CB en la vecindad con presencia de rayos LTNG, VCSH y RETS.

La temperatura del aire se encontró casi estable durante el evento desde los 15°C hasta los 17°C y la temperatura del punto de rocío se encontró bastante variada

aumentando incrementalmente desde los 11°C a los 14°C, acercándose cada vez más a la temperatura del aire (pasando de 5°C de diferencia a 1°C). Por otra parte la presión que se encontraba en descenso continua con ese patrón desde las 15:00UTC hasta las 21:00UTC cuando comienza a elevarse. Terminando a las 21:00UTC se da el valor mínimo absoluto de 30.20"Hg.

Por otra parte, analizando los reportes METAR y SPECI de los dos días previos a la ocurrencia del evento, se evidenció que se reportaron eventos de VCSH y TCU junto con presencia de lluvias y lloviznas en el SKBO en dos horarios diferentes unas a medio día aproximadamente a las 18:00 UTC y otras nocturnas aproximadamente a las 00:00 UTC del siguiente día. Aunque ninguno de los casos previos fueron tan largos como el del día 22 de noviembre de 2011, si están inmersos estos eventos dentro del horario de duración del caso de interés. Esto da una pequeña noción de persistencia en la ocurrencia de sistemas convectivos, sino en el área de estudio por lo menos en las vecindades del Aeropuerto Internacional. Estos sistemas contribuyeron la presencia de fenómenos de precipitación como RA y DZ.

En la Figura 38a se aprecia el comportamiento de la variable visibilidad horizontal. Este tipo de análisis se realiza únicamente con la información observada, ya que el modelo WRF 2.1.1 no cuenta con una variable física que permita monitorear la visibilidad horizontal.

A través de esta variable se aprecia constantemente cómo se presentan variaciones de la visibilidad horizontal. Sin embargo esta nunca baja de 6.000 metros en el período de estudio. Con mayor frecuencia la variable de la visibilidad horizontal es superior a los 10 Km (9999). Durante las horas del evento se produce la reducción máxima de visibilidad. Justo a las 23:00 UTC del día 22 de noviembre de 2011 se registra visibilidad de 6.000 metros.

La Figura 38b muestra el comportamiento de la variable dirección del viento. Esta variable presenta una mayor frecuencia de casos en los que el viento proviene de los cuadrantes W y especialmente del NW a diferencia de los demás eventos estudiados.

Lo que favorece la presencia en los días anteriores de precipitaciones y pequeños eventos convectivos como el de este episodio de estudio.

La segunda dirección más frecuente es la del viento variable representada por 0° en la Figura 38b dentro de este período de tiempo, en menor proporción se presenta viento proveniente del NE y con poca ocurrencia se presenta viento del SE.

Por otra parte se aprecia que la intensidad del viento puede llegar hasta los 12 KT, como se observa en la Figura 38c, en los días anteriores, en presencia de otros fenómenos convectivos aumenta el viento de manera significativa. Durante las horas del evento se ve claramente como aumenta el viento y sube hasta 10KT y como la variable de dirección está íntimamente relacionada, por lo cual cuando hay un cambio de viento de otro cuadrante diferente al E o NE esta también relacionado con un aumento de la intensidad del viento.

Así mismo en la Figura 38d se puede apreciar el comportamiento de la temperatura y la temperatura del punto de rocío durante los 2 días previos al evento y parte del día siguiente se aprecia un aumento de la temperatura antes y después de las 12:00 HLC, este movimiento ondulatorio casi regular se observa en todo el período de estudio.

Durante los aumentos de la temperatura del aire, el punto de rocío y la temperatura se distancian con un mayor intervalo. Sin embargo el comportamiento del punto de rocío durante el periodo observado es muy estable y permanece alrededor de los 10°C y 11°C, teniendo un mínimo de 9°C y un máximo de 14°C durante el evento justamente a las 15:00 UTC del 22 de noviembre de 2011.

En la Figura 38e se observa como la presión publicada en el reporte METAR presenta una distribución diaria bimodal diaria en la cual el mínimo reportado en el espacio de tiempo observado es 30,20”Hg (1022,7 mb) y el máximo es 30,36”Hg (1028,1 mb), en las horas del evento se presenta un mínimo a las 21:00 UTC (17:00 HLC) y un máximo a 15:00 UTC (10:00 HLC) y a las 00:00 UTC (19:00 HLC) del día 23.

Por otra parte se tiene en la Figura. 39 el Radiosondeo del día 22 de noviembre de 2011 con el fin de apreciar que comportamiento de la atmósfera en la vertical antecedió el evento a las 12:00 UTC del mismo día.

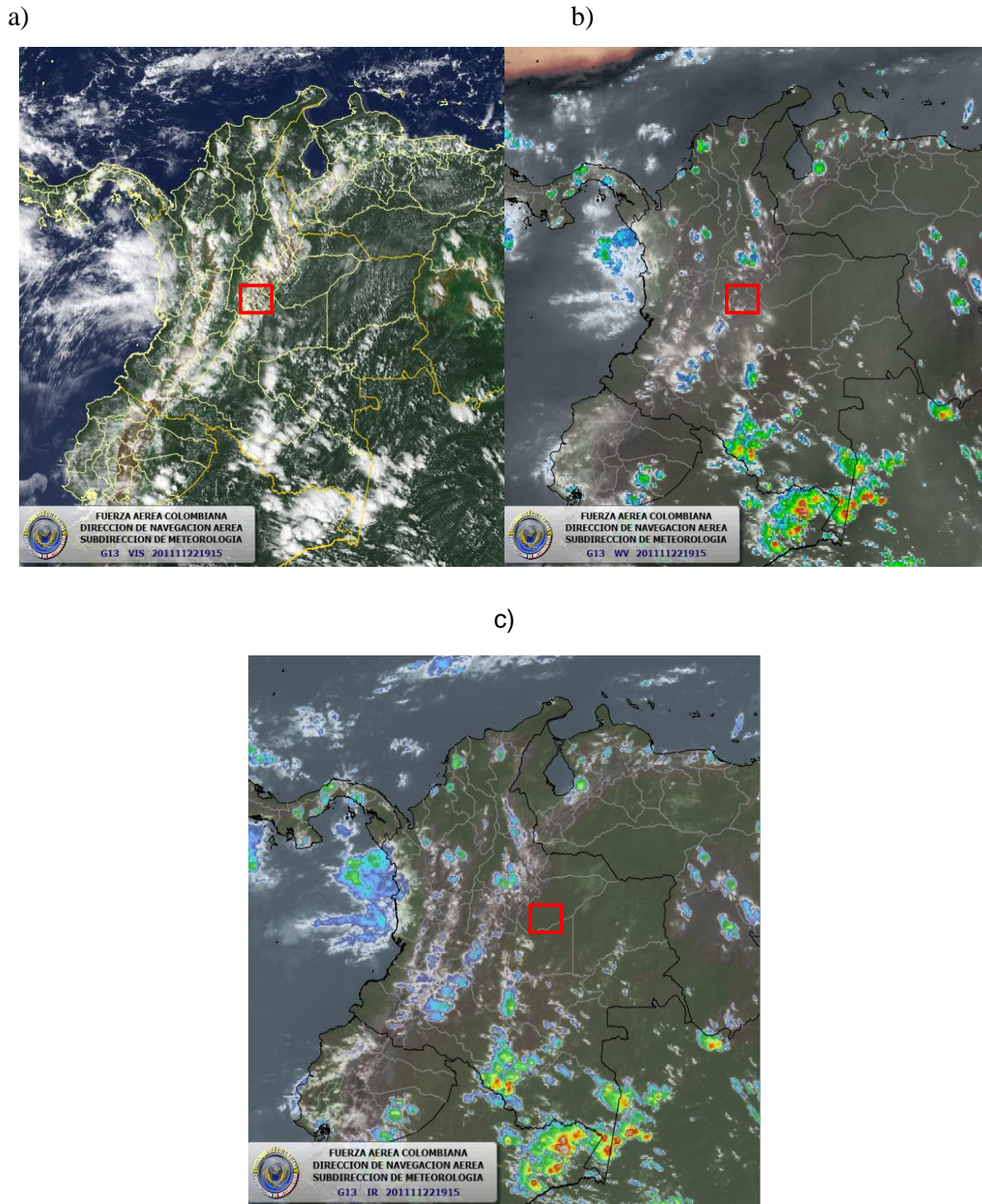
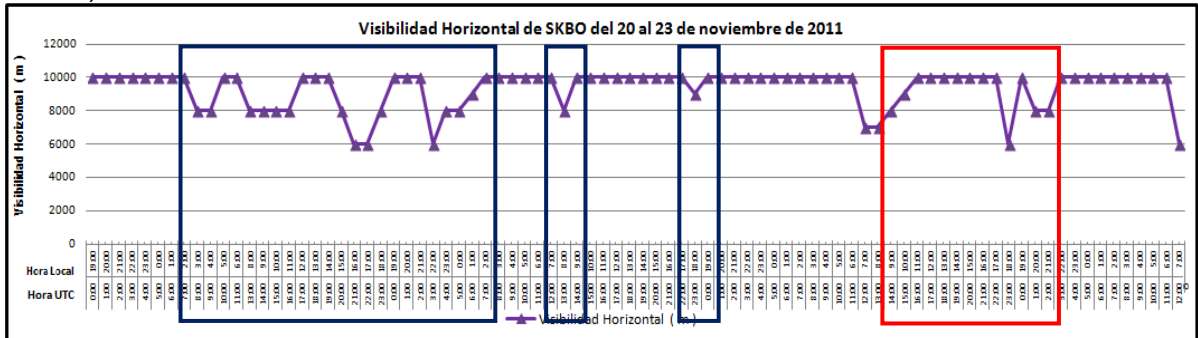


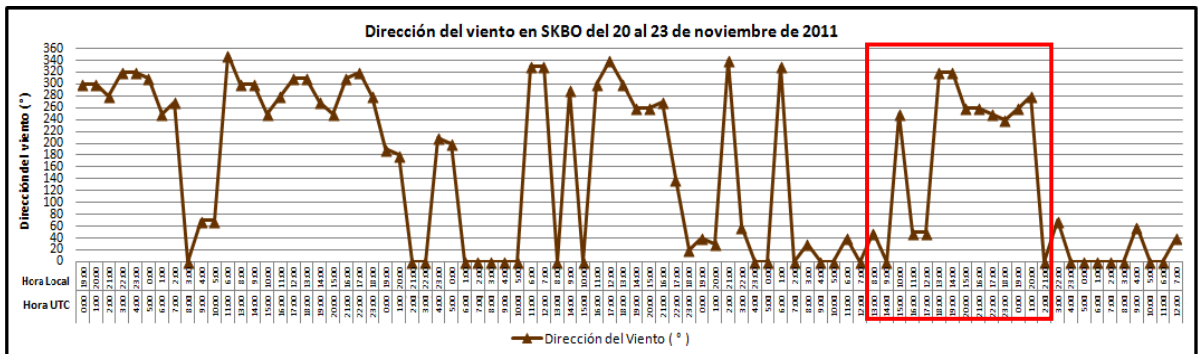
Figura 36: Imágenes de los canales: visible a), vapor de agua b) infrarrojo c). Del satélite GOES-13 el 22 de noviembre de 2011 a las 19:15 UTC (16:15 HLC) en donde se presentó el fenómeno más violento y el cierre del SKBO

En primer lugar se puede ver una atmósfera muy saturada, se da la situación que son iguales los valores de las temperaturas del aire y del punto de rocío en las siguientes isobaras de presión en la vertical: 600 mb (13.794,9 FT de altitud), 550 mb (15.955,3 FT de altitud) y 450 mb (20.803,7 FT de altitud), lo cual indica la presencia de nubosidad en estas capas.

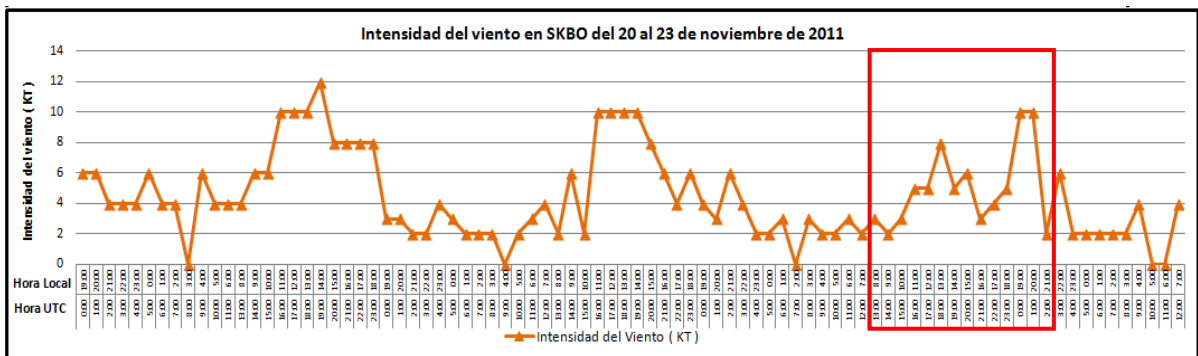
a)



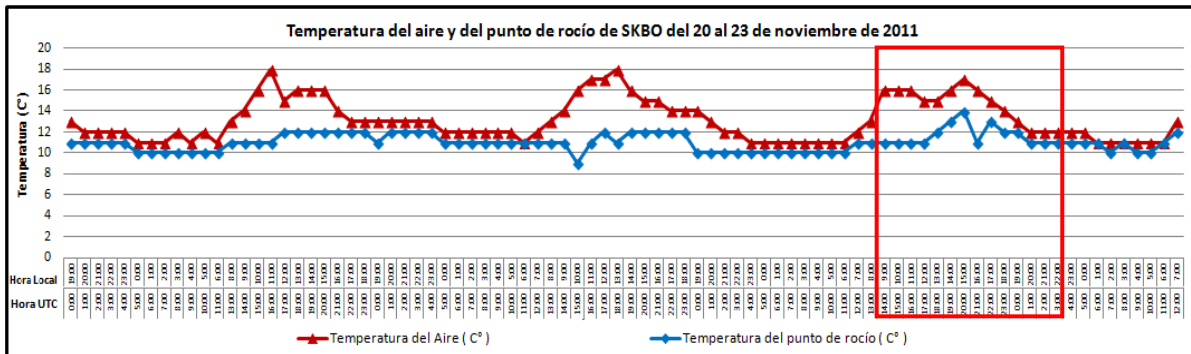
b)



c)



d)



e)

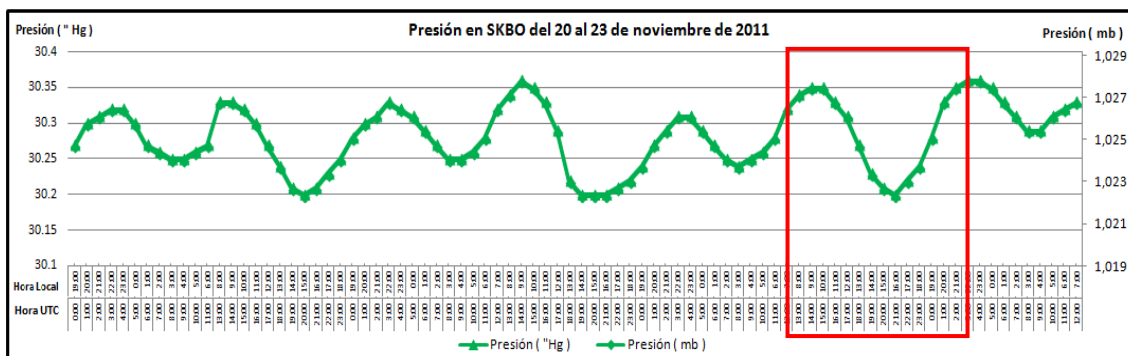


Figura 37: a)Visibilidad horizontal según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 20 de noviembre de 2011, 00 UTC al 23 de noviembre de 2011, 12 UTC, b) Dirección del viento según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 20 de noviembre de 2011, 00 UTC al 23 de noviembre de 2011, 12 UTC, c) Intensidad del viento según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 20 de noviembre de 2011, 00 UTC al 23 de noviembre de 2011, 12 UTC, d) Temperatura del aire y temperatura del punto de rocío según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 20 de noviembre de 2011, 00 UTC al 23 de noviembre de 2011, 12 UTC, e) Presión según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 20 de noviembre de 2011, 00 UTC al 23 de noviembre de 2011, 12 UTC, 12 UTC

Por otra parte el viento en capas bajas está muy débil con una intensidad de 5 KT y de componente E desde los 700 mb hasta los 600 mb. A esa altitud cambia la dirección del viento y es del NW con intensidad de 10 KT. Aproximadamente a los 350 mb cambia nuevamente a tener componente sur y aumenta la intensidad con la altura hasta un valor máximo de 30 KT, que a pesar de ser la mayor intensidad no es tan alta en comparación con otros días.

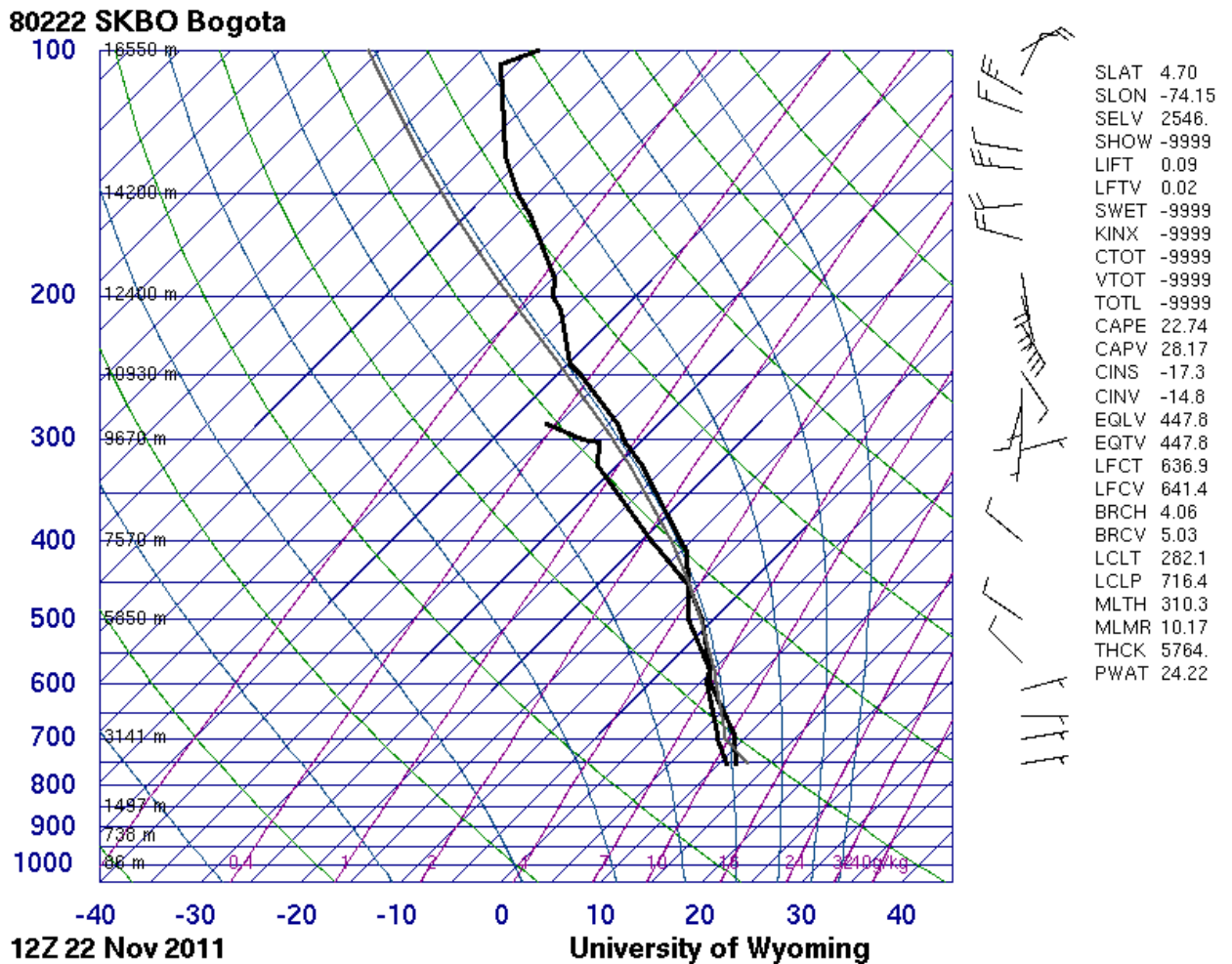


Figura 38: Diagrama SKEW-T del radiosondeo del SKBO para el 22 de noviembre de 2011, 12 UTC (<http://weather.uwyo.edu/cgi-bin/sounding?region=samer&TYPE=GIF%3ASKEWT&YEAR=2014&MONTH=04&FROM=2212&TO=2212&STNM=80222,2015>)

Con el fin de efectuar el análisis del desempeño del modelo WRF 2.1.1 de la FAC para este caso en especial, a continuación se aprecia en la Figura 40 un ejemplo de las cartas de viento a 750mb de la corrida de las 00 UTC del día 22 de noviembre de 2011, para las horas del evento es decir entre las 15:00 UTC del 22 de noviembre de 2011 y las 01:00 UTC del 23 de noviembre de 2011, debido a que la salida del modelo es cada 3 horas se utilizan las cartas de las 15 UTC a 21 UTC del 22-11-11 y las 00 UTC del 23-11-11.

En las cartas producto de la simulación con hora inicial 00 UTC del mismo 22 de noviembre de 2011, se aprecia que en capas bajas (750Mb, ver Figura 40) hay un área generalizada en la cordillera oriental de convergencia de vientos (en la cual se encuentra el SKBO), esto sirve de apoyo a un sector de convergencia principal con centro en la cordillera central al NW del SKBO en el Departamento de Antioquia.

En las cartas de 500 mb (ver Figura 41) se observa en el SKBO un sistema ciclónico justo al N del SKBO y una gran convergencia de vientos asociada a este sistema sobre el SKBO especialmente posterior a las 18 UTC en la que se ubica mucho más cerca del SKBO, el flujo se observa justo del W al E sobre el SKBO aportando al movimiento en sentido ciclónico situación que perdura hasta la última carta de las 00 UTC del 23 de noviembre de 2011. Así mismo en las cartas de 250 mb (ver Figura 42) se aprecia un área de divergencia de vientos bastante marcada patrón que se repite en todas las cartas y que se va desplazando un poco al N del SKBO. El flujo posee dirección SE a NW.

Por lo anterior se puede decir que en las cartas de viento en los 3 niveles revisados para la corrida de las 00 UTC del mismo día del evento, hay condiciones favorables para la formación de convección profunda en SKBO y al norte del mismo, puesto que en capas bajas se aprecia convergencia, en capas medias se encuentra el gatillador de la convergencia de vientos asociada a la alimentación de un sistema ciclónico cuyo centro se encuentra al N del SKBO. Sin hablar de la favorabilidad que le aporta la ventilación en altura debido a la zona de divergencia de vientos sobre el mismo lugar.

Con el fin de observar la capacidad del modelo durante los 2 días anteriores al evento también se analizan las corridas de las 00 UTC y 12 UTC del modelo de los días 20 y 21 de noviembre de 2011, a través del mismo análisis de 3 capas de la atmósfera y las cuales se pueden apreciar en el Anexo al final del documento (Anexo D, Figuras 82 a 93).

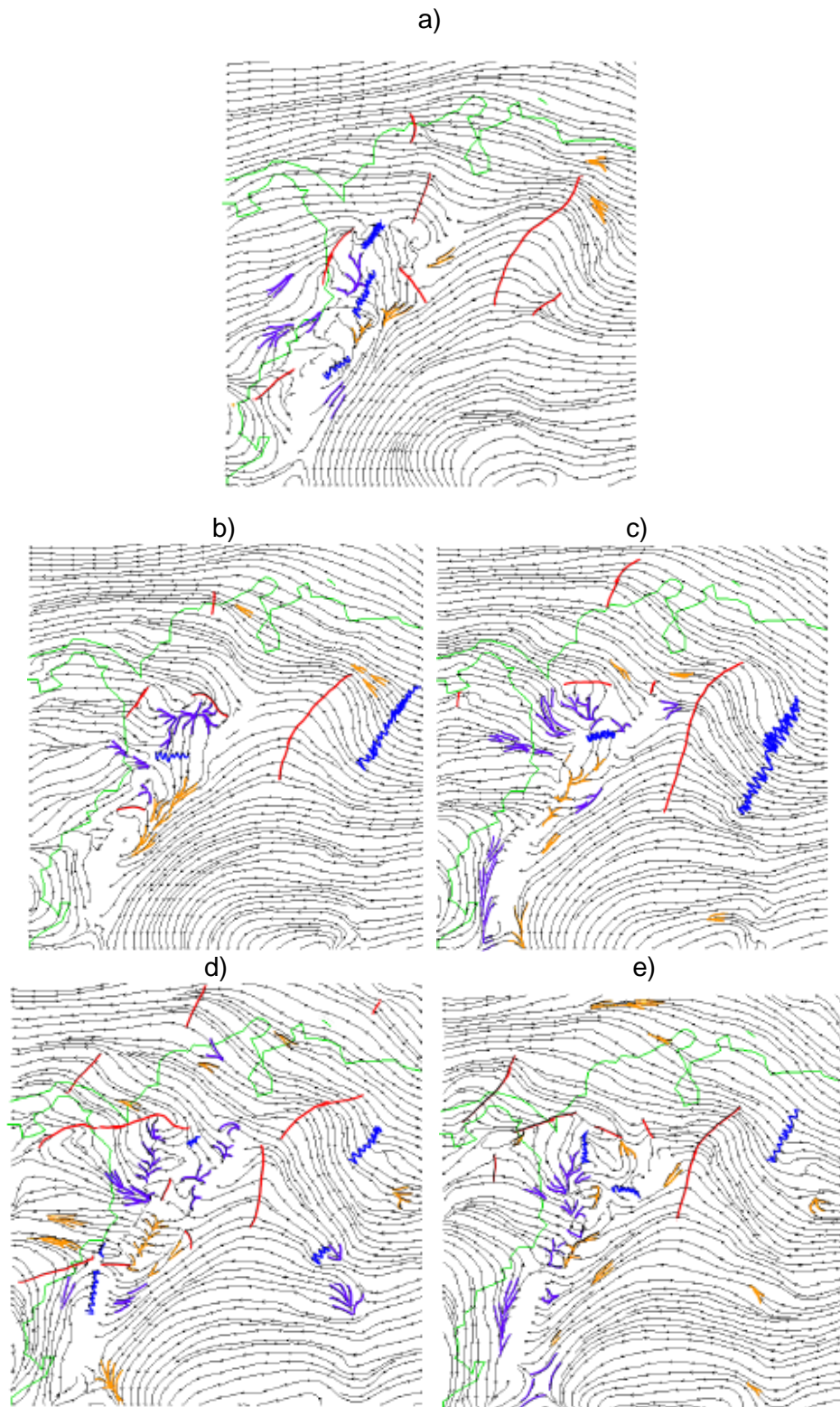


Figura 39: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 22 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c), 21 UTC (d) y 23 noviembre de 2011 a las 00 UTC (e)

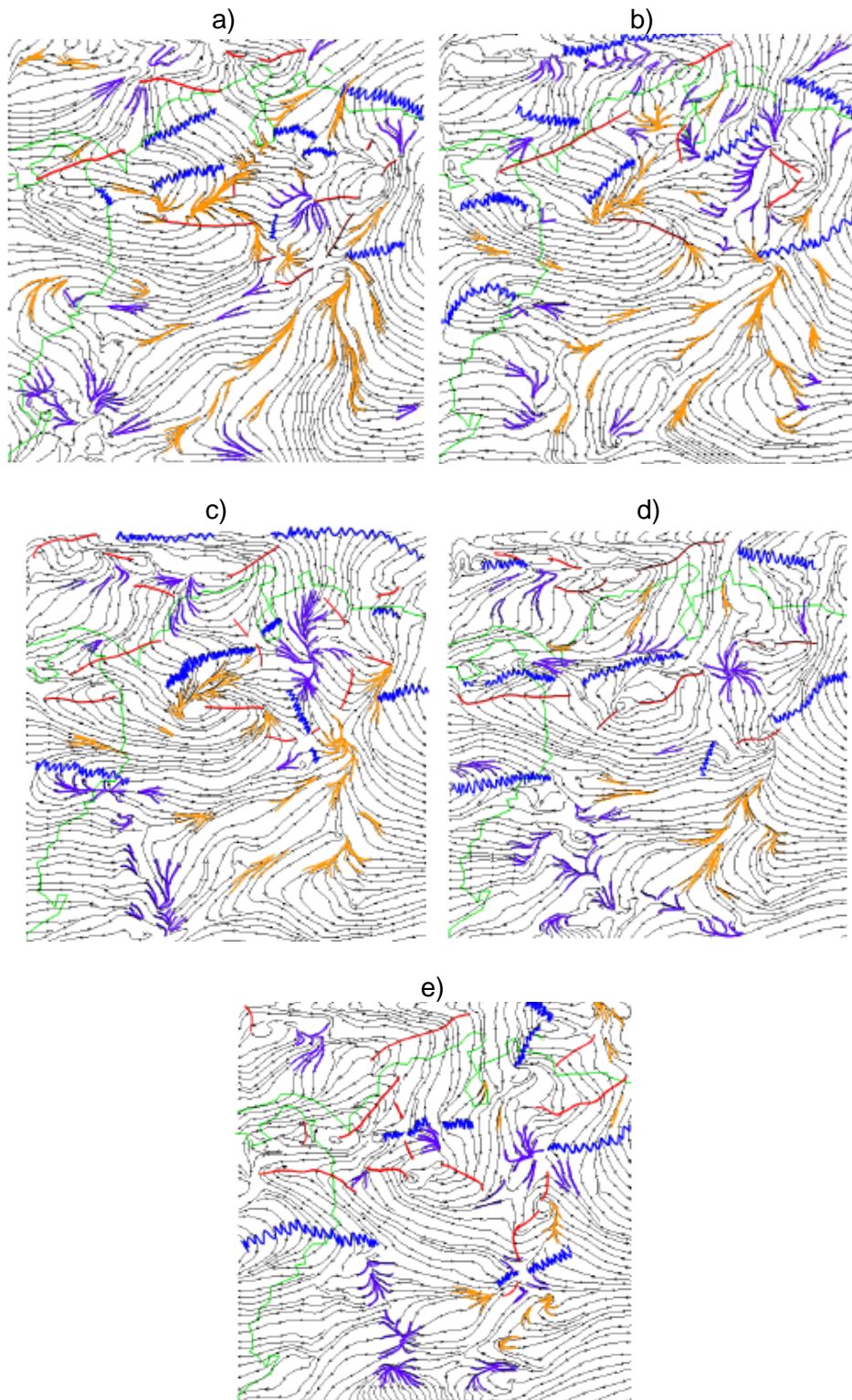


Figura 40: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 22 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c), 21 UTC (d) y 23 noviembre de 2011 a las 00 UTC (e)

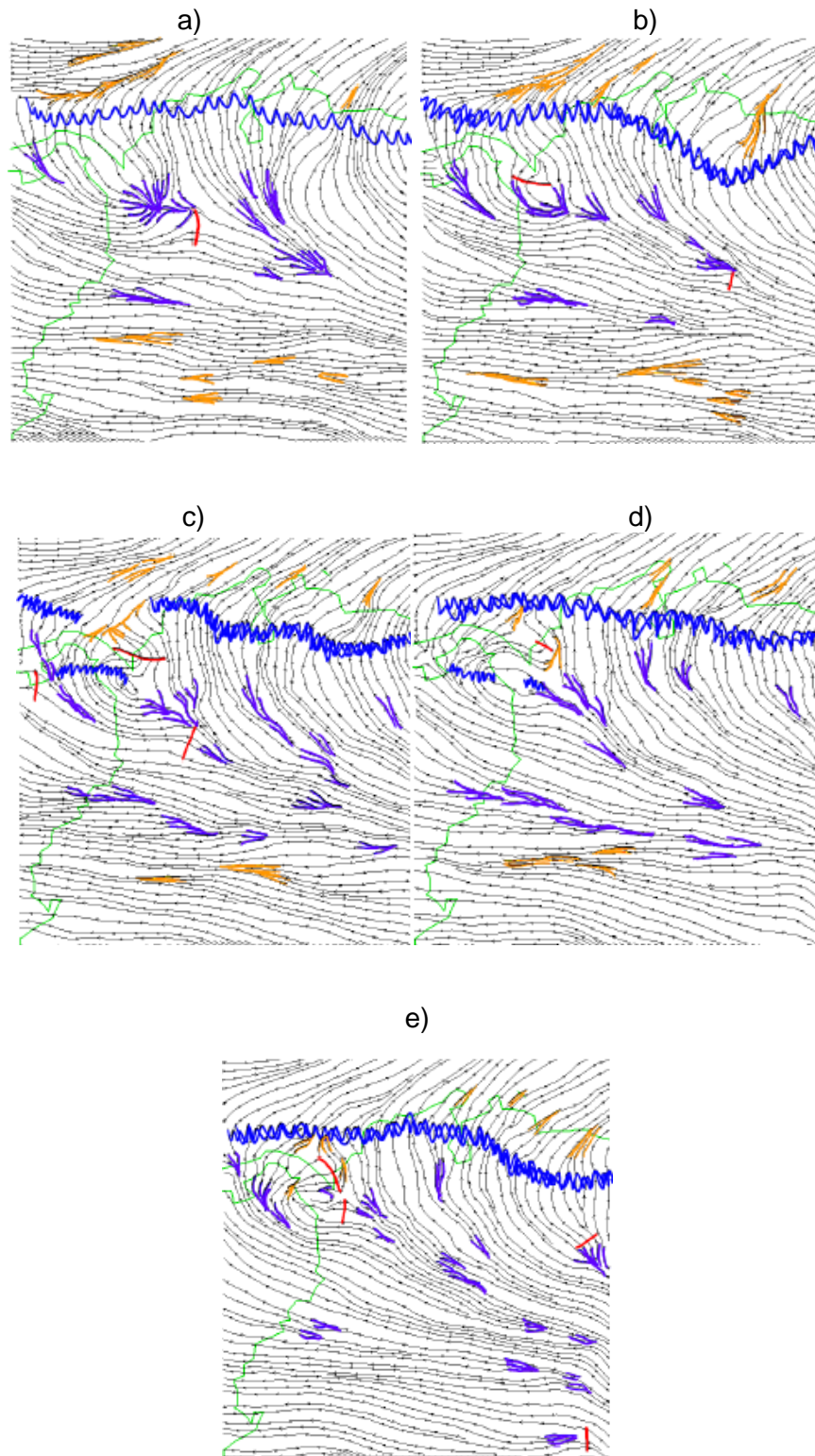


Figura 41: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 22 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c), 21 UTC (d) y 23 noviembre de 2011 a las 00 UTC (e)

En las cartas de la corrida de las 00 UTC del 20 de noviembre de 2011, se aprecia que en capas bajas (750Mb, Anexo D, Figura 82) se observa una región de convergencia de vientos especialmente al N de la posición del SKBO situada en el Valle del Magdalena y recostada hacia la cordillera oriental por lo que el flujo llega al SKBO desde el E o desde el SE para alimentar el centro de convergencia mencionado. Favoreciendo con esto la formación de nubosidad cumuliforme en el sector.

En las cartas de 500 mb (ver Anexo D, Figura 83) se observa como el flujo proviene del W y se dirige al E creando un movimiento ciclónico para alimentar un centro de convergencia al N del SKBO lo cual apoya la convección profunda siendo un gatillador para toda la nubosidad que se ha formado durante todo el período observado en el modelo.

Así mismo en las cartas de 250Mb (ver Anexo D, Figura 84) se aprecia una gran zona de divergencia de vientos del flujo proveniente del E y SE hacia el NW el cual tiene un centro un poco más al NW pero que sobre el SKBO todavía conserva esas características de ventilación en altura.

Por lo anterior se puede decir que las cartas de viento de la corrida de las 00 UTC del 20 de noviembre de 2011 están apoyando en toda la vertical la ocurrencia de sistemas convectivos a lo largo de las cordilleras central y oriental debido al apoyo de convergencia en capas bajas y medias y a la ventilación en altura que se soporta en el área de divergencia del viento en los mismos sectores prácticamente.

En las cartas de la corrida de las 12 UTC del 20 de noviembre de 2011, se aprecia que en capas bajas (750Mb; ver Anexo D, Figura 85) hay una extraña tendencia en la que se intercalan unos visos de movimientos en sentido ciclónico pero que a la vez se presenta divergencia de vientos en el área del SKBO debido a la finalización de una vaguada que abarca cientos de kilómetros y la cual se encuentra por el E de la estación. En la carta de las 00 UTC del 23 de noviembre de 2011 hay un cambio de

flujo ahora proveniente del W para alimentar un sistema de movimiento ciclónico que se encuentra al N de la posición del SKBO y el cual permanece durante todo el lapso de tiempo observado.

En las cartas de 500 mb (ver Anexo D, Figura 86) se aprecia que el flujo continua proveniente del W hacia el E y que posterior a las 18 UTC se empieza a entorchar ciclónicamente y a alimentar un área de convergencia cuyo centro se encuentra al N del SKBO y que favorece como gatillador las formaciones nubosas que hayan en capas bajas y que alcance la capa media.

Así mismo en las cartas de 250 mb (ver Anexo D, Figura 87) se aprecia un patrón de divergencia sobre el SKBO durante todo el lapso de tiempo observado lo que aporta ventilación a los sistemas convectivos que se formen durante este período de tiempo, el flujo proviene del SE hacia el NW dando origen a un anticiclón que está sobre el N y centro de Colombia.

Por lo anterior se puede concluir que la corrida de las 12 UTC del 20 de noviembre de 2011 indica que hay todos los mecanismos en las 3 capas para que se creen perduren sistemas convectivos sobre la región en la que se localiza SKBO.

En las cartas de la corrida de las 00 UTC del 21 de noviembre de 2011, se aprecia que en capas bajas (750Mb; ver Anexo D, Figura 88) sobre el SKBO se encuentra un área de convergencia del viento a lo largo de toda la cordillera oriental que favorece la formación de nubosidad cumuliforme, y este mismo comportamiento se observa a lo largo de todo el período de tiempo observado, con la particularidad que el flujo proviene principalmente del N.

En las cartas de 500 mb (ver Anexo D, Figura 89) se observa que continúa el patrón del viento de 750 mb, que proviene en gran parte del N, en este caso se observa un centro de un patrón ciclónico al NE del SKBO pero sobre el SKBO se observa un área de

convergencia que alimenta este sistema en mención el cual se subdivide en dos centros de convergencia y que finalmente se desplazan hacia el W posicionándose casi sobre el SKBO a las 00 UTC del 23 de noviembre de 2011.

Así mismo en las cartas de 250 mb (ver Anexo D, Figura 90) se halla un área de divergencia en altura proveniente del flujo del SE y que se dirige hacia el NW alimentando una gran dorsal que se sitúa sobre todo el norte y centro de Colombia, lo que favorece la formación de sistemas convectivos sobre el SKBO.

Por lo anterior se puede decir que en las cartas de viento provenientes de la corrida de las 00 UTC del 21 de noviembre de 2011, las condiciones favorecen la formación de sistemas convectivos a través de la convergencia de capas bajas y medias y la divergencia de capas altas, condiciones que permanecen a lo largo de todo el período de tiempo observado.

En las cartas de la corrida de las 12 UTC del 21 de noviembre de 2011, se aprecia que en capas bajas (750Mb; ver Anexo D, Figura 91) se observa el flujo proviniendo del E hacia el W con un patrón de convergencia que perdura en el lapso de tiempo observado, lo que favorece la formación de nubes cumuliforme a lo largo de la cordillera oriental.

En las cartas de 500 mb (ver Anexo D, Figura 92) se observa en casi todo el período patrones de movimientos en sentido ciclónico (excepto en la carta de las 18 UTC en la que se observa el patrón contrario) sin embargo el flujo siempre proviene del E hacia el W, con lo cual favorece la formación de nubosidad de desarrollo vertical asociada a centros o vórtices de convergencia ubicados al S del SKBO.

Así mismo en las cartas de 250 mb (ver Anexo D, Figura 93) se halla un área de divergencia en altura proveniente del flujo del SE y que se dirige hacia el NW

alimentando una gran dorsal que se sitúa sobre todo el norte y centro de Colombia, lo que favorece la formación de sistemas convectivos sobre el SKBO.

Por lo anterior se puede decir que en las cartas de viento en los 3 niveles revisados para la corrida de las 12 UTC del 21 de noviembre de 2011, se favorece la formación de sistemas convectivos en SKBO a través de la convergencia de capas bajas y medias y la divergencia de capas altas, condiciones que permanecen a lo largo de todo el período de tiempo observado.

De acuerdo a la sección temporal mostrada en la Figura 43 de la corrida de las 00 UTC del mismo día del evento, y en la cual se resalta en el recuadro rojo el lapso de tiempo en el cual ocurrió el evento, se aprecia concentración de humedad significativa en la mayor parte del lapso en capas bajas, así mismo se observa que a partir de las 21 UTC se presenta un 100% de humedad relativa lo cual indica la presencia de una nube de desarrollo vertical y que probablemente este precipitando. Esto está acorde con la presencia de TSRA en la estación. Aunque en la variable de presencia de nubosidad no sea tan clara la existencia de nubes de desarrollo vertical, se puede decir que si representa de cierta manera este evento. Por otra parte el viento en superficie se encuentra del NW más o menos proveniente de los 300° y posterior de los 70° muy similar a lo ocurrido en la realidad.

Se realizó un análisis similar con las secciones temporales de los dos días anteriores a través de figuras similares a la Figura 43 las cuales se pueden apreciar en el Anexo al final del documento (Ver Figuras 94 a 97). En todas se coincide con la presencia de un alto valor de humedad en capas bajas, sin embargo las corridas del día 20 de las 00 UTC y de las 12 UTC y la del día 21 a las 00 UTC no muestran señal de nubosidad tipo cumuliforme de desarrollo vertical. No es sino hasta la corrida de las 12 UTC del día 21 de noviembre de 2011 en la cual se puede observar claramente humedad alta en compañía de presencia de nubosidad en la vertical a partir de las 15 UTC y hasta las 03 UTC aproximadamente entre los 11.000 y los 38.800 pies, con una marcada humedad relativa alta desde superficie superficie.

Así mismo se analizaron las cartas de precipitación acumulada en lapsos de a 3 horas con el fin de observar la respuesta en esta variable las cuales pueden ser consultadas en el Anexo al final del documento (Figuras 98 a 102). En esas figuras se aprecia que las corridas del día 20 de noviembre y del 22 de noviembre subestiman la cantidad de precipitación que se presentó en realidad y que realmente las corridas que mejor representaron las consecuencias de las precipitaciones provenientes de los sistemas convectivos en el SKBO fueron las del día 21 en especial la de las 12 UTC puesto que represento una mayor cantidad de mm de lluvia en los lapsos observados.

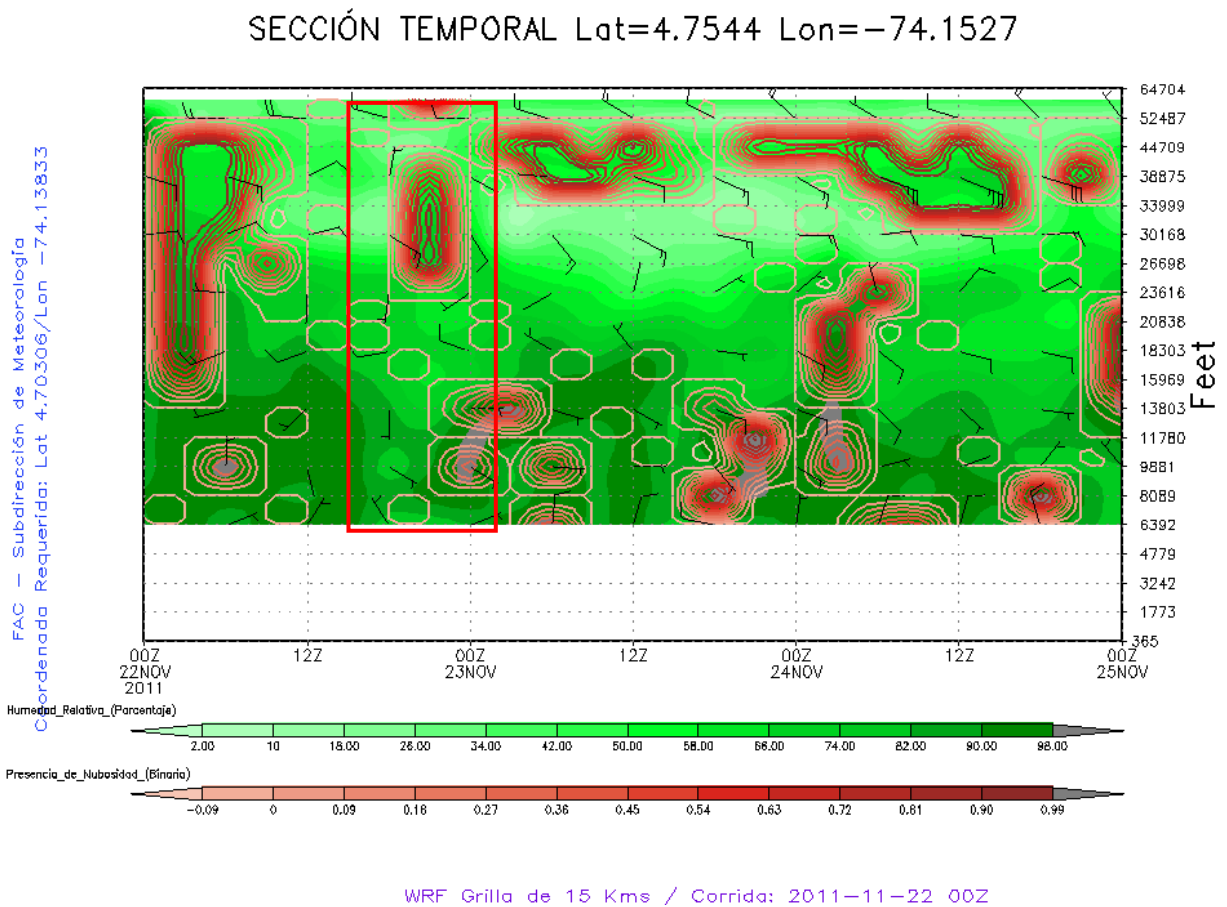


Figura 42: Sección temporal del SKBO de la corrida del 22 de noviembre de 2011 a las 00 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas

4.3.3 Episodio 3, 25 de junio de 2013

El último caso del 25 de junio de 2013 se escoge por ser un evento atípico, debido a que en el mes de junio no hay casi presencia de TS en el SKBO en el período de evaluación encontrándose únicamente 2 casos en el año 2013; Así: el 2 de junio de 2013 a las 00:00 UTC:

SKBO 020000Z 22007KT 9000 –DZ BKN015 13/11 A3034 RETSRA

Pero este caso no se escoge por ser un caso solo y aislado, no tiene más reportes METAR o SPECI asociados que permitan ver una evolución a nivel de otras variables meteorológicas del sistema convectivo presente y realmente el reporte es reciente y no de tiempo presente.

El segundo caso que se presenta el 25 de junio de 2013 entre las 17:00 UTC y las 21:00 UTC, está compuesto por los siguientes reportes METAR y tiene una duración de 5 horas en el SKBO:

De acuerdo al análisis de superficie (Figura 44) para el día 25 de junio de 2013 y de los dos días anteriores a la ocurrencia del evento, el día 23 de junio se encontraba en el territorio colombiano desplazándose una onda tropical en el nororiente del país ingresando por Venezuela y que al día 24 de junio de 2013 se ve como se desplaza hasta la mitad del Caribe, favoreciendo la advección de humedad en el eje de la vaguada y muy probablemente se relacione con la formación de nubosidad de tipo cumuliforme de desarrollo vertical en la región andina, así mismo se observa a la Zona de convergencia intertropical localizándose alrededor de la latitud de 8° Norte entre el 23 y el 26 de junio de 2013, sin ejercer mayor influencia sobre las condiciones meteorológicas del centro del país, en particular sobre las del SKBO. Es de resaltar que la componente del viento que se presenta justo el día del evento varía con respecto a los demás días de muestra al provenir ya no del SE sino del NW lo que también confirma el ingreso de humedad a Bogotá desde el Valle del Magdalena (ver Figura 44c).

Adicionalmente se realizó un nefoanálisis de las imágenes para Colombia del instrumento IMAGER a bordo del satélite GOES 13. Se confirma la presencia de sistemas convectivos en el período en el que se reportó en el METAR el evento, como se aprecia en la Figura 45. Se pueden observar sistemas convectivos en el SKBO con alta respuesta de pixel en cada uno de los canales durante las horas que componen el evento.

Es claro en el canal visible como a partir de las 19:15 UTC se observa un alto albedo lo que implica una composición de nubes de hielo, por su gran poder de reflexión de la luz, dentro del cuadrante que encierra el SKBO y su área circundante especialmente al SE y la cual se desplaza hacia el W recargada y creciendo por el S del cuadrante, adicionalmente se aprecia otro sistema que crece por el NW y que ingresa al cuadrante con fuerza para el resto del período del caso de estudio y se puede apreciar cómo se van generando nubes tipo cirrus en la parte más alta de los sistemas a medida que transcurre el tiempo al observar las imágenes visibles (ver Anexo B Figura 58, imágenes del canal visible).

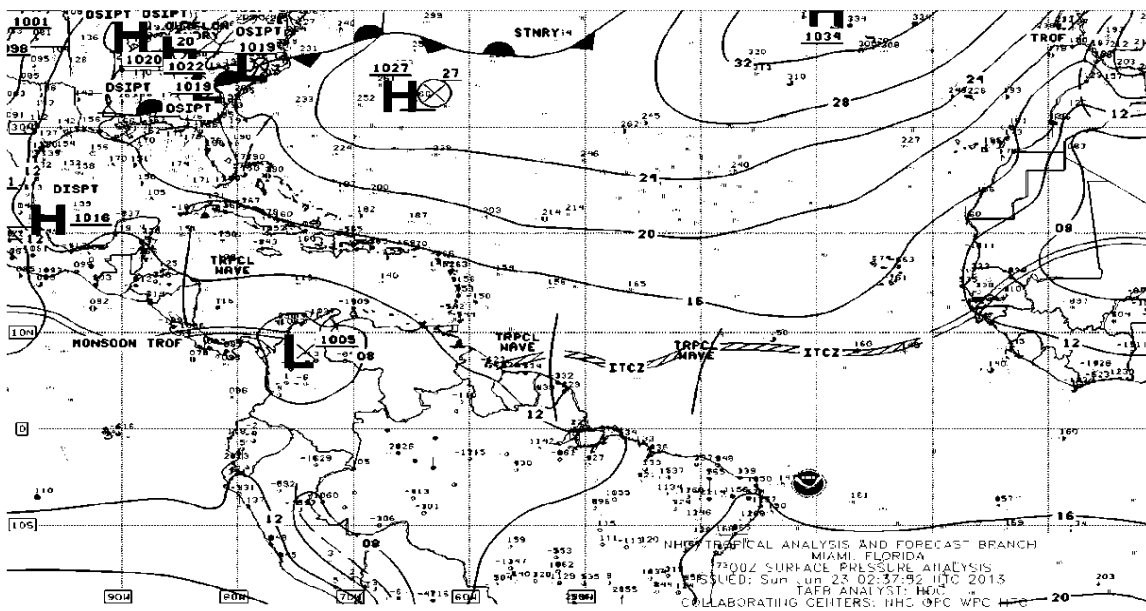
El canal infrarrojo (ver Anexo B Figura 59, imágenes del canal infrarrojo) permite ver topes bastante fríos de la nubosidad a partir de las 19:45 en la que por el SW del cuadrante se aprecian topes que alcanzan un nivel alto de la atmósfera y por ende sus temperaturas debido a la formación de hielo son demasiado bajas y se observan muy brillantes por la baja temperatura. Adicionalmente se aprecia su forma redondeada típica de sistemas convectivos especialmente de gran escala tal como lo cita Maddox, 1980. Este sistema se desplaza por el SE pero más adelante se puede ver como se hace una fusión de este sistema con uno que está creciendo con alta velocidad situado al NW del cuadrante y que en las siguientes horas ingresa al cuadrante con la fuerza de reciclaje del sistema anterior y que afecta las condiciones meteorológicas del SKBO. En las imágenes del canal vapor de agua (ver Anexo B Figura 60, imágenes del canal vapor de agua) se observa a través de unos altos valores de pixel y de manera brillante, indicando en la atmósfera media y alta una alta cantidad de humedad, un muy buen ejemplo de la condición de un sistema convectivo es la de la imagen de las 20:15 UTC en la cual se aprecia los altos valores debido a la alta columna de humedad llegando a capas altas de la atmósfera.

Según los reportes METAR y SPECI previos al evento y durante el evento se encontró lo siguiente: El evento se presenta entre las 17:00 UTC y las 21:00 UTC, así que la duración del evento total fue de 5 horas y se incluyen 5 reportes METAR anteriores para estudiar el comportamiento de las variables meteorológicas desde unas horas antes del evento y durante él (ver Anexo A). Entre las 12:00 UTC (07:00 HLC) y las 16:00 UTC (11:00 HLC) del 25 de junio de 2013, los informes METAR y SPECI reportaron viento que oscila entre los cuadrantes E y NW y su intensidad es débil al oscilar entre los 03 y los 06 KT, posterior al inicio del evento entre las 17:00 UTC (12:00 HLC) y las 20:00 UTC (15:00 HLC) el viento cambia de dirección significativamente proveniente ahora desde el cuadrante SW. A las 21:00 UTC vuelve a situarse proveniente del NW. Durante el evento hay un aumento significativo de intensidad del viento, llegando a subir en el inicio del evento de 6KT a 8 KT en una hora y llegando a un máximo de 15KT en presencia del fenómeno RA y de nubes TCU.

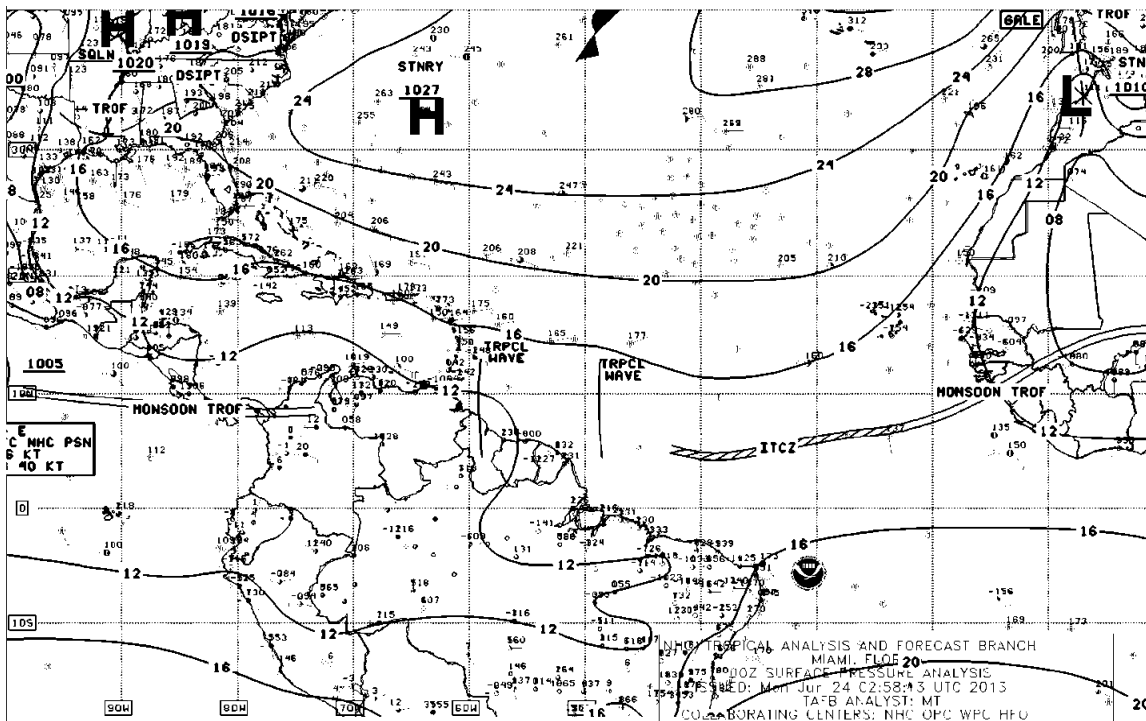
Por otra parte la visibilidad es ilimitada (superior a 10 Km) casi durante todo el evento excepto en la última hora, es decir a las 21:00 UTC en la cual se reduce a 8000 metros reducida por el fenómeno de chubascos en la vecindad (VCSH). Este mismo fenómeno se observa dos horas antes del evento y hasta la hora anterior al inicio del mismo entre las 15:00 y 16:00 UTC.

En la hora 20:00 UTC (15:00 HLC) se observa un fenómeno presente en el SKBO de precipitación y es lluvia (RA); y el techo de nubes durante todo el período del tiempo es bajo, situado a 2.000 FT. Asimismo el comportamiento de la temperatura del aire oscila entre los 12°C y 20°C. Por su parte, el punto de rocío en las horas previas tiene el valor constante a 10°C, baja al inicio del evento a 09°C y se va acercando a la temperatura del aire encontrándose a 4°C y 2°C de diferencia (20:00 UTC y 21:00 UTC respectivamente). El punto de rocío varía significativamente pues la máxima diferencia entre ambas temperaturas se reportó a las 19:00 UTC (14:00 HLC) cuando la temperatura del aire es máxima y la diferencia con el punto de rocío llega a ser de 11°C.

a)



b)



c)

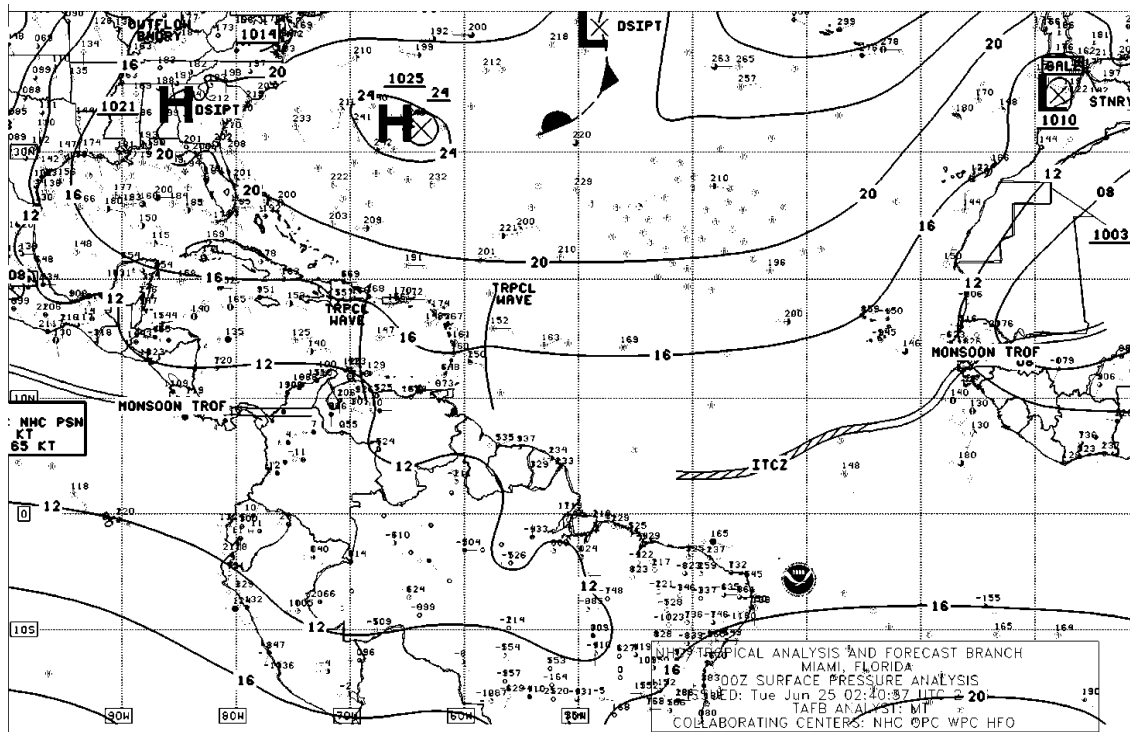


Figura 43: Análisis de superficie para el 23 (a), 24 (b) y 25 (c) de junio de 2013, 00 UTC (NWS DIFAX Weather Map Archive, 2015)

Durante el mismo lapso de tiempo entre las 12 UTC y las 16 UTC del 25 de junio se puede apreciar que la presión se encuentra oscilando. Por el contrario, durante el evento se observa una marcada disminución desde los 30,39”Hg hasta los 30,29”Hg, disminuyendo 0.10” Hg en total con excepción del último reporte en el cual remonta 0.01” Hg.

El último reporte (reporte de las 21:00 UTC) cambia bastante en casi todos los parámetros nombrados anteriormente y se atribuye a la presencia de una tormenta reciente en el aeródromo (RETSRA). Por otra parte, analizando los reportes METAR y SPECI de los días previos a la ocurrencia del evento, se evidenció que se no se reportaron eventos similares de presencia de TCU o RETSRA en el SKBO. Sin embargo si fue posible observar varias ocurrencias de VCSH y algunos fenómenos de precipitación en el SKBO a horas similares al menos el día anterior, de variada duración y de tipo intermitente entre las 14:00UTC y las 02:00 UTC. Esto da una leve noción de persistencia en la ocurrencia de sistemas convectivos no en el área de

estudio pero si en las vecindades del Aeropuerto Internacional y que contribuyeron la presencia de fenómenos de precipitación como RA y -DZ.

A continuación se analizan las series de datos de los reporte METAR y SPECI, para cada una de las variables meteorológicas con el fin de ver a fondo el comportamiento del evento y el ciclo diario del tiempo en el SKBO, con los datos de visibilidad. En la Figura 46a se aprecia que la visibilidad prácticamente es constante durante los 3,5 días analizados y es superior a 10 km, excepto en la hora 21:00 UTC día del evento donde se reduce a 8.000 metros. A las 01:00 UTC del mismo día 25 de junio se reduce la visibilidad hasta 5.000 metros debido a las lluvias y los chubascos (con presencia de TCU también) que se habían nombrado en párrafos anteriores, con los cuales se puede ver esa leve persistencia del evento. Este tipo de análisis se realiza únicamente con la información observada, ya que el modelo WRF 2.1.1 no cuenta con una variable física que permita monitorear la visibilidad horizontal.

Como se mencionó anteriormente, el viento presenta un cambio de dirección importante, como se aprecia en la Figura 46b, es decir que en períodos en los que no se presenta el evento el viento tiene componente E y tiene componente W durante las horas del evento, y que un comportamiento similar se obtiene al presentarse otros eventos como VCSH, RA, DZ en el aeródromo o incluso reportes de LTNG relativamente cercanos como en horas de la noche y de la madrugada posterior las 23 UTC del día anterior.

Por otra parte, se aprecia que el mayor aumento de la intensidad del viento de hasta 15 KT ocurrió justamente durante el evento el 25 de junio. Con respecto al promedio en general de intensidad del viento, durante todas las horas del evento se ve como se aumenta significativamente, tal y como se aprecia en la Figura 46c, siendo este aumento de la intensidad la más alta de los 3,5 días analizados. Así mismo se puede ver cómo los días anteriores en presencia de otros fenómenos convectivos, aumenta también el viento de manera significativa, hasta por encima de los 10KT. Por otra parte se aprecia que el viento en calma es poco común para el período de estudio, así como que el promedio de intensidad del viento es 5 KT.

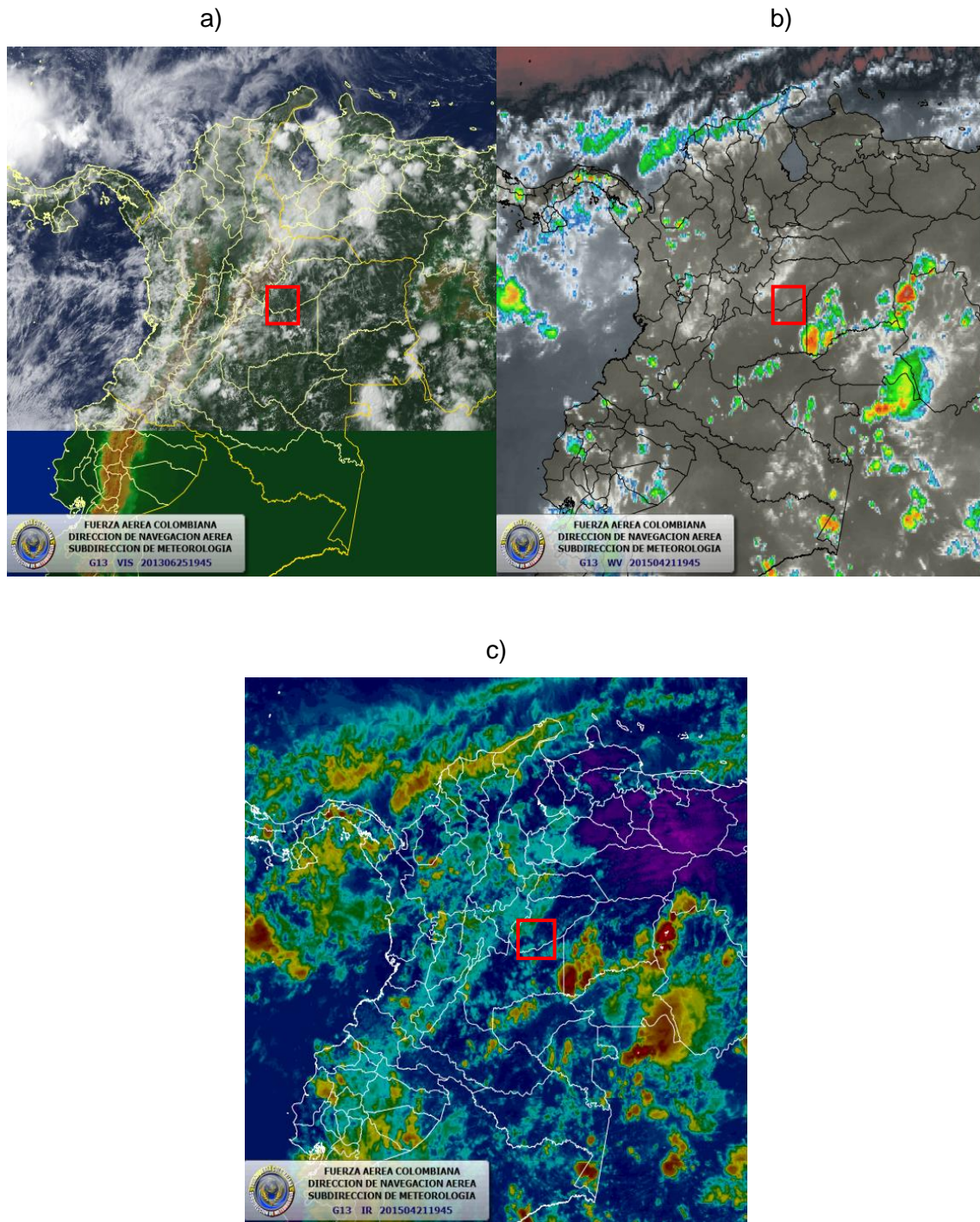


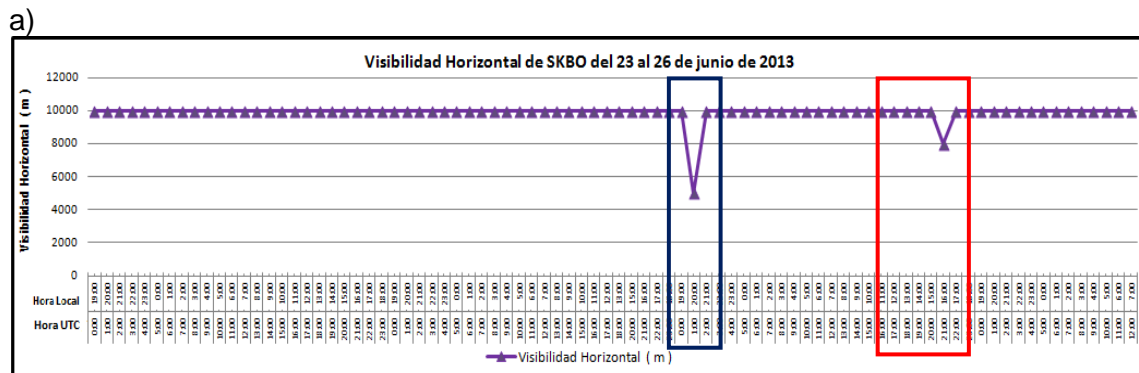
Figura 44: Imágenes de los canales: infrarrojo a), vapor de agua b) y visible c). Del satélite GOES-13 el 25 de junio de 2013 a las 19:45 donde se observa lo reportado como reciente en el METAR de las 20:00 UTC (15:00 HLC) en donde se presentó el fenómeno sobre el aeródromo de RA en el SKBO

Así mismo en la Figura 46e se puede apreciar el comportamiento de la temperatura y la temperatura del punto de rocío durante los 2 días previos y el día del evento. Se aprecia una tendencia a la disminución de las temperaturas desde las 20 UTC (15 HLC). Así mismo como un acercamiento entre las mismas denotando un aumento de la humedad relativa en ese momento y presencia de precipitaciones en el aeródromo, este comportamiento se repite en horas de la noche de los días 24 y 25 de junio y coincide con precipitaciones previas o recurrentes dentro o en las vecindades del SKBO.

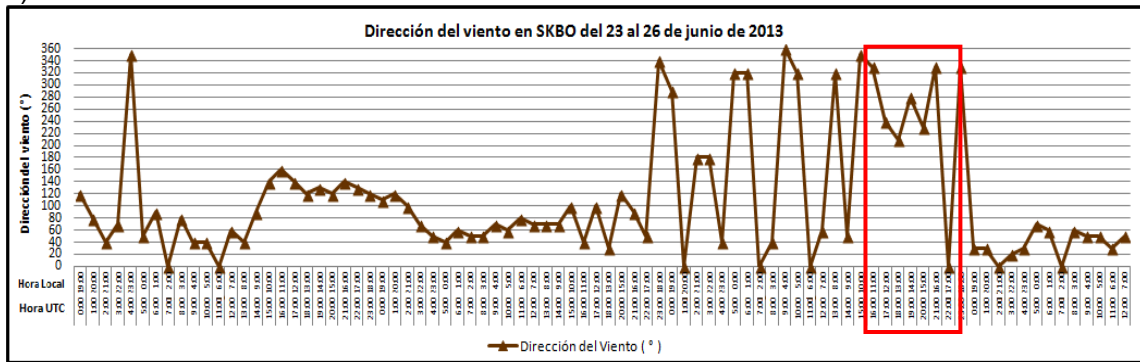
Por otra parte en la Figura 46d se observa como la presión comienza a descender desde la hora previa (16 UTC) al inicio del evento, aunque al parecer estos descensos son recurrentes como parte de un ciclo diurno de la presión en los días anteriores al del evento y en cuyas horas de ocurrencia coinciden con uno de los dos mínimos diarios.

Por otra parte se tiene en la Figura 47 el radiosondeo del día 25 de junio de 2013 con el fin de apreciar qué comportamiento de la atmósfera en la vertical antecedió el evento a las 12:00 UTC del mismo día.

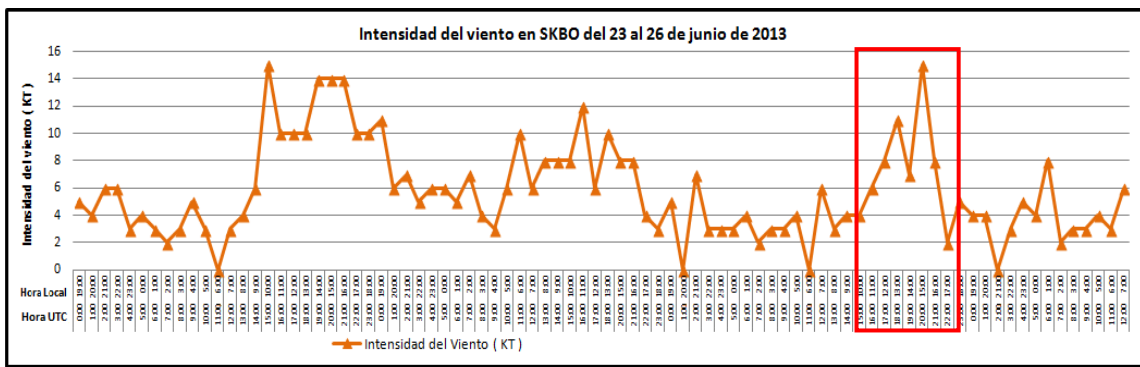
En primer lugar se puede ver una atmósfera seca especialmente en capas bajas en las que las temperaturas del aire y del punto de rocío se encuentran bien separadas (incluso en un punto hasta por 5°C) hasta la altura de 570 mb (15.072,8 FT de altitud) en la cual se encuentran igualadas las temperaturas del aire y del punto de rocío aproximadamente, lo cual indica la presencia de nubosidad en estas capas.



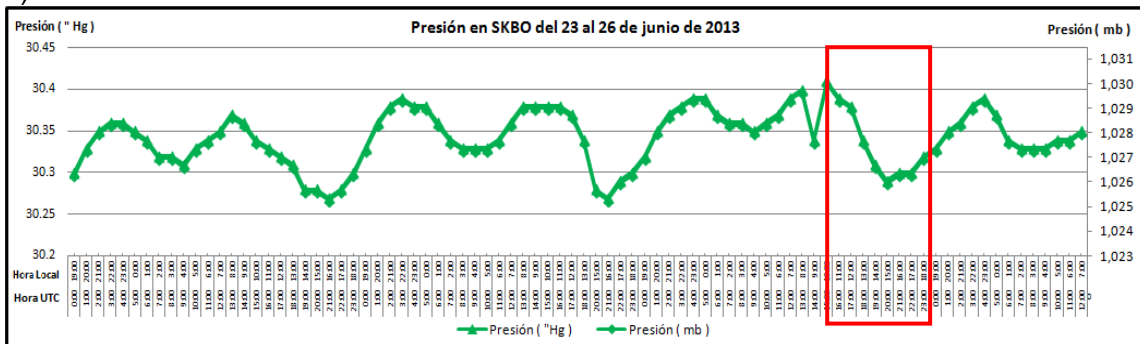
b)



c)



d)



e)

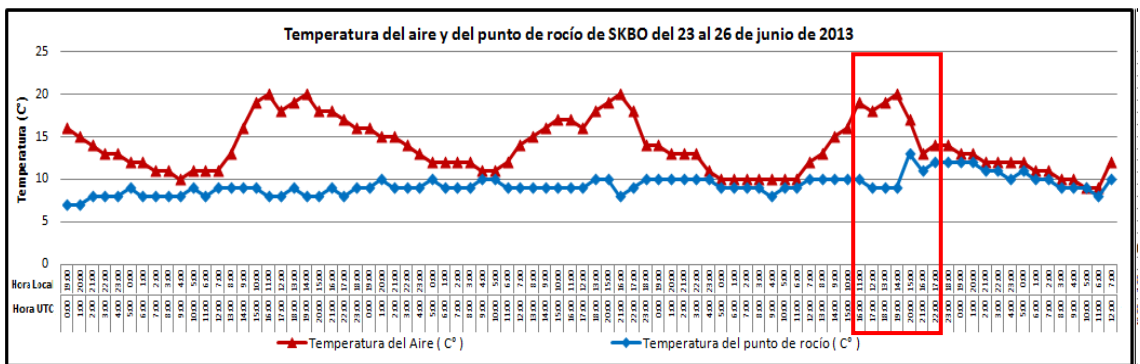


Figura 45: a) Visibilidad horizontal según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 23 de junio de 2013, 00 UTC y el 26 de junio de 2013, 12 UTC; b) Dirección del viento según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 23 de junio de 2013, 00 UTC y el 26 de junio de 2013, 12 UTC; c) Intensidad del viento según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 23 de junio de 2013, 00 UTC y el 26 de junio de 2013, 12 UTC; d) Presión según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 20 de abril de 2014, 00 UTC al 23 de abril de 2014, 12 UTC; e) Temperatura del aire y temperatura del punto de rocío según reportes METAR/SPECI del SKBO entre el 23 de junio de 2013, 00 UTC y el 26 de junio de 2013, 12 UTC

En capas bajas se observa que el viento tiene dirección SE desde la superficie hasta los 450 mb (20.803,7FT de altitud) en la cual cambia a dirección del E. En cuanto a la intensidad, ésta si varía más rápido con la altura, aumentando de 10 KT (intensidad desde superficie hasta 600 mb) a 20 KT a partir de los 600 mb (13.794,9 FT) más arriba en la vertical se promedia la intensidad entre 15 a 20 KT y aproximadamente por encima de los 150 mb cambia nuevamente a tener componente SE y aumenta la intensidad con la altura hasta una máxima de 35 KT que a pesar de ser la mayor intensidad no es tan significativa en comparación a otros días.

es decir entre las 17:00 UTC y 21:00 UTC, debido a que la salida del modelo es cada 3 horas se utilizan las cartas de las 15 UTC a las 21 UTC.

En las cartas producto de la corrida de las 00 UTC del 24 de junio de 2013, se aprecia que en capas bajas (750 mb , Figura 48) el flujo proviene del E hacia el W y justo al N de la posición del SKBO se presenta un giro anticiclónico del flujo, con el fin de alimentar una confluencia de vientos en el área alta del valle del Magdalena hacia el final de la cordillera central, esto para la carta de las 15 UTC. En la carta de las 18 UTC se aprecia una región de difluencia, patrón que continúa para las 21 UTC; lo cual no favorece la formación de convección sobre el SKBO.

En las cartas de 500 mb (ver Figura 49) se observa en el SKBO que no muestra sistemas sinópticos significativos sobre el SKBO, simplemente se observa que el flujo va del SE al NW, la única ondulación ciclónica significativa en el lapso de tiempo se presenta sobre el área marítima del Caribe Panameño, y otra sobre el departamento del Magdalena por lo que no se encuentra un gatillador definido por el campo de viento durante el lapso pronosticado por el WRF 2.1.1.

Así mismo en las cartas de 250 mb (ver Figura 50) se aprecia el flujo proveniente del NE hacia el SW, sin embargo no se observa ninguna estructura especial, o movimiento del campo de viento a esta altura, por lo menos en el centro del país o específicamente sobre el SKBO, únicamente se observan unas pequeñas vaguadas al nororiente del país en la región del Catatumbo, y más al norte sobre el Caribe en el área marítima si se observa una gran dorsal que abarca por el W del departamento del Magdalena todo el Caribe hasta Centroamérica proveniente de un anticiclón cuyo centro se encuentra entre los departamentos de Magdalena y Atlántico. Inicialmente a las 15 UTC esta dorsal nace de un vórtice cerrado anticiclónico ubicado entre los departamentos de Sucre y Bolívar, y el cual para las 18 UTC se mueve hacia el NW en el área marítima y que finalmente este vórtice cerrado se transforma en un collado que se encuentra justo en frente del departamento del Magdalena.

Por lo anterior se puede decir que en las cartas de viento en los 3 niveles revisados no es posible determinar un patrón sinóptico definido por medio del cual se pueda identificar la convección profunda sobre el SKBO, por lo que se atribuye la presencia de

sistemas convectivos a las condiciones locales y se concluye que mediante el modelo numérico no se pudo observar este caso.

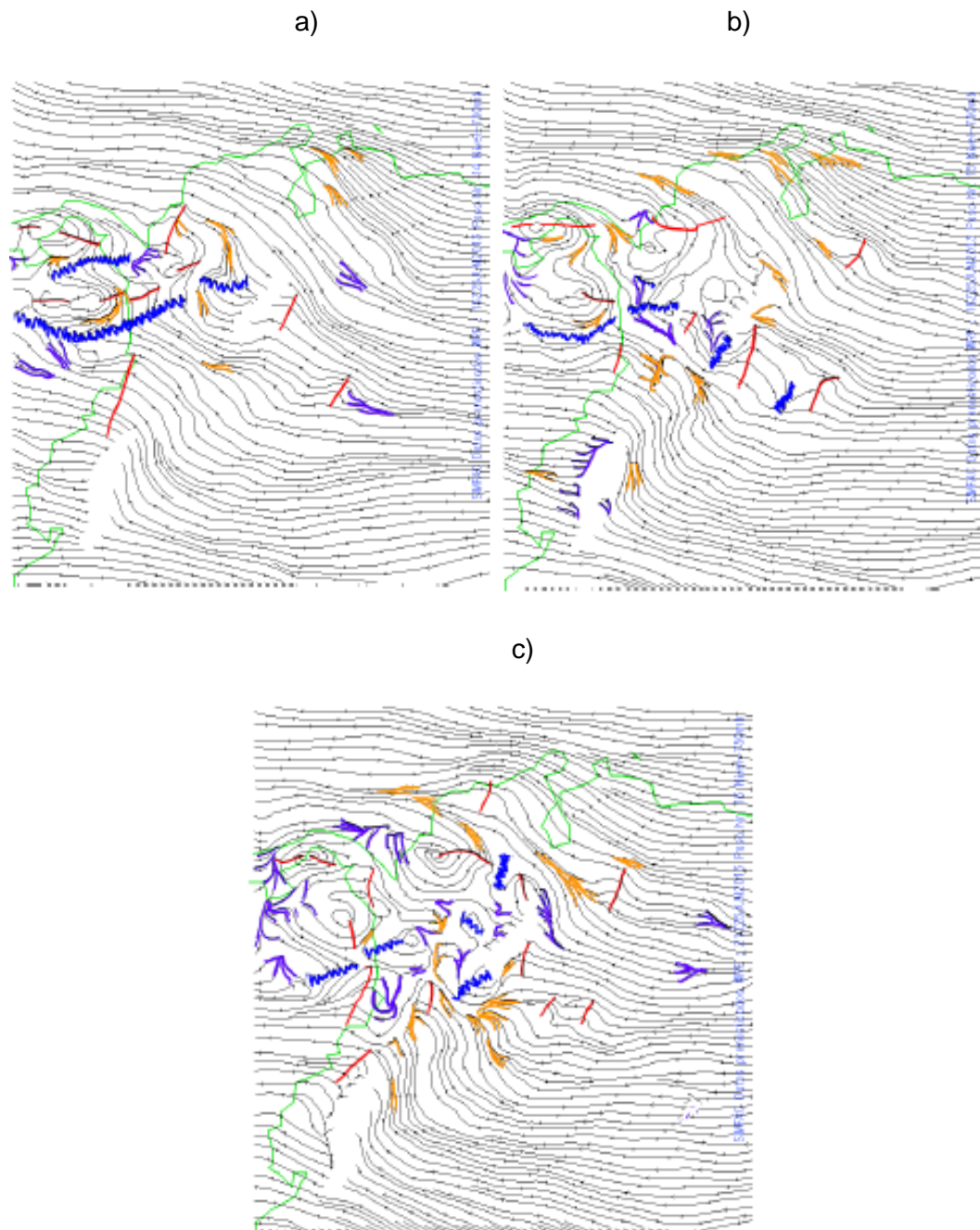


Figura 47: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 24 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 a las 15 UTC (a), 18 UTC (b) y 21 UTC (c)

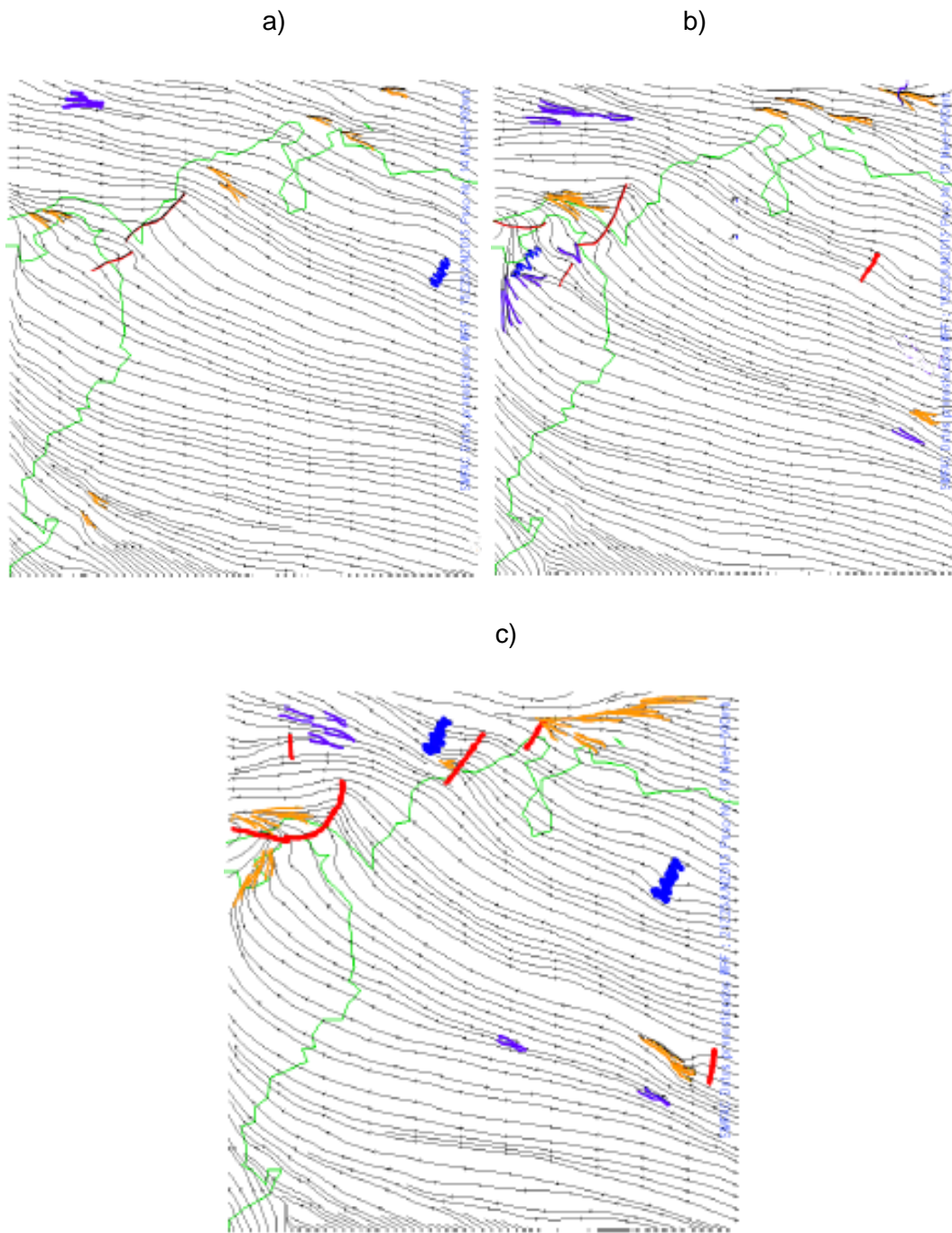


Figura 48: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 24 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 a las 15, 18, 21 UTC

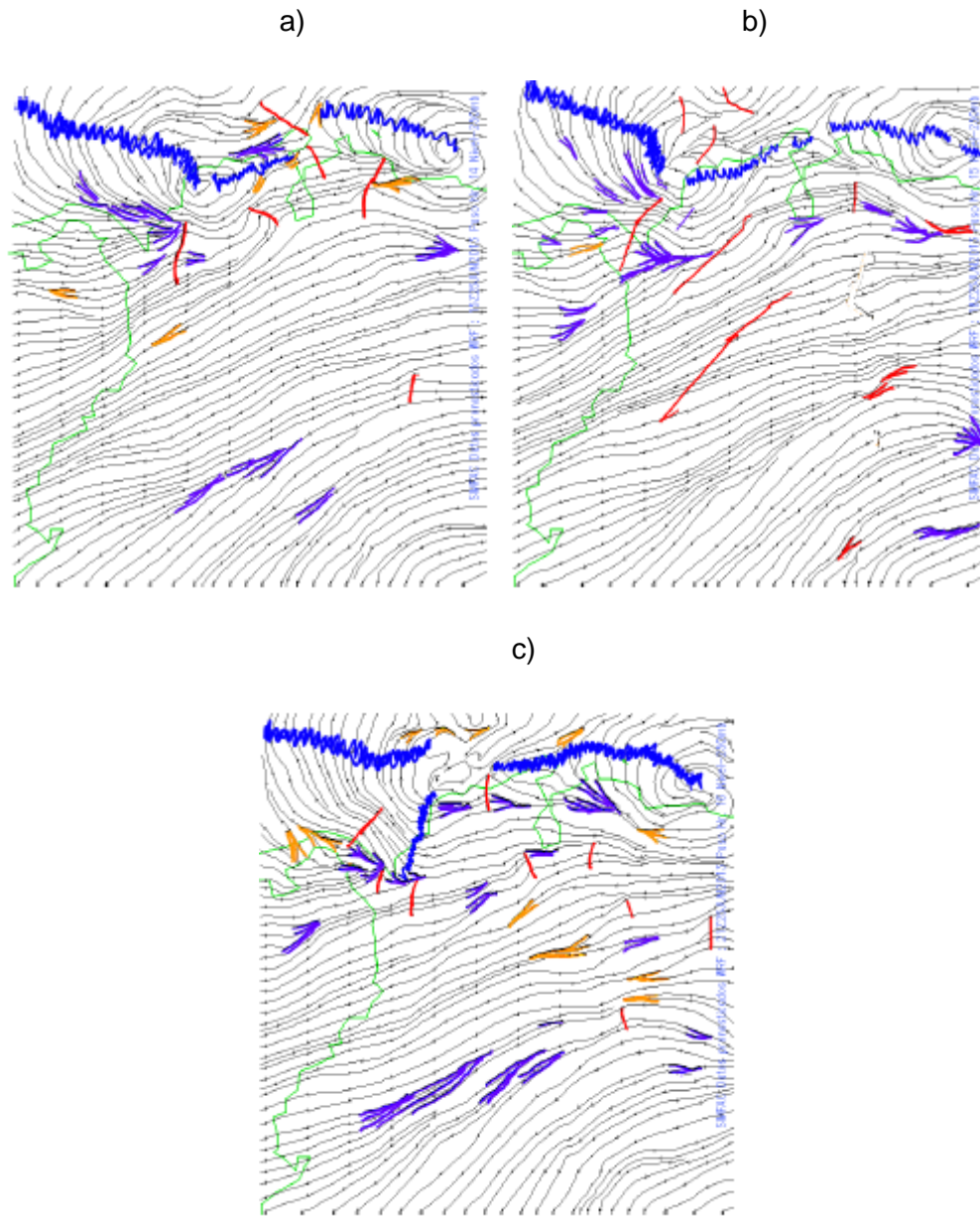


Figura 49: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 24 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 a las 15 UTC (a), 18 UTC (b) y 21 UTC (c)

Se intenta evaluar la competencia del modelo para pronosticar con 1 o 2 días de anticipación (ver Anexo E, Figuras 102 a 110) para ver si la respuesta del modelo es mejor que la simulación con hora inicial 00 UTC del día 24 de junio de 2013.

Se revisan las cartas de la simulación con hora inicial 00 UTC del 23 de junio de 2013, y se encuentra que en las cartas de los 750 mb se aprecia el flujo proveniente del SE hacia el NW en la carta de las 15 UTC se observa que hay una vaguada que alimenta este flujo y se encuentra sobre el departamento de Antioquia al norte. Sin embargo para las 18 UTC se vislumbra una formación ciclónica semicerrada a la altura del SKBO y la cual se trata de perder para las 21 UTC hora en la cual el flujo comienza a cambiar para provenir del S y dirigirse al N.

Ahora bien en las cartas de 500 mb el panorama es diferente donde el flujo proviene casi sin alteraciones sobre el SKBO de E a W y se desplaza de SE a NW en la carta de las 21 UTC. En estas cartas las únicas alteraciones se presentan al N de Colombia, más o menos a la altura de los Santanderes y en la región Caribe donde se aprecian unas vaguadas pequeñas que perduran durante los tres días observados.

También en las cartas de los 250 mb no se observa en ningún momento una perturbación del campo del viento sobre el SKBO, por el contrario estas alteraciones sólo se presentan hacia el NE y N del país al observarse movimientos ciclónicos en estas regiones que no afectan las condiciones meteorológicas del SKBO o al menos directamente, adicionalmente se observan unas grandes dorsales en el Caribe tanto E como W. Con lo cual se puede resumir que solo se puede apreciar algo de convección pero al parecer no de carácter profundo sobre las 18 UTC pero que no tiene al menos un gatillador en el campo de viento ni un apoyo de ventilación en las horas de la noche.

Respecto a las cartas de la simulación con hora inicial las 12 UTC del 23 de junio de 2013, se encuentra que en las cartas de los 750 mb se aprecia el flujo proveniente del SE al NW en entre las 15 y las 18 UTC del 25 de junio de 2013, moviéndose más hacia el N en las cartas de las 18 UTC y en adelante, alterándose más el campo de viento a medida que pasa el tiempo. Esto corresponde a la formación de un vórtice cerrado ciclónico en el área marítima al S de Panamá y el cual permanece durante todo el período de tiempo. Adicionalmente hay una vaguada que se manifiesta posterior a las 18 UTC a la altura de Boyacá y Casanare. Para las 21 UTC el panorama es diferente pues el flujo se encuentra mucho más alterado en el SKBO, se observa el flujo prácticamente del S al N y las vaguadas del pacifico y del oriente se agudizan alterando incluso el norte de la región Andina y toda la región Caribe.

En las cartas de los 500 mb el flujo transcurre sin alteración del SE al NW por el SKBO y por la mayor parte del país casi no se observan tendencias ciclónicas en el territorio continental, únicamente se ve una alteración importante sobre el área asociada con la Baja Anclada de Panamá, porque realmente casi no hay mayor diferencia entre las 3 cartas.

En las cartas de los 250 mb se puede observar el flujo de viento que proviene del NE al SW con una leve inclinación de dorsal sobre SKBO y en general en las cordilleras oriental y central; así mismo se pueden observar en las 3 cartas que la mayor alteración del campo del viento se encuentra en el norte de la región Pacífica y a lo largo de la región Caribe.

De esta corrida se puede concluir que no hay una señal clara de la presencia de sistemas convectivos en ninguno de los 3 niveles se observan alteraciones del campo de viento que lo indiquen. Sólo de interés en la carta de los 750 mb se encuentra un cambio de la dirección del viento sobre SKBO pero que no significa ni siquiera advección de humedad.

En las cartas de las 00 UTC del 24 de junio de 2013, se encuentra que en las cartas de los 750 mb se aprecia el flujo proveniente del E al W principalmente pero con unas importantes alteraciones en las cartas de las 18 UTC y de las 21 UTC de movimiento ciclónico que incluso crean una confluencia sobre el valle del Magdalena ingresando al sector del SKBO y perdurando durante las horas del evento favoreciendo la convección con advección de humedad desde el valle del Magdalena.

En las cartas de los 500 mb hay un flujo sin alteración del SE al NW por el SKBO y por la mayor parte del país casi no se observan tendencias ciclónicas en el territorio continental. Únicamente se ve una alteración importante sobre el área marítima del Golfo de Urabá y en general en la costa Caribe del país.

En las cartas de los 250 mb no se aprecia ninguna alteración en especial del campo de viento, lo particular es que el flujo se encuentra de NE a SW prácticamente sin modificación en el área continental del país, la única alteración significativa es un anticiclón ubicado en la región Caribe que se desplaza hacia el NW que se convirtió en un collado en el área marítima del Caribe Colombiano.

En conclusión esta corrida de las 00 UTC del día anterior al evento se aprecia una posibilidad de generarse sistemas convectivos sobre el área del SKBO debido especialmente a las condiciones de capas bajas en las que hay un movimiento ciclónico, aunque no con un claro gatillador en capas medias y no hay una clara ventilación en capas altas.

La corrida de las 12 UTC del 24 de junio de 2013 no se pudo recuperar de los archivos del backup del SIMFAC desafortunadamente.

De acuerdo a la sección temporal mostrada en la Figura 51 de la corrida de las 00 UTC del 25 de junio de 2013 se aprecia, una concentración significativa de humedad relativa en capas bajas entre las 17 UTC y las 21 UTC, pero no presencia de nubosidad excepto en capas altas pero ésta se ve que es sobrestimada por el modelo debido a la altura a la que la presenta. La dirección del viento en superficie varía con respecto a la columna de aire superior, en este caso proviene del suroeste proveniente de los 200° aproximadamente con una intensidad de 5 KT y posteriormente a los 265° aproximadamente con la misma intensidad, con lo cual se confirma que el modelo si observa el cambio de dirección del viento e intensidad característicos de la presencia de nubes de desarrollo vertical.

Así mismo se realizó el mismo análisis con las secciones temporales de los dos días anteriores a través de Figuras similares a la 112 las cuales se pueden apreciar en el Anexo al final del documento (Figuras 112 a 114). En todas las corridas es clara la concentración de humedad en capas bajas y en la mayoría presencia de nubosidad cumuliforme en estos mismos niveles, pero no se encontraban en ninguna de las corridas señales de nubosidad de desarrollo vertical siendo las 3 corridas estudiadas muy similares, la que más se acerca a un correcto pronóstico de sistemas convectivos en el SKBO es la corrida de las 00 UTC del día 24 de junio de 2013 en la que se aprecia una columna de nubosidad más amplia a la de las demás y donde la presencia de humedad relativa es significativa.

Así mismo se analizaron las cartas de precipitación acumulada en lapsos de 3 horas con el fin de observar la respuesta en esta variable las cuales pueden ser consultadas en el Anexo al final del documento (Figuras 115 a 118), en las cuales se aprecia que en el sector del SKBO se presenta un máximo de precipitación de 10 mm acumulados

para el lapso de las 18 a 21 UTC del día 25 de junio de 2013, y que en general todas las cartas de las 15 UTC representaban condiciones meteorológicas secas a lo largo del territorio nacional. La mejor respuesta entre las corridas de los dos días anteriores es la que se encuentra en la precipitación acumulada mostrada en la corrida de las 00 UTC del 24 de junio de 2013 de 18 UTC a 21 UTC puesto que es la más alta para el sector del SKBO.

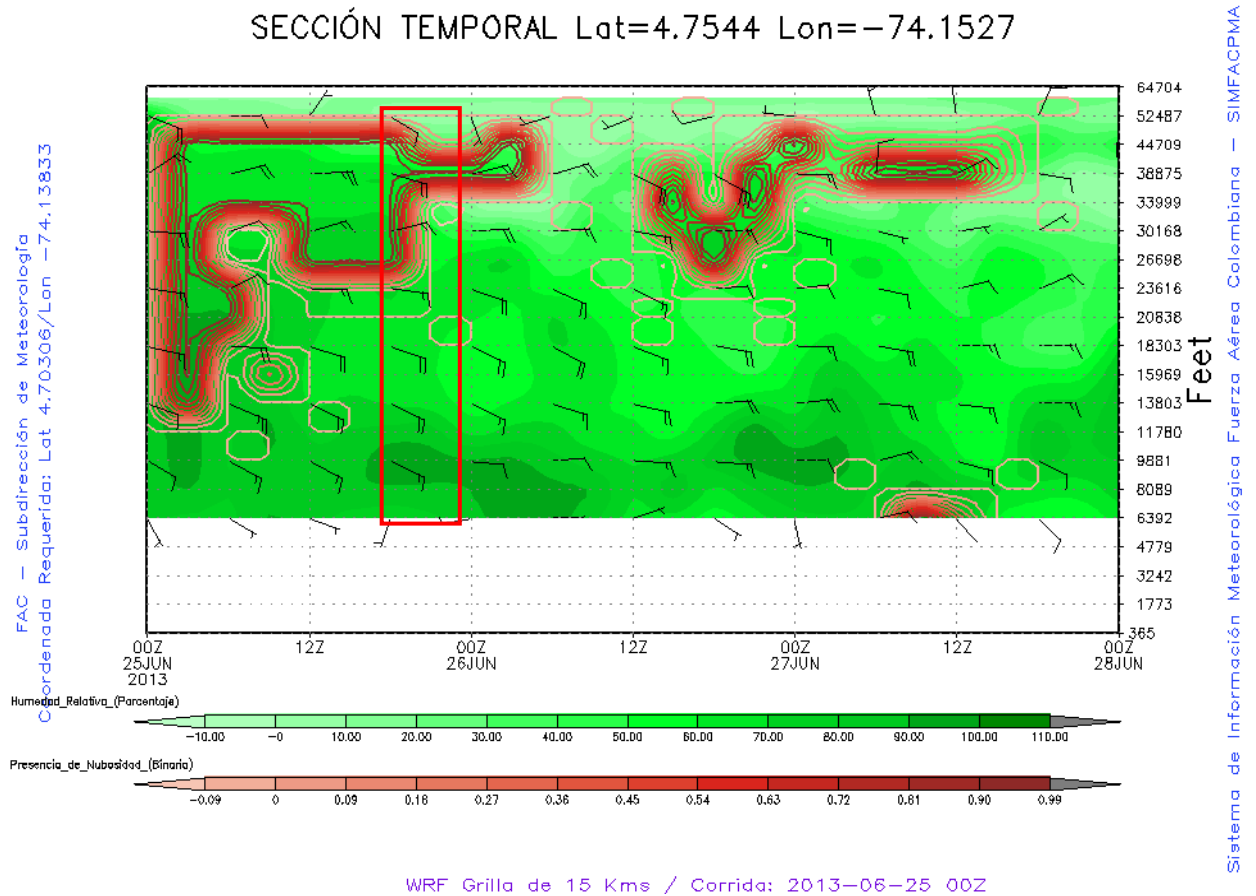


Figura 50: Sección temporal del SKBO de la corrida del 25 de junio de 2013 a las 00 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Se concluye que los sistemas convectivos en Bogotá se presentan con frecuencia en SKBO, especialmente en horas de la tarde y en los meses en los que se encuentra la ZCIT sobre el centro de Colombia. Esto es parcialmente consistente con los resultados de Montoya y Eslava (2000), aunque se debe hacer la consideración de que en el presente estudio se tuvo en cuenta información de tormentas eléctricas (TS) y las nubes de desarrollo vertical Torrecúmulos (TCU) y Cumulonimbus (CB), mientras que ellos sólo consideraron información de tormentas (TS).

Las características con las que se presentan los sistemas convectivos sobre el Aeropuerto Internacional El Dorado son: La duración de los eventos está entre menos de 1 hora y 9 horas, la duración más frecuente es de 1 a 2 horas.

Los bimestres mes con mayor número de eventos son octubre-noviembre seguido de abril – mayo, el mes en que más eventos hubo fue noviembre y el mes con menos número de eventos es el mes de junio, seguido de julio.

De los años analizados, el año con mayor número de eventos es el 2011-2012 con 235 eventos, de 611 en total. El año con menor número de eventos es 2012-2013 con 183 eventos de 611. La hora del día con mayor número de eventos son las 20:00 UTC o 15:00 HLC dentro del lapso con mayor frecuencia que es entre las 16:00 UTC o 11:00 HLC hasta las 01 UTC o 20:00 HLC del siguiente día y las horas del día en las que no se presentó ningún evento fueron las 09:00 UTC (04:00 HLC) y 09:00 UTC (08:00UTC). Se tiene la sensación que el fenómeno ENSO tiene influencia en el aumento del número de eventos que se presentaron en la fase positiva La Niña, porque se observó un aumento significativo en el número de eventos reportados. Esto sucedió en el segundo semestre del año 2011. Para que se compruebe con contundencia esta última apreciación se requeriría incorporar al estudio más años de estudio.

Las condiciones meteorológicas bajo las cuales se presentan se pueden describir a través de los reportes horarios METAR y SPECI del aeródromo y se puede apreciar que en presencia de los sistemas convectivos se presentan comportamientos especiales en el campo de viento (tanto dirección como intensidad) y presión característicos de los eventos convectivos y que se pudieron apreciar a través de los casos de estudio.

Uno de los patrones significativos se presenta en el campo de viento, puesto que en presencia generalmente de viento del W, NW o SW es cuando se presentan los sistemas convectivos. Esto también es consistente parcialmente con los resultados de Montoya y Eslava (2000) aunque teniendo en cuenta la consideración mencionada antes en el primer párrafo de esta página. Estos vientos se atribuyen a la advección de humedad de lugares más húmedos y que al entrar en contacto con la superficie de pavimento el cual crea convección por radiación (isla de calor por calentamiento y la convección) producida por la ciudad hacen que se favorezca la convección de manera rápida.

La mayoría de los eventos convectivos ocurre en presencia de intensidades del viento superiores a los 5 KT (entre 6KT y 12KT) y a medida que los sistemas convectivos transcurren en fases avanzadas este tiende a aumentar.

En el campo de presión la condición propicia para la formación de los sistemas convectivos es la identificación de la disminución paulatina de los valores del QNH en los reportes METAR y SPECI de SKBO.

A pesar de contar con pocos casos de estudio se puede decir que el modelo WRF versión 2.1.1 de la FAC es capaz de representar la realidad y de apreciar la formación de sistemas convectivos en SKBO especialmente aquellos que se presentan en la mesoescala y en menor medida los que son de escala local.

Las corridas del modelo de los casos de estudio revisadas que mejor aprecian los sistemas convectivos en SKBO en los casos de estudios vistos son del día anterior al evento, aproximadamente 24 horas antes o 36 horas antes (las simulaciones que inician a las 12 UTC del día anterior). En cambio los más lejanos a la realidad son los que se presentan con mayor anterioridad al evento, es decir de 48 horas o más.

El desempeño del modelo WRF de la FAC para los casos de estudio en la variable viento tanto en su magnitud como en su dirección fue cercano a la realidad, a pesar de no ser exacto si se puede ver que es capaz de ver los cambios de viento que se presentan en el flujo de los alisios en los eventos convectivos, la mayor cantidad de las veces.

El desempeño del modelo WRF de la FAC para los casos de estudio en la variable humedad relativa presenta algunos problemas en cuanto a la graficación de ella en el portal, puesto que muestra valores superiores a 100% que no corresponden a la realidad, adicionalmente está mostrando demasiada humedad en capas medias-altas y altas que no debería ser, sin embargo en capas bajas y medias-bajas si se comporta de acuerdo a lo esperado.

El desempeño del modelo WRF de la FAC para los casos de estudio en la variable presencia de nubes, no se comporta de acuerdo a la realidad, puesto que el modelo la sobreestima en capas medias-altas y altas, siempre exagerando la presencia de nubosidad en este sector cuando realmente no es así, tampoco es capaz de pronosticar las nubes de desarrollo vertical como se esperaba en todas las ocasiones.

El desempeño del modelo WRF de la FAC para los casos de estudio en la variable precipitación acumulada cada 3 horas, se puede decir que se comporta de acuerdo a la realidad, sin embargo parece subestimar la precipitación de carácter local porque esta dispersando mucho los valores en el territorio en vez de concentrarlos o geolocalizarlos de forma puntual.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda usar otros juegos de datos que permitan alimentar el análisis en la escala local como por ejemplo los provenientes de los radares meteorológicos o analizar las salidas de modelos de escala local que puedan aportar más a la investigación con la circulación local o microfísica de los sistemas convectivos, al enriquecer el análisis efectuado a los reportes METAR y SPECI, las cartas de superficie, las imágenes de satélite.

Se recomienda hacer estudios como el presente con más modelos de mesoescala que permitan efectuar una comparación. También se pueden hacer unos ajustes en la configuración del modelo WRF 2.1 como el uso de parametrizaciones diferentes o la inclusión de rejillas de otra resolución espacial para disminuir la distancia y ver mejor la escala local.

Se sugiere utilizar otras metodologías para aumentar los conocimientos sobre los sistemas convectivos que se presentan en el SKBO con el fin de contribuir al pronóstico de los mismos y mejorar la seguridad aérea en el aeródromo.

Se sugiere realizar modificaciones a los scripts operacionales del SIMFAC con el fin de corregir errores de presentación de los productos para la estandarización y un mejor aprovechamiento de las corridas del modelo WRF, como herramienta fundamental para el pronóstico.

A. Anexos: Reportes metar y SPECI de los episodios

- Episodio 22 de Abril de 2014

SKBO 221500Z VRB02KT 9999 BKN020 SCT080 16/10 A3036

SKBO 221600Z 31006KT 9999 BKN020 SCT080 17/10 A3035

SKBO 221700Z 28004KT 9999 BKN020 SCT080 17/11 A3032

SKBO 221720Z 32003KT 8000 -DZ BKN020 SCT080 17/13 A3030

SKBO 221800Z VRB02KT 8000 -DZ SCT020 SCT080 16/12 A3029

SKBO 221835Z 26008KT 8000 -TSRA FEW017CB SCT020 SCT080 16/13 A3027 RMK
CB/SE

SKBO 221900Z 26010KT 8000 -TSRA FEW017CB SCT020 SCT080 16/13 A3027 RMK
CB/SE

SKBO 221915Z 20016KT 1000 +TSRA FEW017CB BKN020 14/13 A3027 RMK
CB/NW/E AD BLW MNM MET

SKBO 222000Z VRB02KT 3000 TSRA FEW017CB SCT020 BKN070 12/11 A3027 RMK
CB/NW/E

SKBO 222100Z VRB02KT 9999 4000NW TSRA FEW017CB SCT020 SCT070 12/11
A3026 RMK CB/W

SKBO 222200Z VRB02KT 8000 DZ SCT020 BKN070 13/12 A3026 RETSRA

- Episodio 22 de Noviembre de 2011

SKBO 221100Z 04003KT 9999 FEW017 BKN060 11/10 A3028 NOSIG=

SKBO 221200Z VRB02KT 7000 FEW017 BKN070 12/11 A3032 REDZ NOSIG RMK HZ=

SKBO 221300Z 05003KT 7000 FEW017 BKN070 13/11 A3034

SKBO 221400Z VRB02KT 8000 SCT017 BKN080 16/11 A3035 NOSIG RMK HZ=

SKBO 221500Z 25003KT 9000 SCT020TCU BKN080 16/11 A3035 NOSIG RMK HZ

SKBO 221600Z 05005KT 9999 SCT020TCU BKN070 16/11 A3033 NOSIG

SKBO 221700Z 05005KT 9999 -RA FEW015CB BKN017 15/11 A3031 NOSIG RMK CB/NW
LTNG/NW

SKBO 221800Z 32008KT 9999 VCSH FEW015CB BKN017 15/12 A3027 RERA NOSIG RMK
CB/NW VCSH/NW/S

SKBO 221900Z 32005KT 9999 VCSH FEW015TCU BKN017 16/13 A3023 NOSIG RMK VCSH/S

SKBO 222000Z 26006KT 9999 VCSH FEW015TCU BKN017 17/14 A3021 NOSIG RMK VCSH/S

SKBO 222100Z 26003KT 9999 8000SE TSRA SCT015CB SCT017 16/11 A3020 NOSIG RMK
CB/SE

SKBO 222200Z 25004KT 9999 5000W TSRA SCT015CB SCT017 15/13 A3022 RERA NOSIG
RMK CB/W/NW

SKBO 222300Z 24005KT 6000 -DZ BKN015TCU 14/12 A3024 RETS NOSIG

SKBO 230000Z 26010KT 9999 -DZ BKN015 13/12 A3028

SKBO 230100Z 28010KT 8000 -TSRA SCT015CB SCT017 12/11 A3033 NOSIG RMK/CB NE/E

- Episodio 25 de Junio de 2013

SKBO 251200Z 06006KT 9999 SCT020 BKN080 12/10 A3039
SKBO 251300Z 32003KT 9999 SCT020 BKN080 13/10 A3040
SKBO 251400Z 05004KT 9999 SCT020 BKN080 15/10 A3034
SKBO 251500Z 35004KT 9999 VCSH BKN020 16/10 A3041 RMK VCSH/S
SKBO 251600Z 33006KT 9999 VCSH SCT020 SCT200 19/10 A3039 RMK VCSH/SE
SKBO 251700Z 24008KT 9999 SCT020 SCT025TCU 18/09 A3038 RMK TCU/N
SKBO 251800Z 21011KT 9999 SCT020TCU 19/09 A3034 RMK TCU/E
SKBO 251900Z 28007KT 9999 SCT020TCU 20/09 A3031 RMK TCU/SE
SKBO 252000Z 23015KT 9999 RA FEW020TCU BKN023 17/13 A3029 RMK TCU/N
SKBO 252100Z 33008KT 8000 VCSH BKN017 13/11 A3030 RETSRA RMK VCSH/NW

B. Anexos: Imágenes de satélite

- Caso del 22 de abril de 2014:

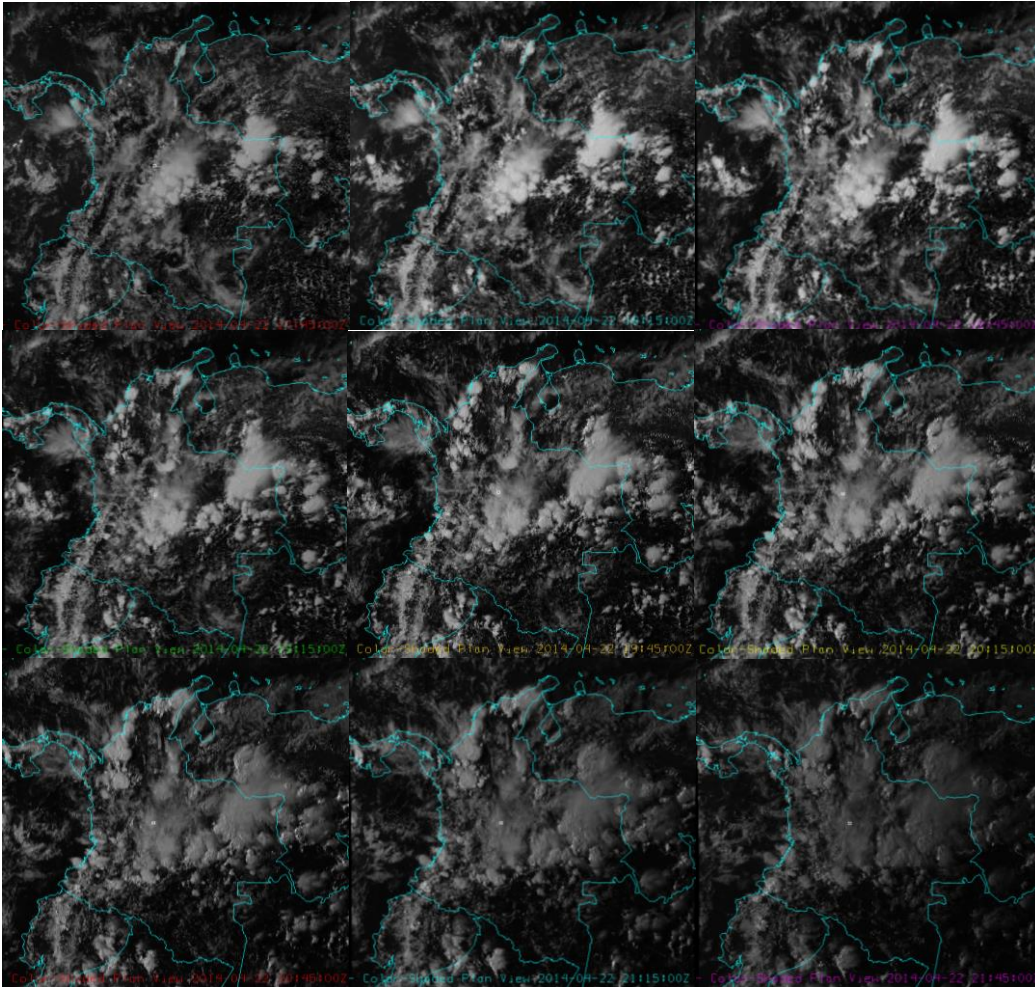


Figura 51: Imágenes de satélite del canal visible desde las 18:15 UTC hasta las 22:15 UTC del 22 de abril de 2014

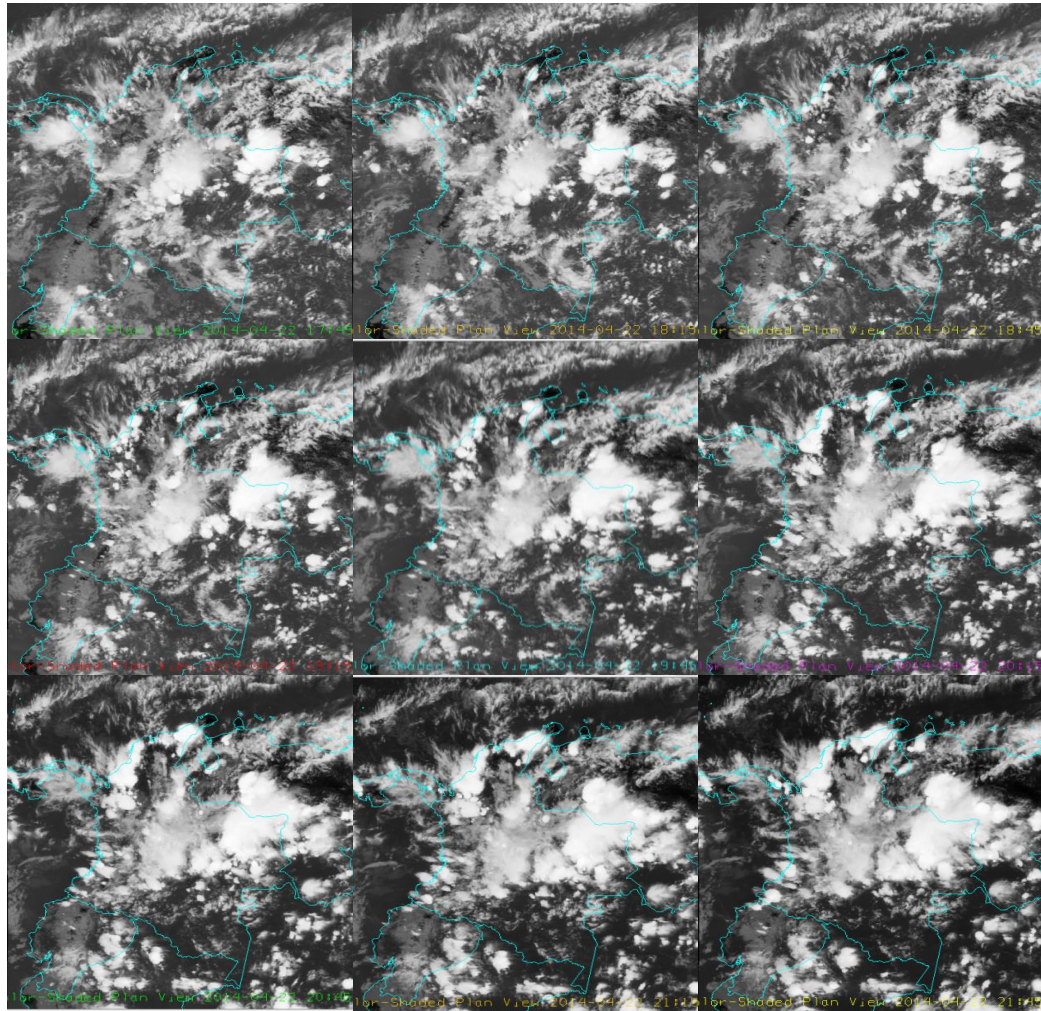


Figura 52: Imágenes de satélite del canal infrarrojo desde las 18:15 UTC hasta las 22:15 UTC del 22 de abril de 2014

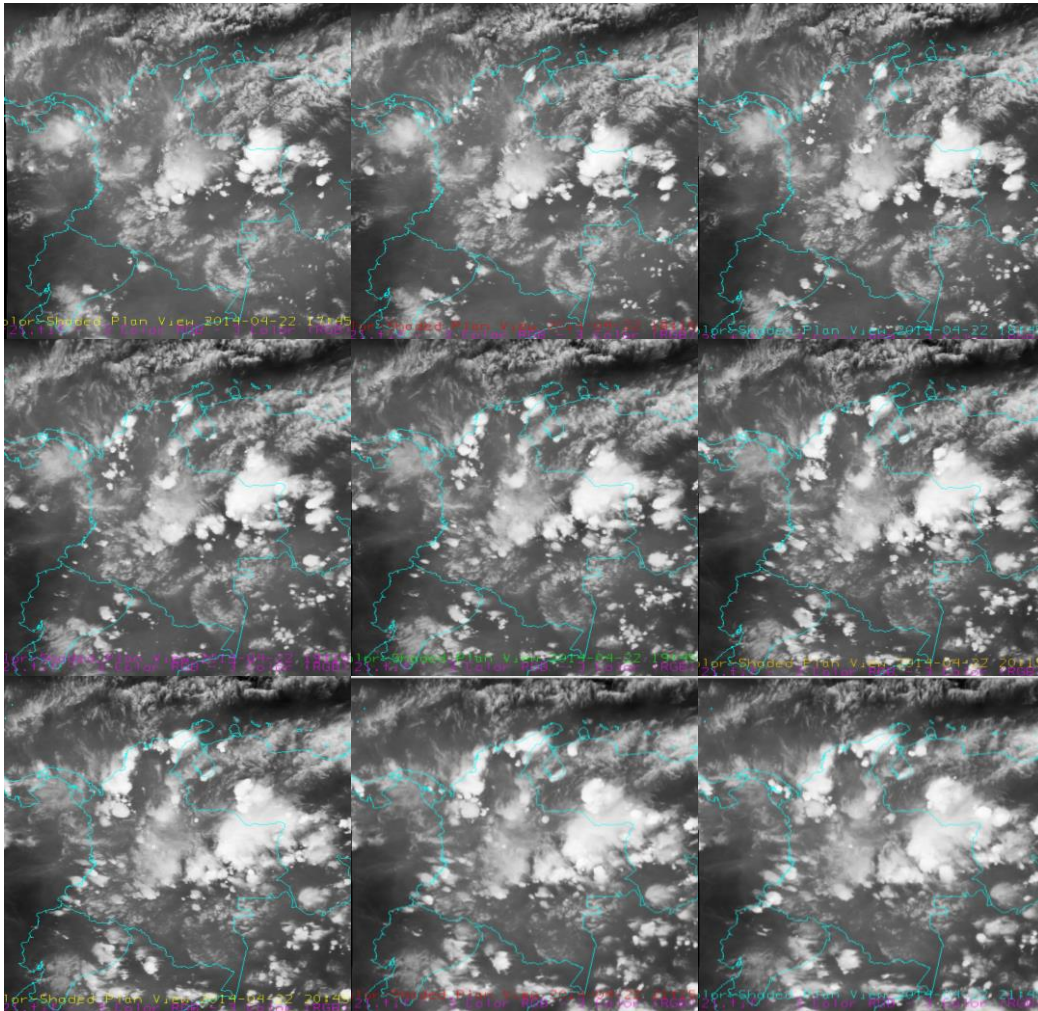
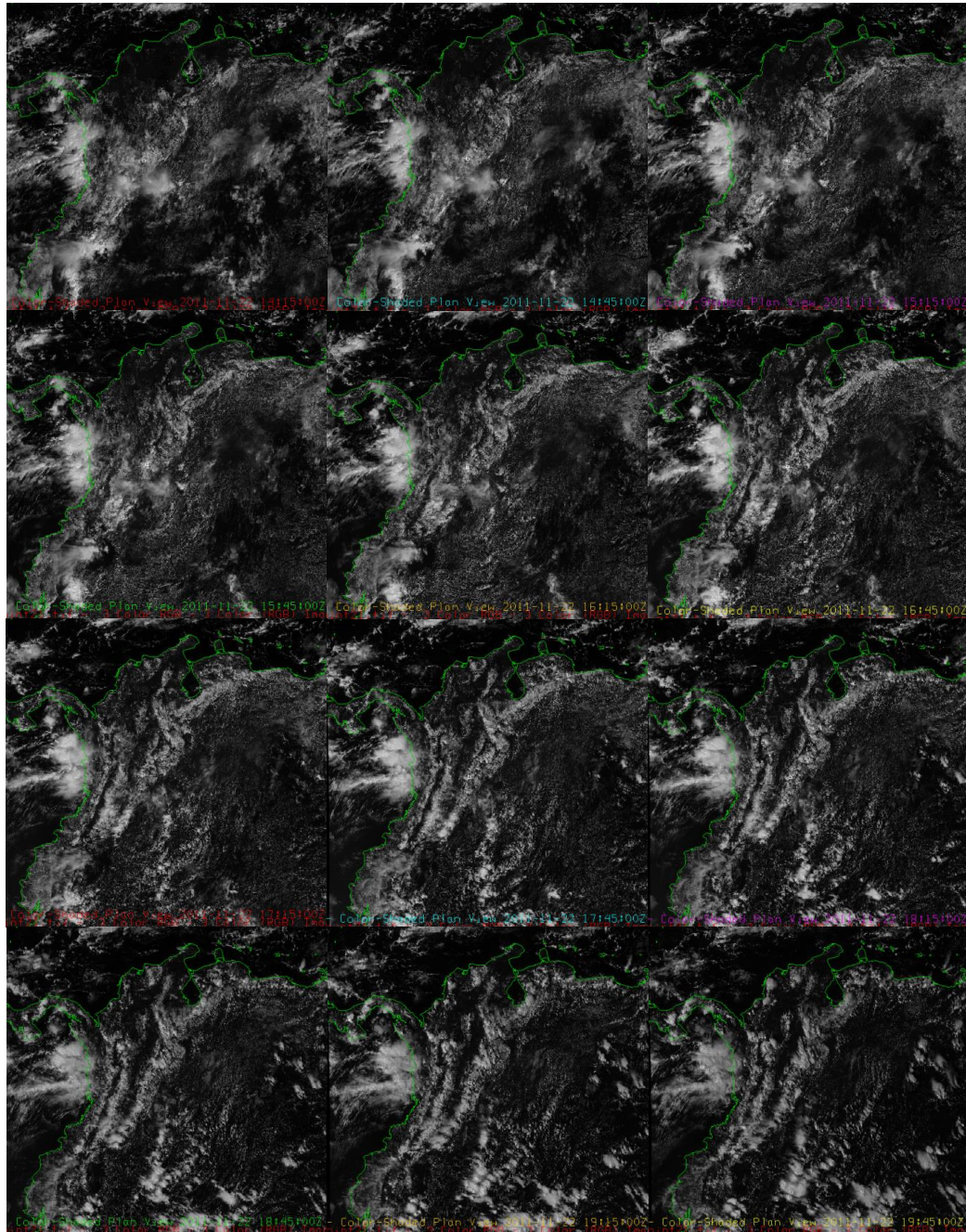


Figura 53: Imágenes de satélite del canal vapor de agua desde las 18:15 UTC hasta las 22:15 UTC del 22 de abril de 2014

- **Caso del 22 de noviembre de 2011**



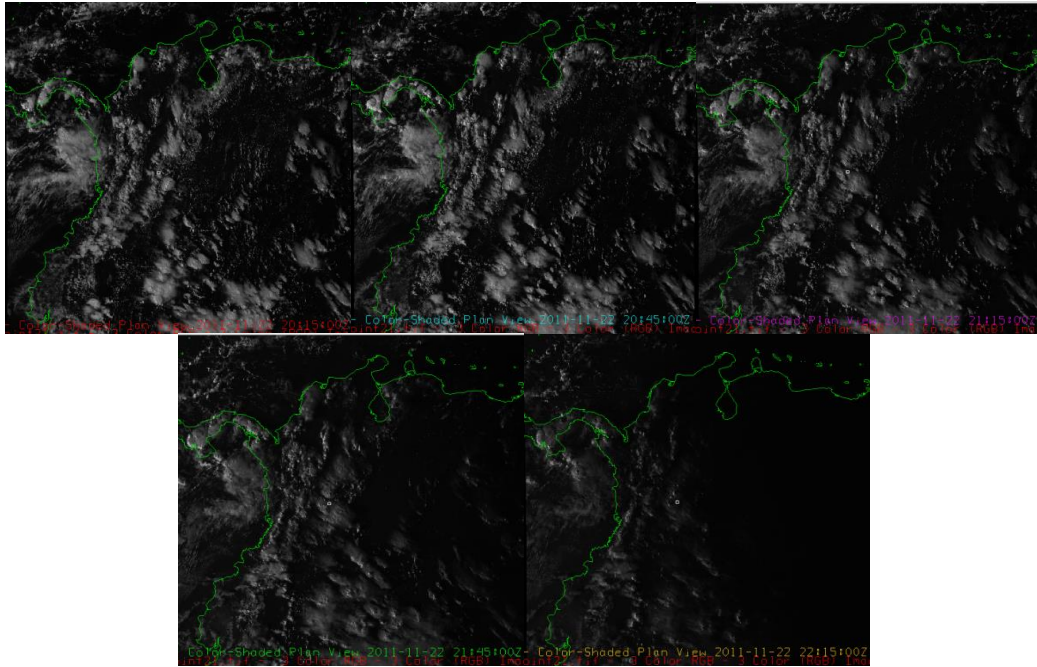
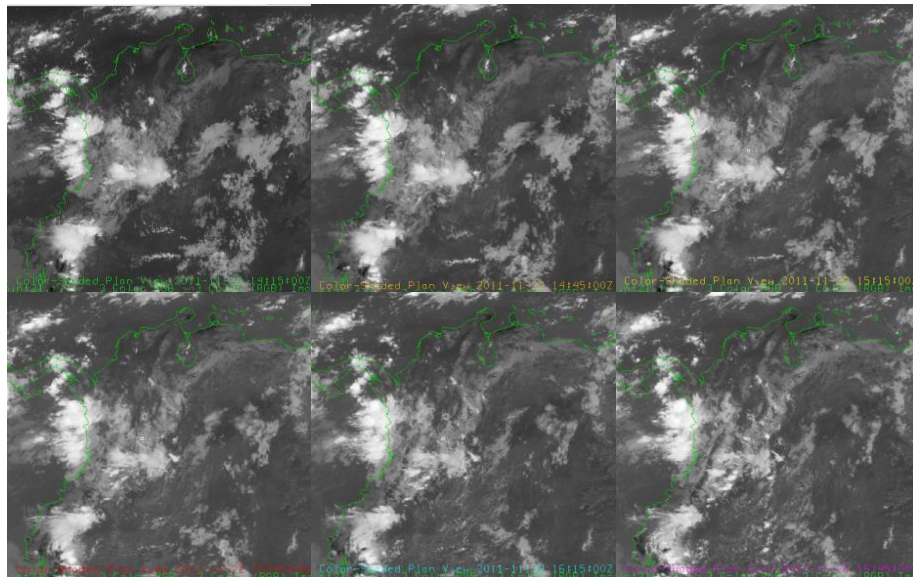
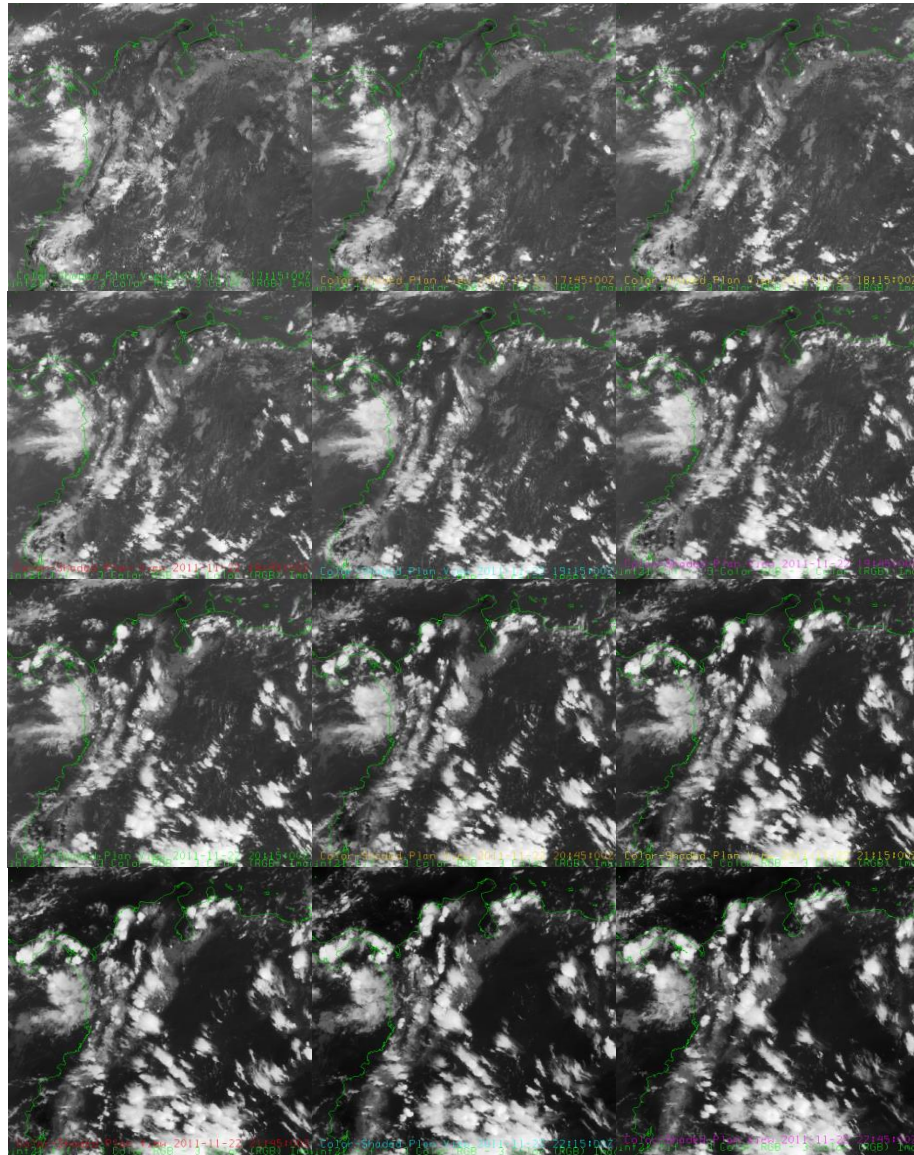


Figura 54: Imágenes de satélite del canal visible desde las 14:15 UTC hasta las 22:15 UTC del 22 de noviembre de 2011





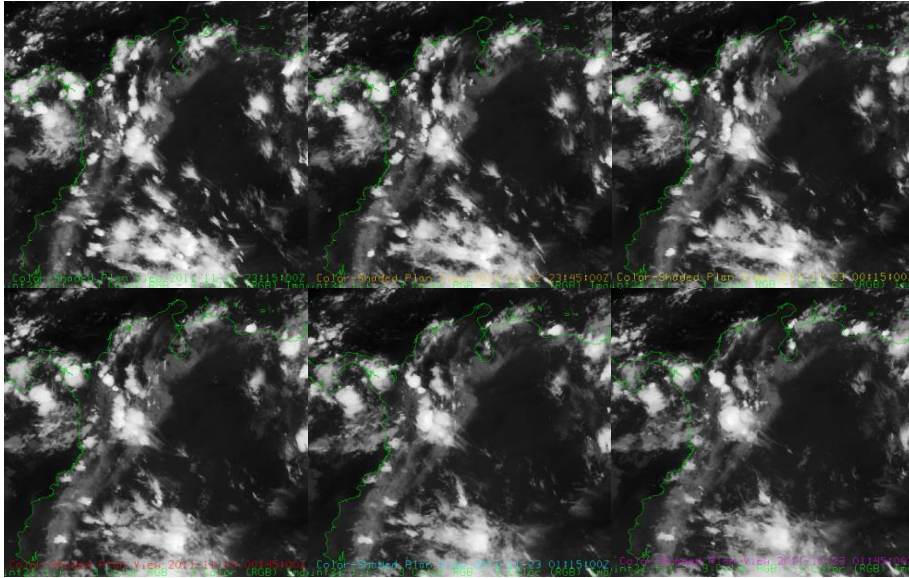
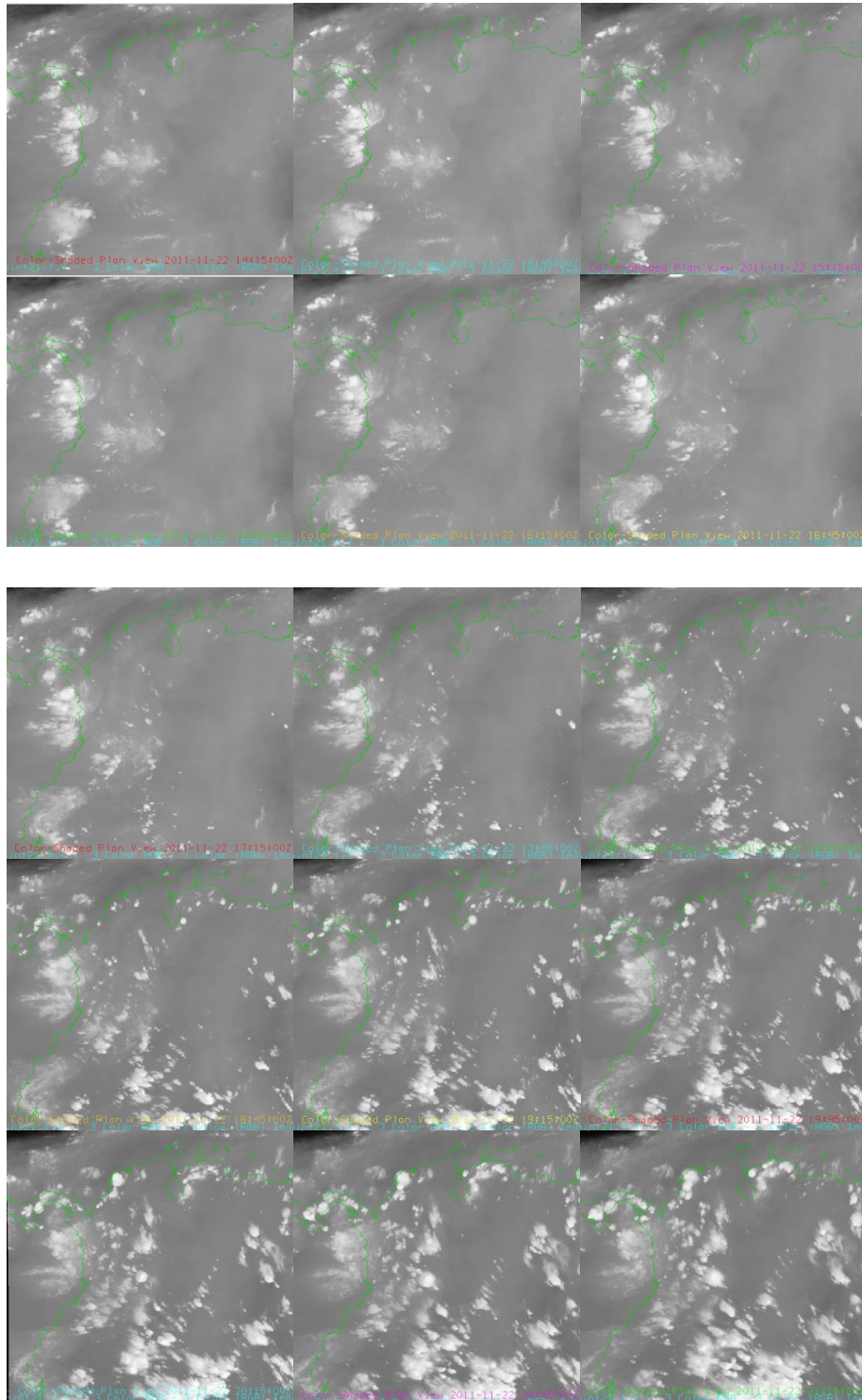


Figura 55: Imágenes de satélite del canal infrarrojo desde las 14:15 UTC del 22 de noviembre de 2011 hasta las 01:45 UTC del 23 de noviembre de 2011



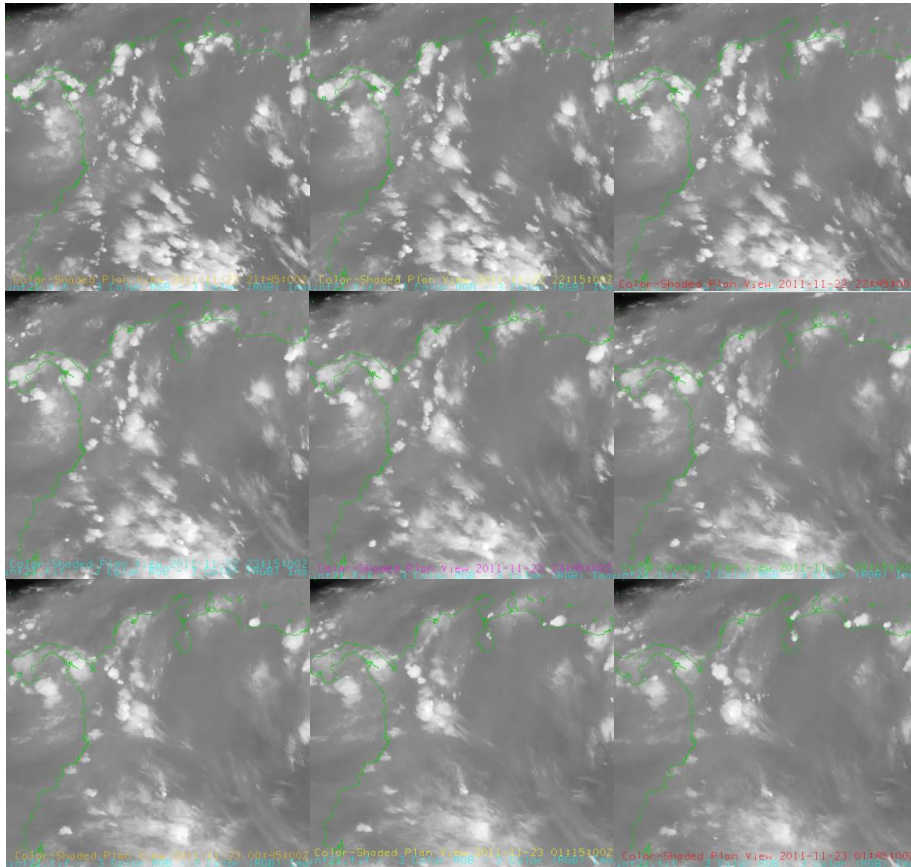


Figura 56: Imágenes de satélite del canal vapor de agua desde las 14:15 UTC del 22 de noviembre de 2011 hasta las 01:45 UTC del 23 de noviembre de 2011

CASO DEL 25 DE JUNIO DE 2013

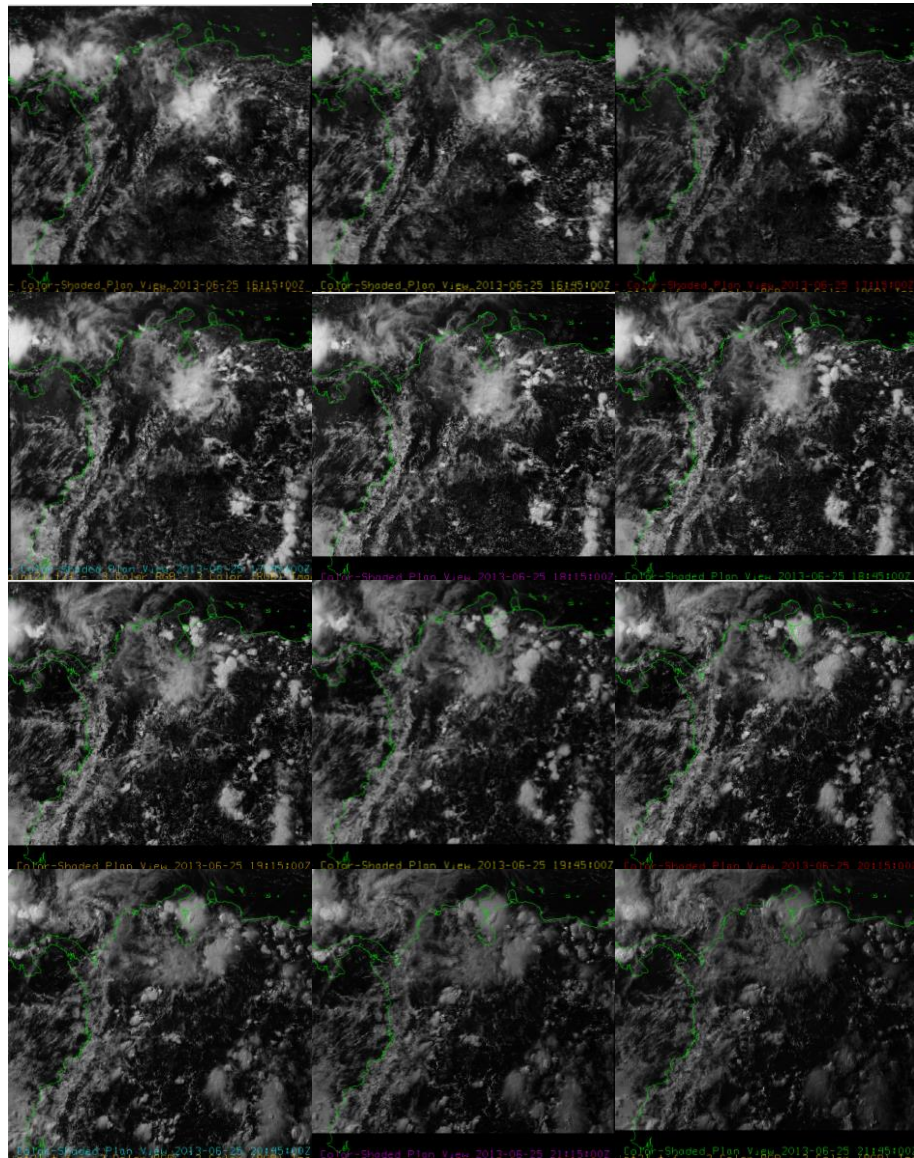


Figura 57: Imágenes de satélite del canal visible desde las 16:15 UTC hasta las 21:45 UTC del 25 de junio de 2014

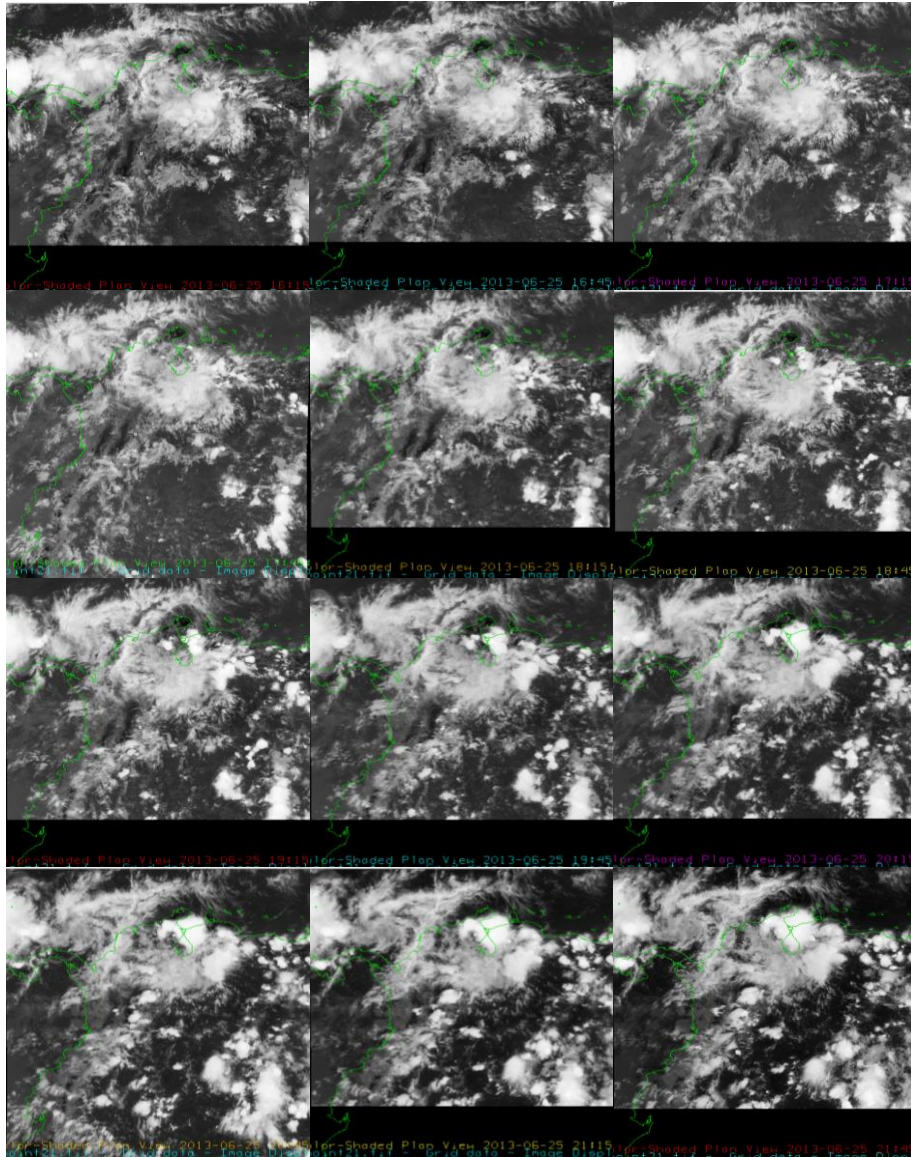


Figura 58: Imágenes de satélite del canal infrarrojo desde las 16:15 UTC hasta las 21:45 UTC del 25 de junio de 2014

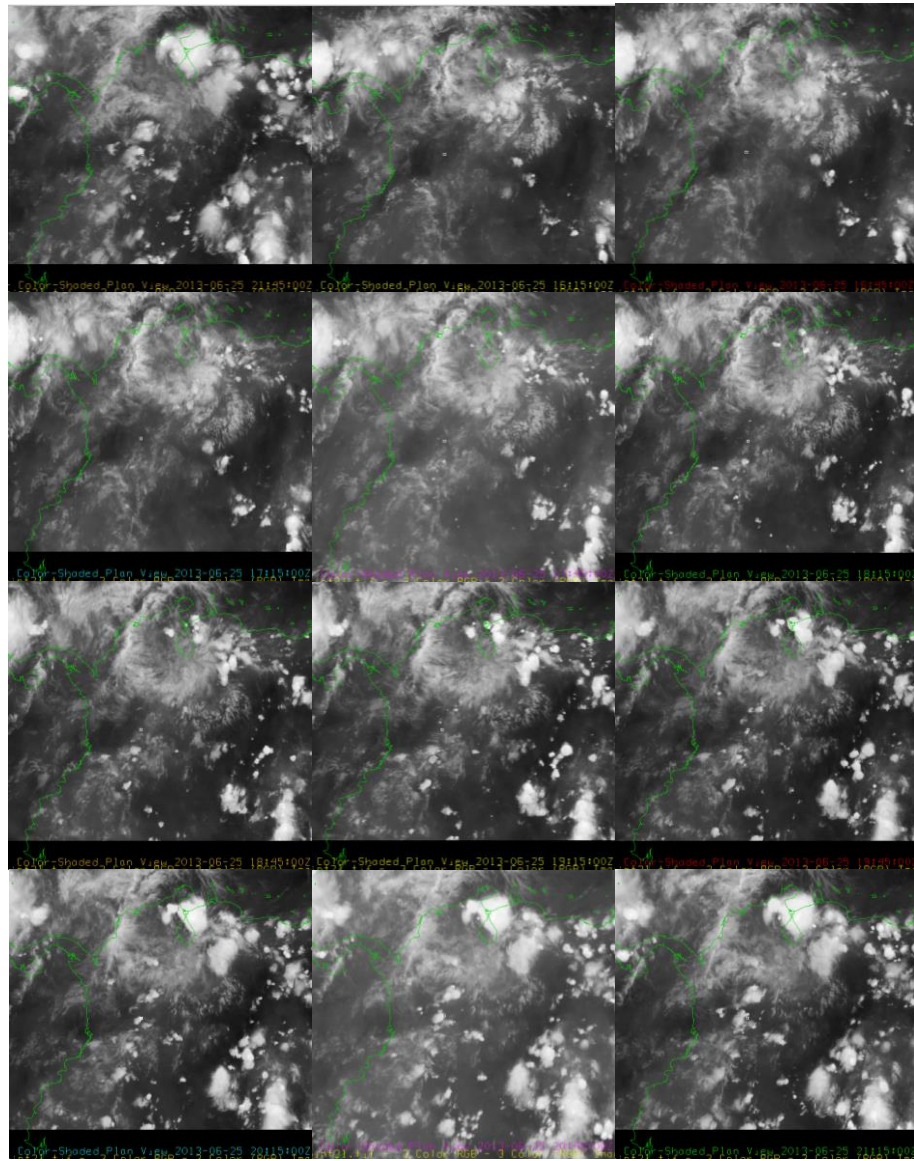
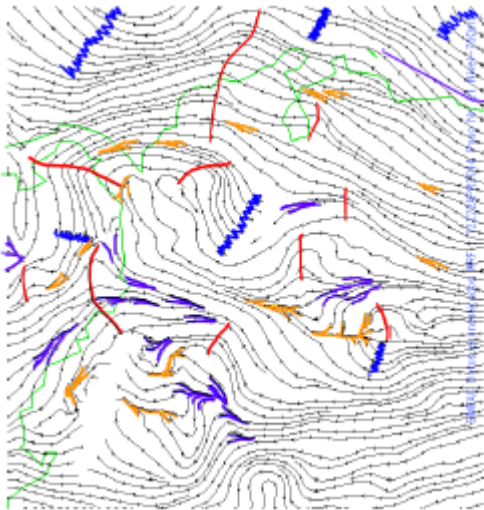


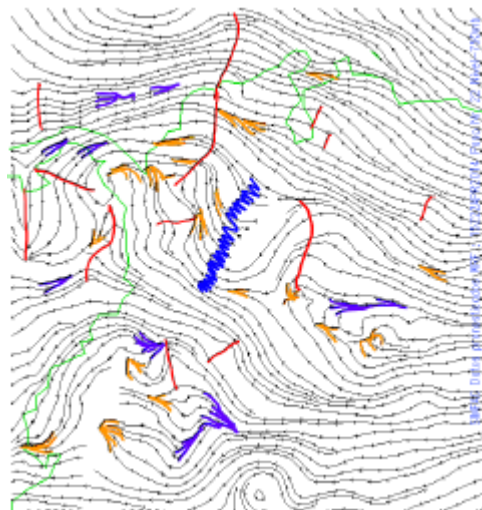
Figura 59: Imágenes de satélite del canal vapor de agua desde las 16:15 UTC hasta las 21:45 UTC del 25 junio de 2014

C. Anexos: Corridas del modelo WRF 2.1.1 para el primer caso del 22 de abril de 2014

a)



b)



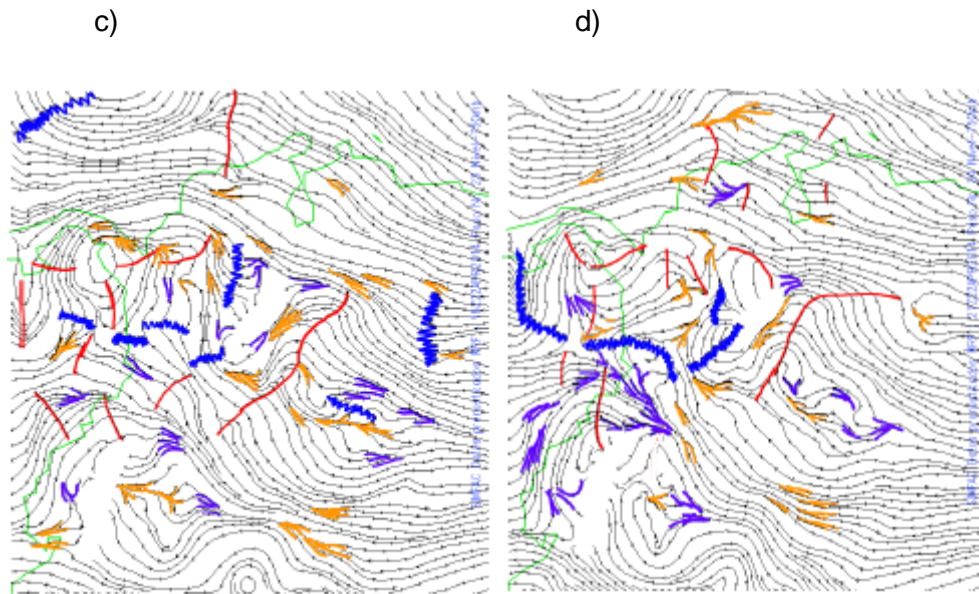


Figura 60: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 20 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12, 15, 18 y 21 UTC

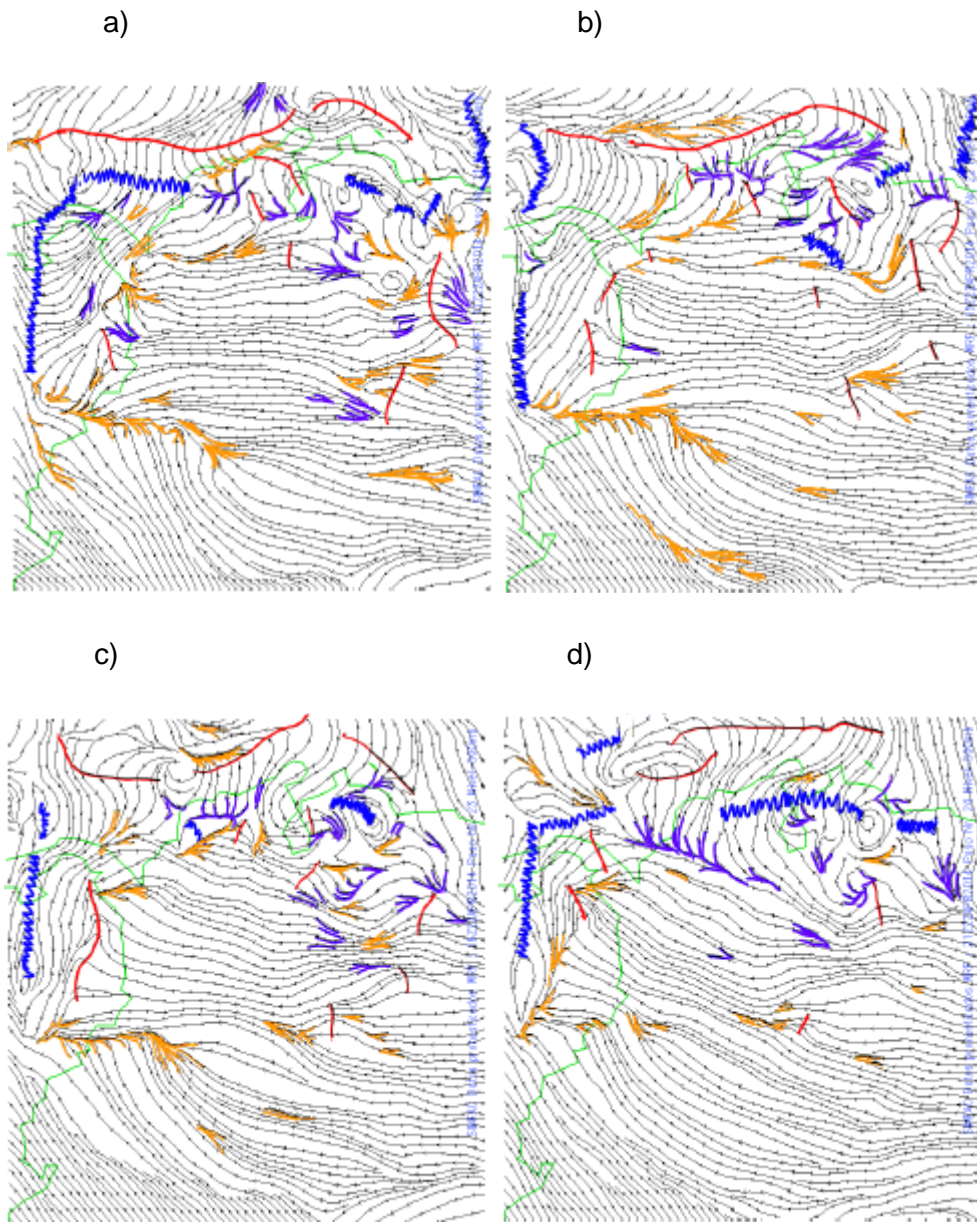


Figura 61: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 20 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12, 15, 18 y 21 UTC

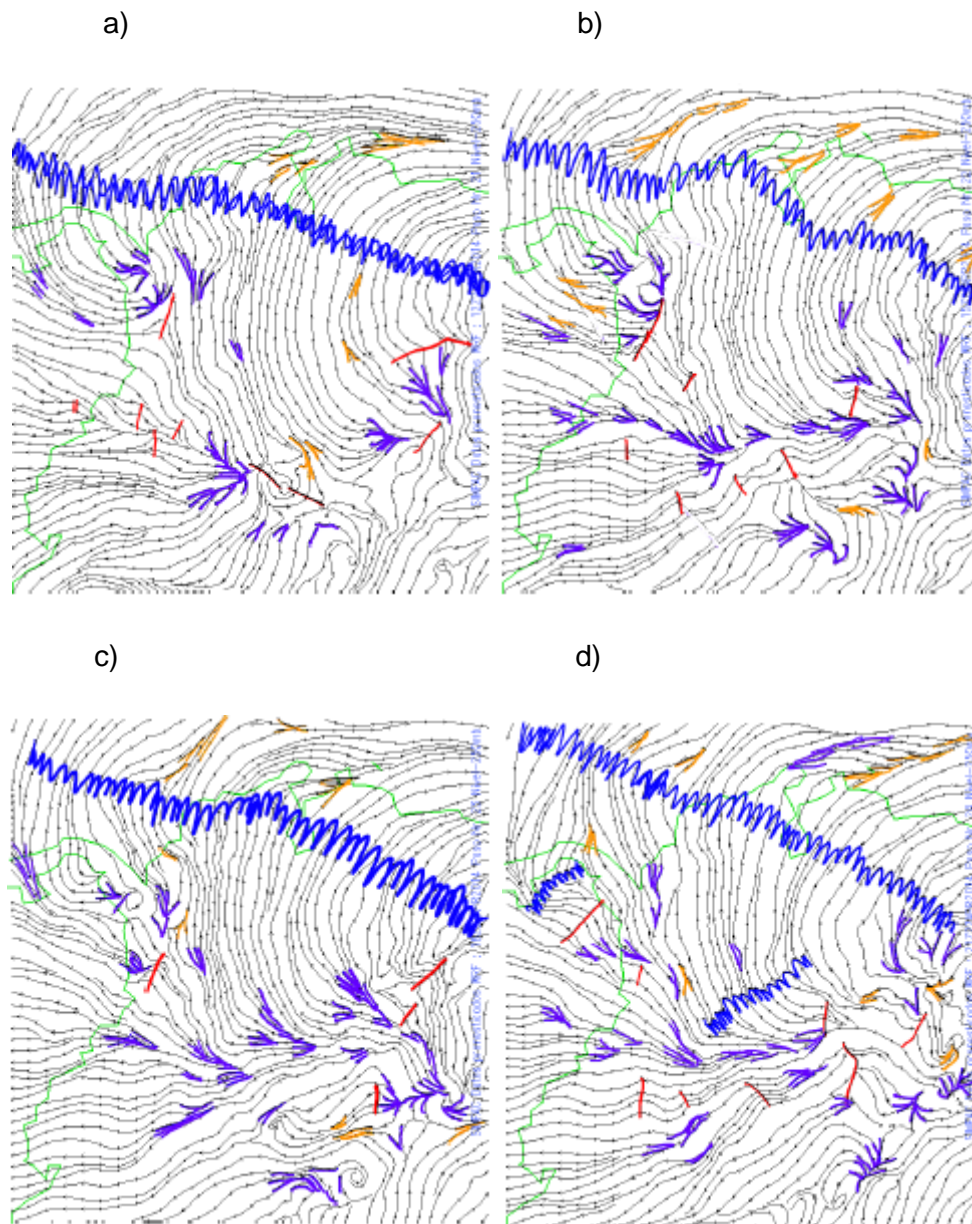


Figura 62: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 20 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12, 15, 18 y 21 UTC

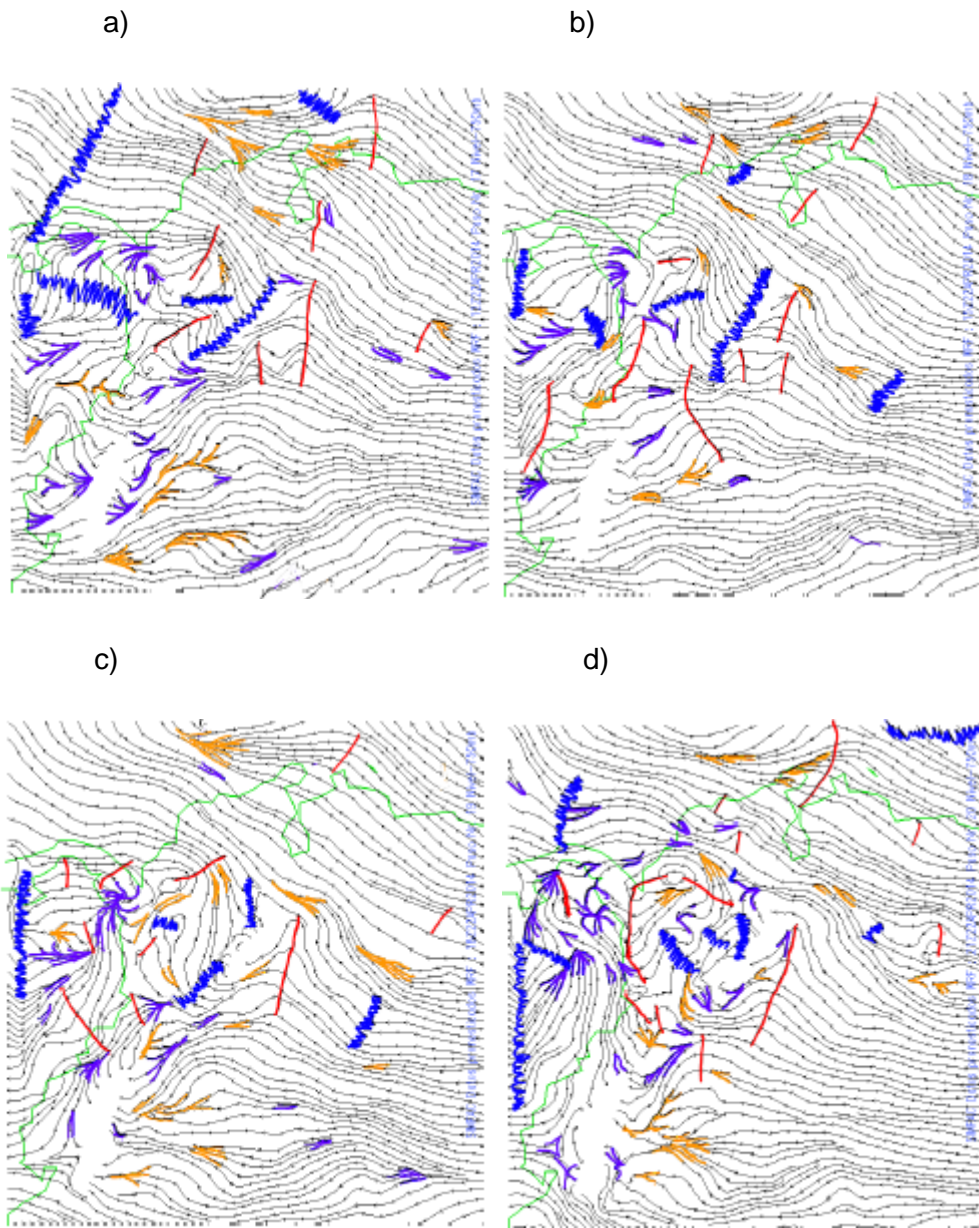


Figura 63: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 20 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12, 15, 18 y 21 UTC

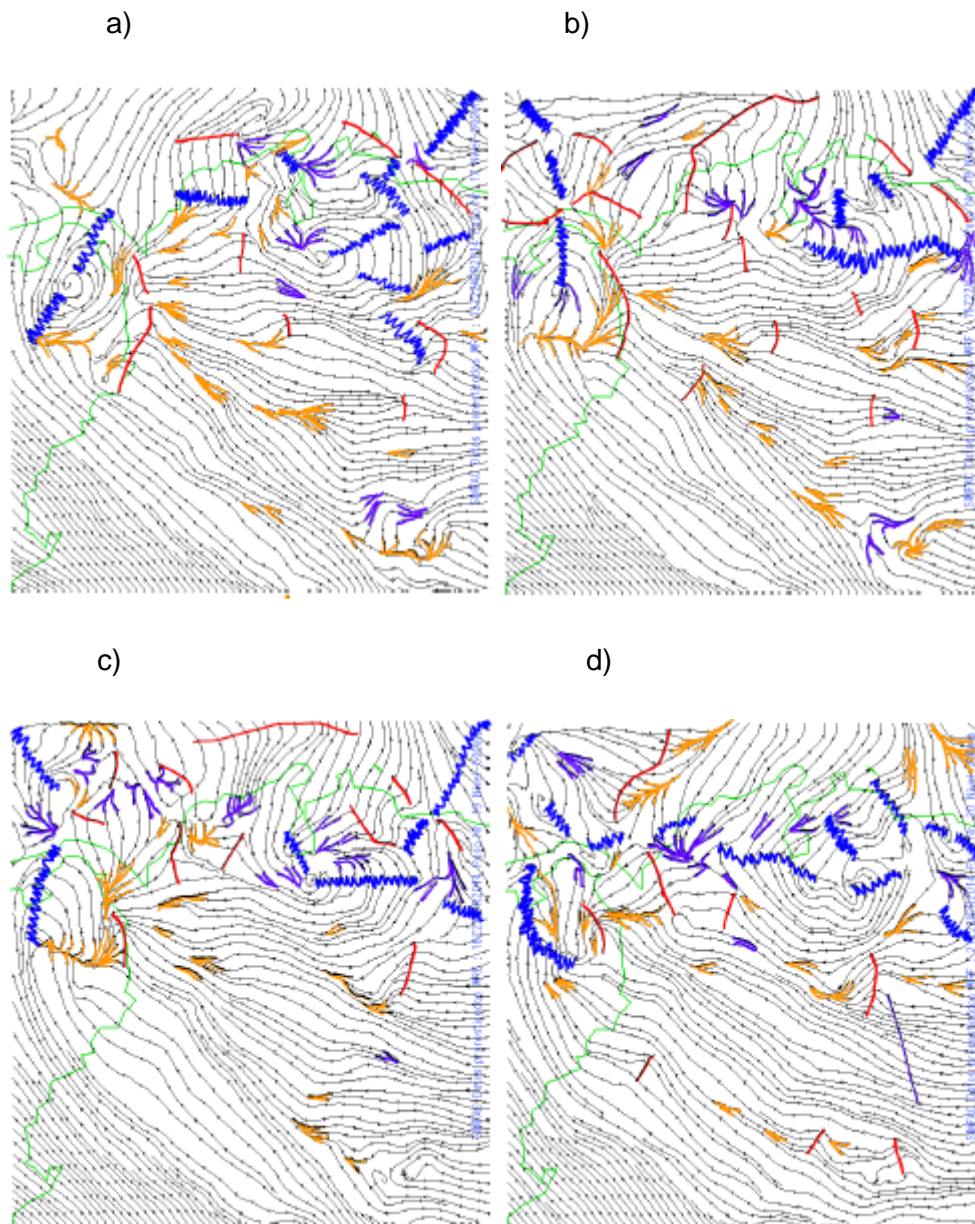


Figura 64: de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 20 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12, 15, 18 y 21 UTC

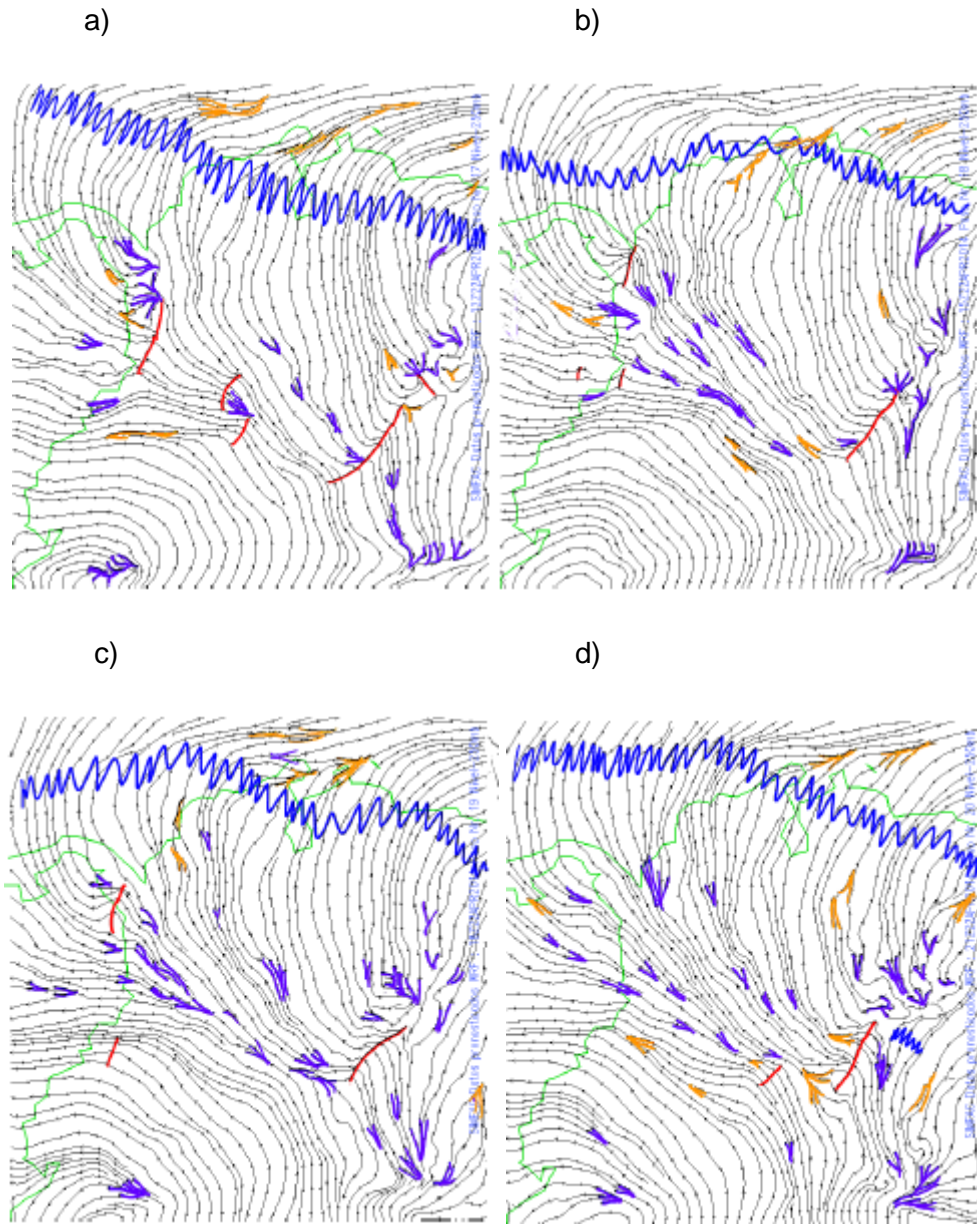


Figura 65: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 20 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12, 15, 18 y 21 UTC

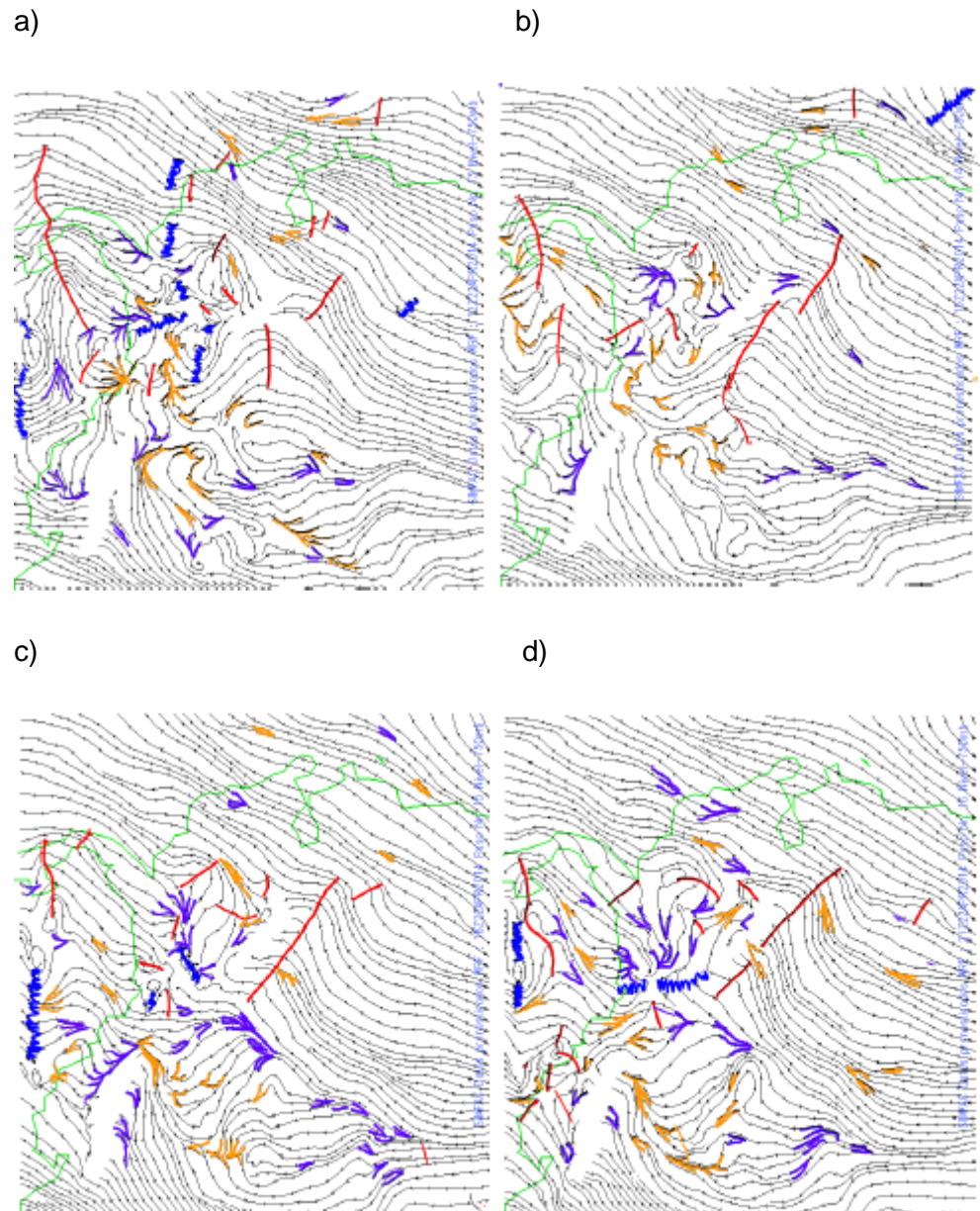


Figura 66: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 21 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12, 15, 18 y 21 UTC

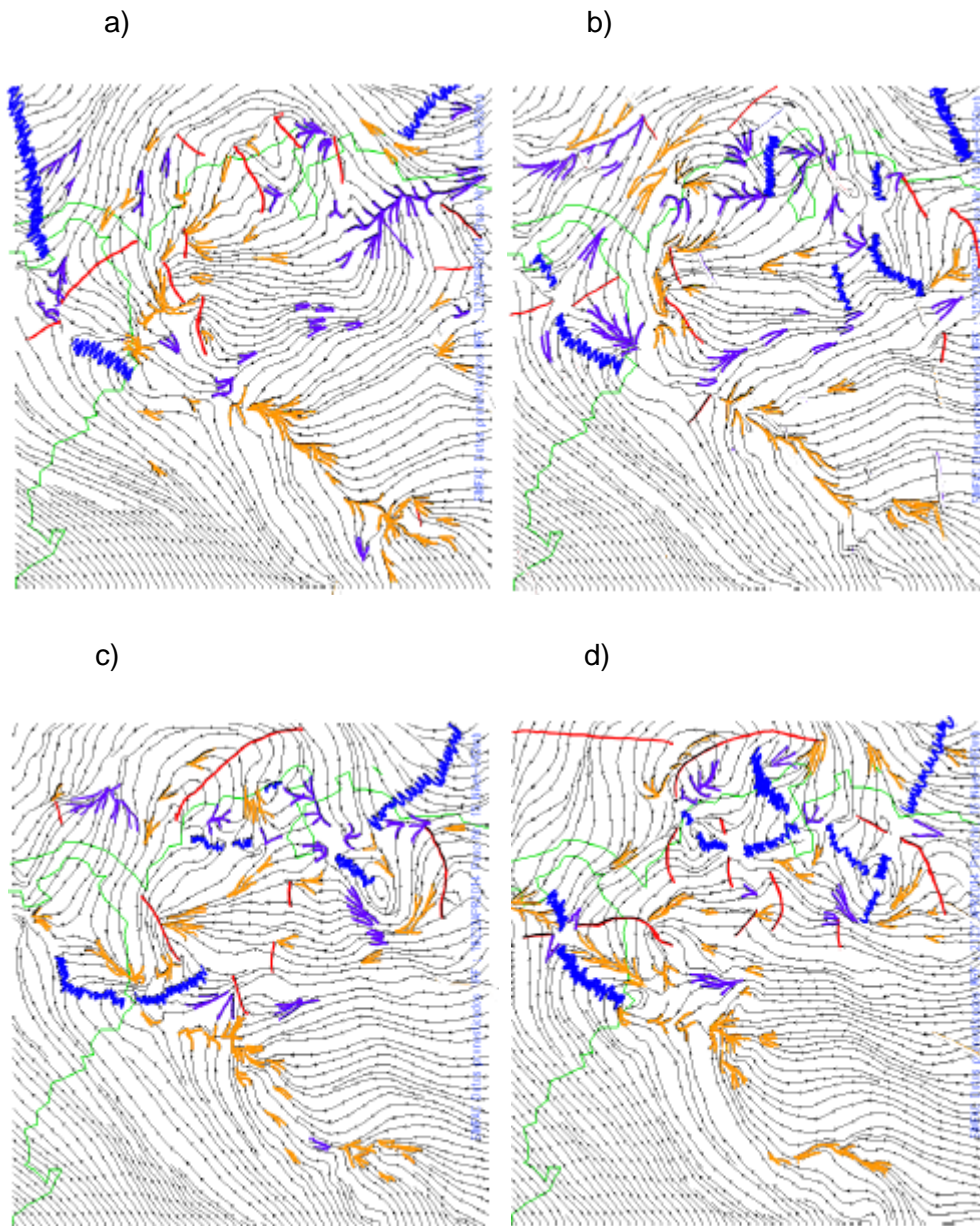


Figura 67: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 21 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12, 15, 18 y 21 UTC

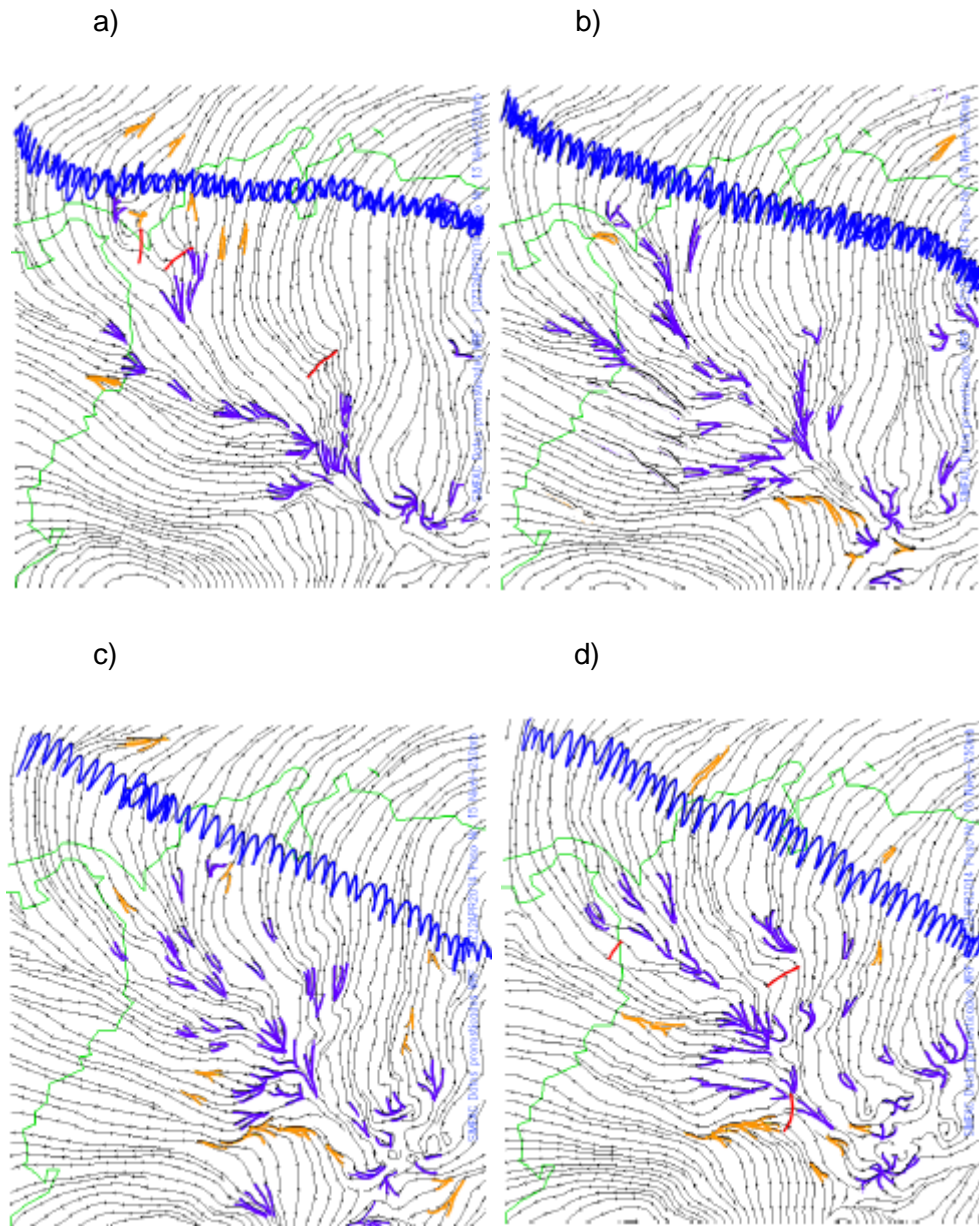


Figura 68: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 21 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12, 15, 18 y 21 UTC

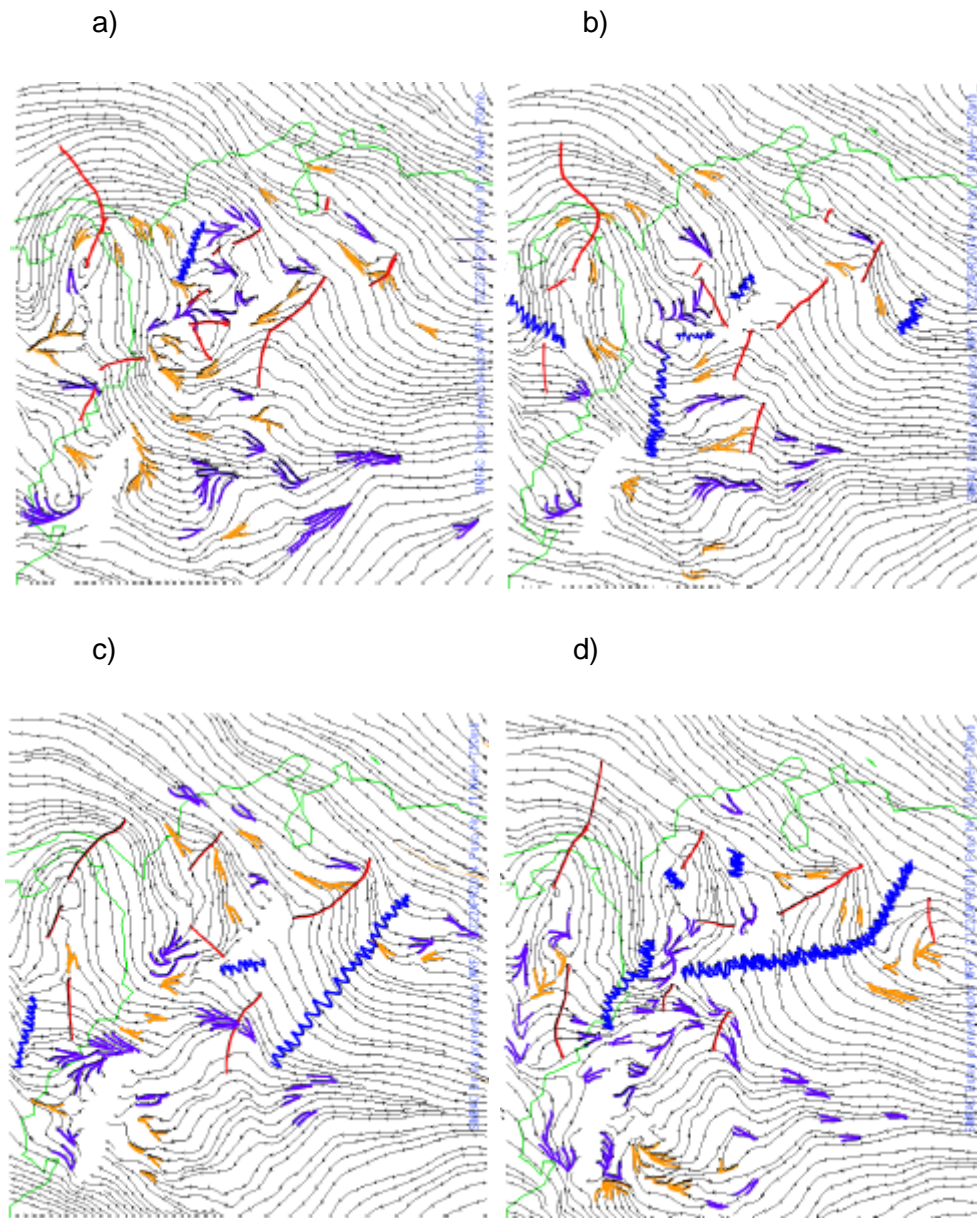


Figura 69: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 21 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12, 15, 18 y 21 UTC

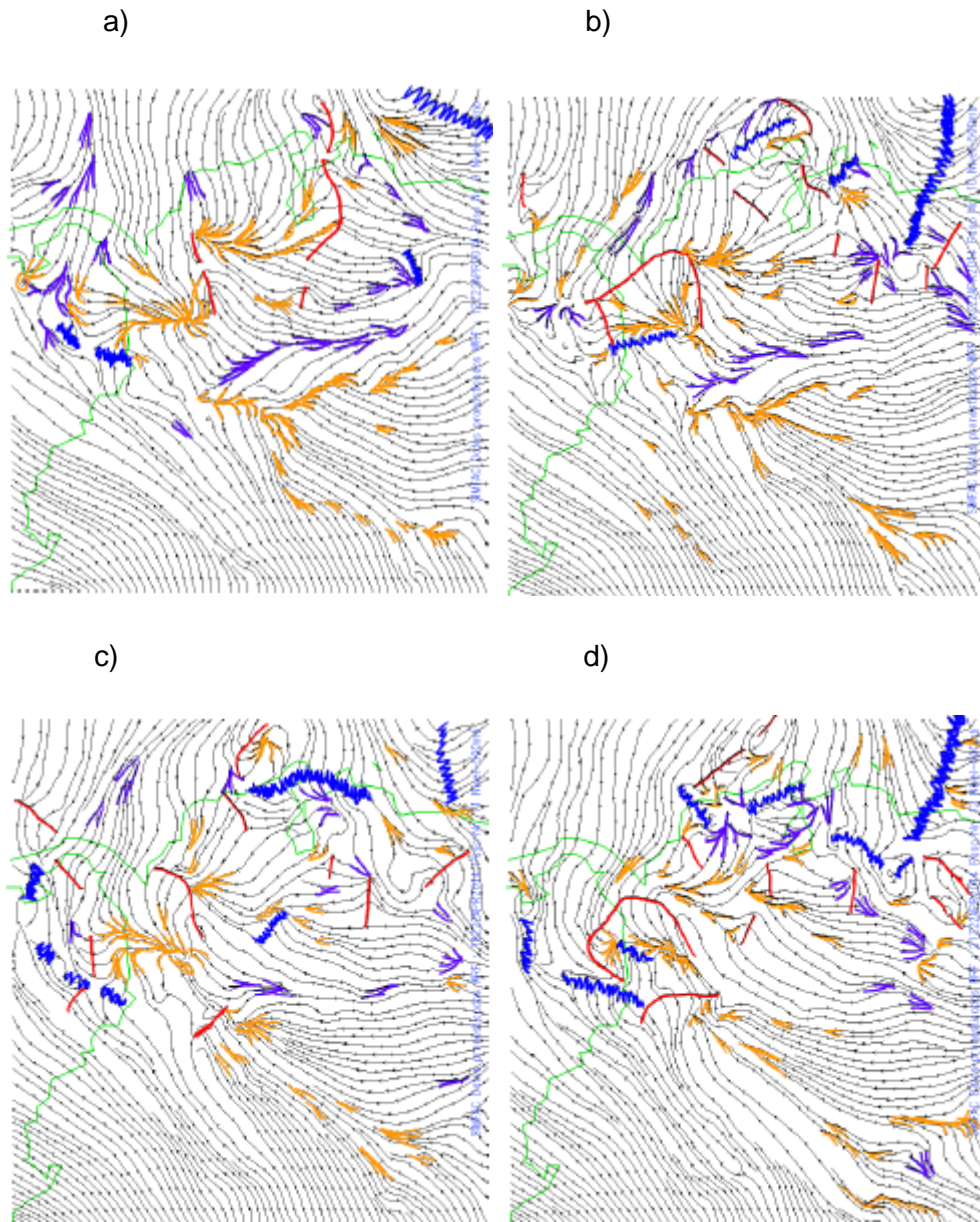


Figura 70: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 21 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12, 15, 18 y 21 UTC

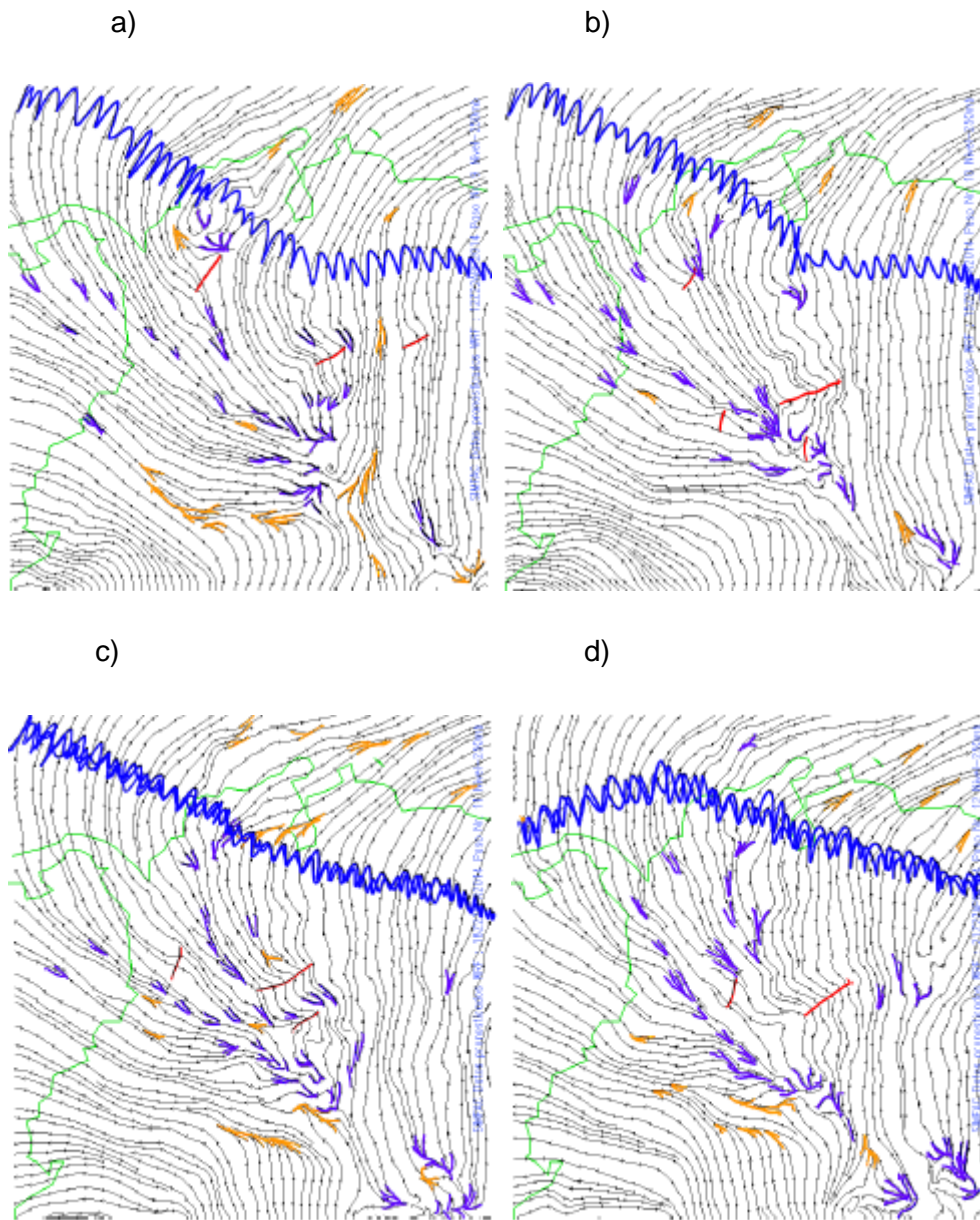


Figura 71: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 21 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 a las 12, 15, 18 y 21 UTC

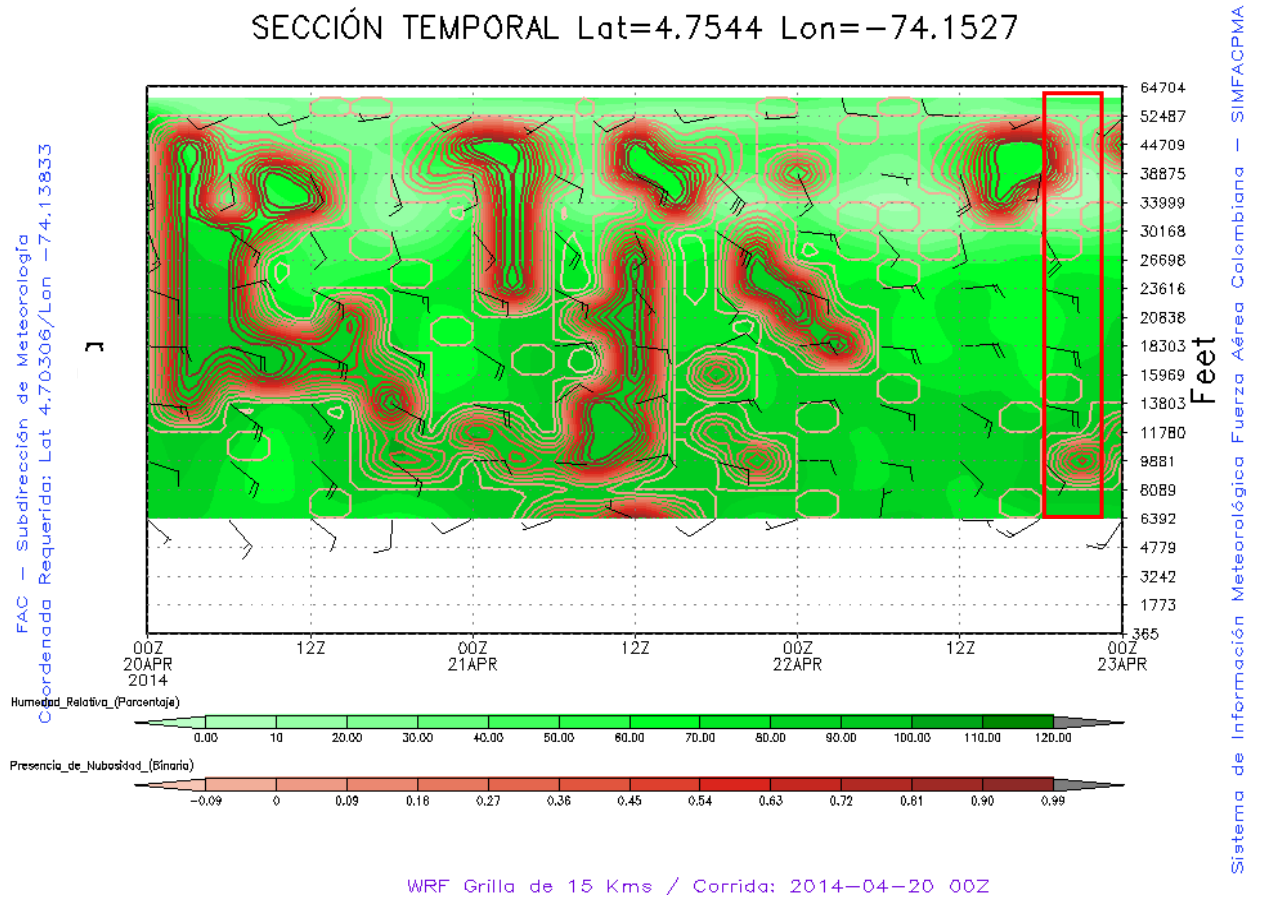


Figura 72: Sección temporal del SKBO de la corrida del 20 de abril de 2014 a las 00 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas.

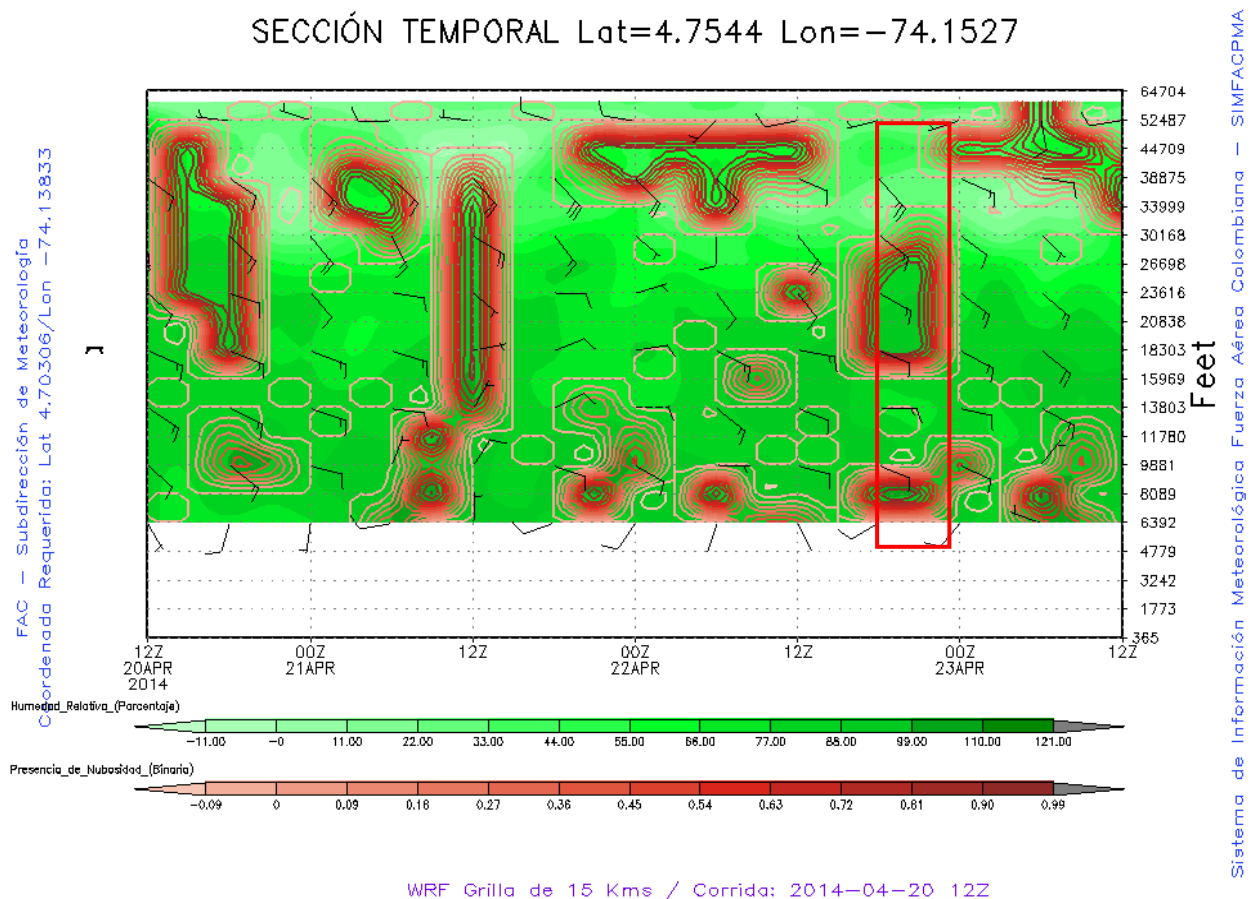


Figura 73: Sección temporal del SKBO de la corrida del 20 de abril de 2014 a las 12 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas.

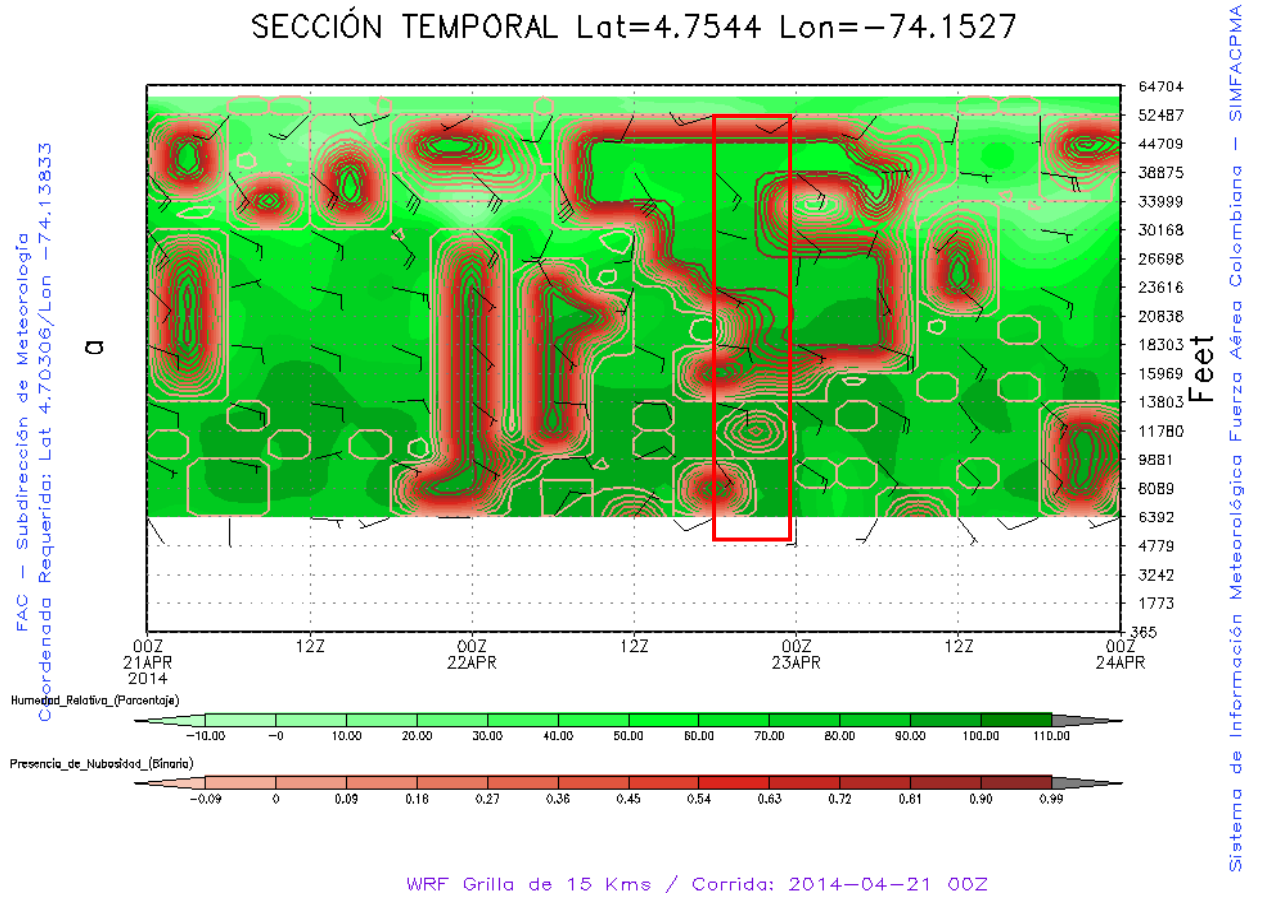


Figura 74: Sección temporal del SKBO de la corrida del 21 de abril de 2014 a las 00 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas.

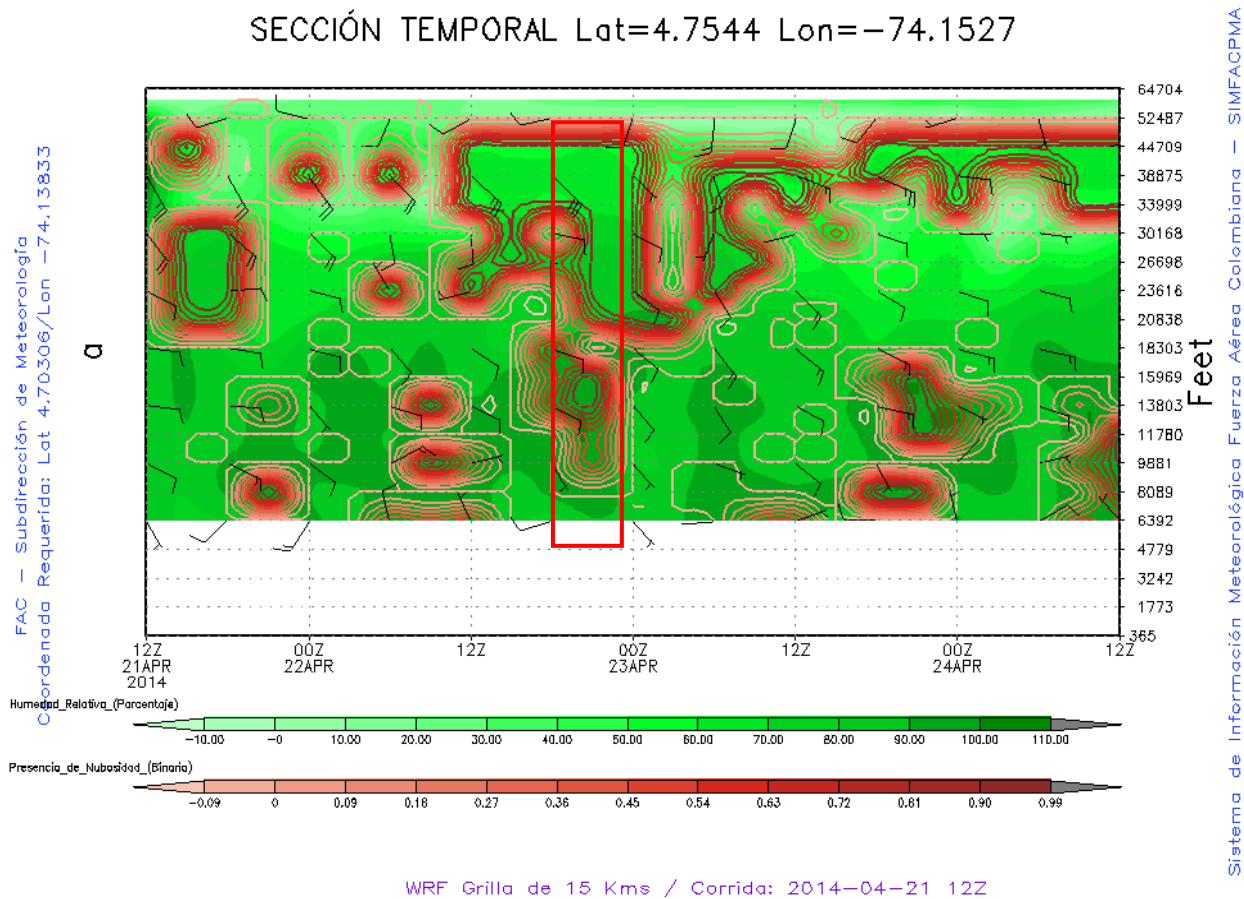


Figura 75: Sección temporal del SKBO de la corrida del 21 de abril de 2014 a las 12 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas.

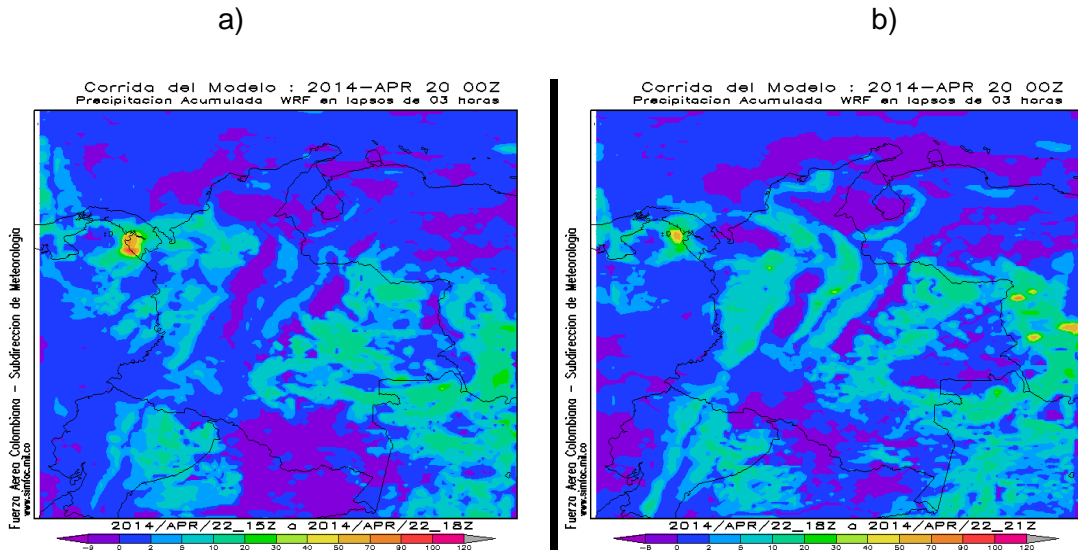


Figura 76: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 20 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 entre las 15 y las 21 UTC

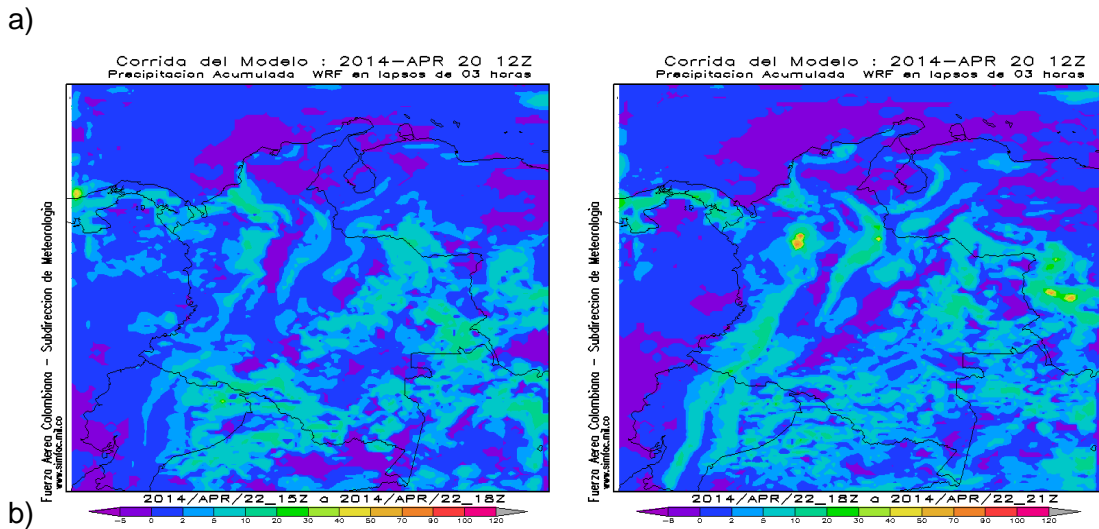


Figura 77: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 20 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 entre las 15 y las 21 UTC

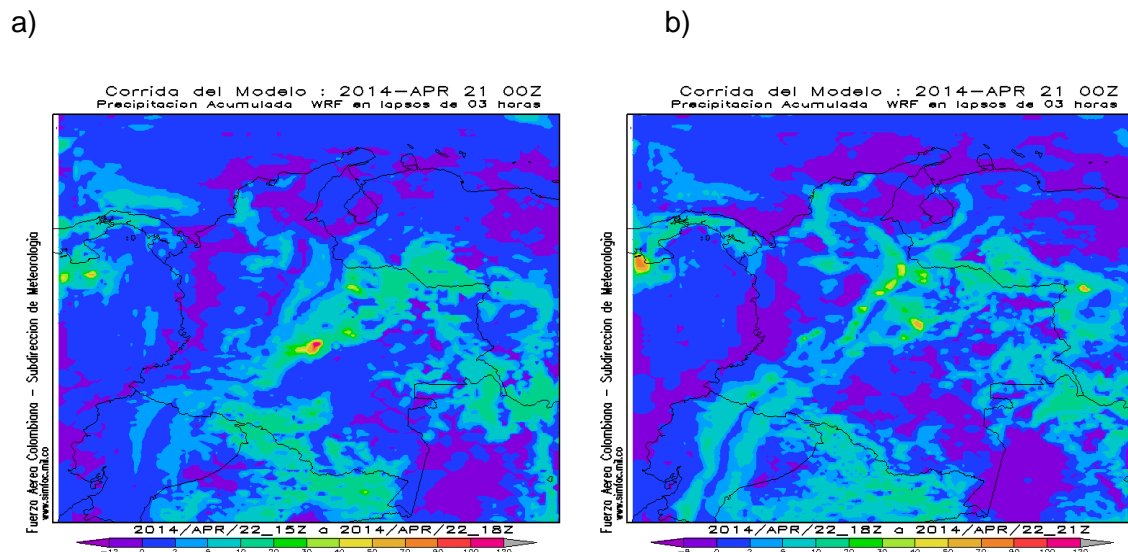


Figura 78: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 21 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 entre las 15 y las 21 UTC

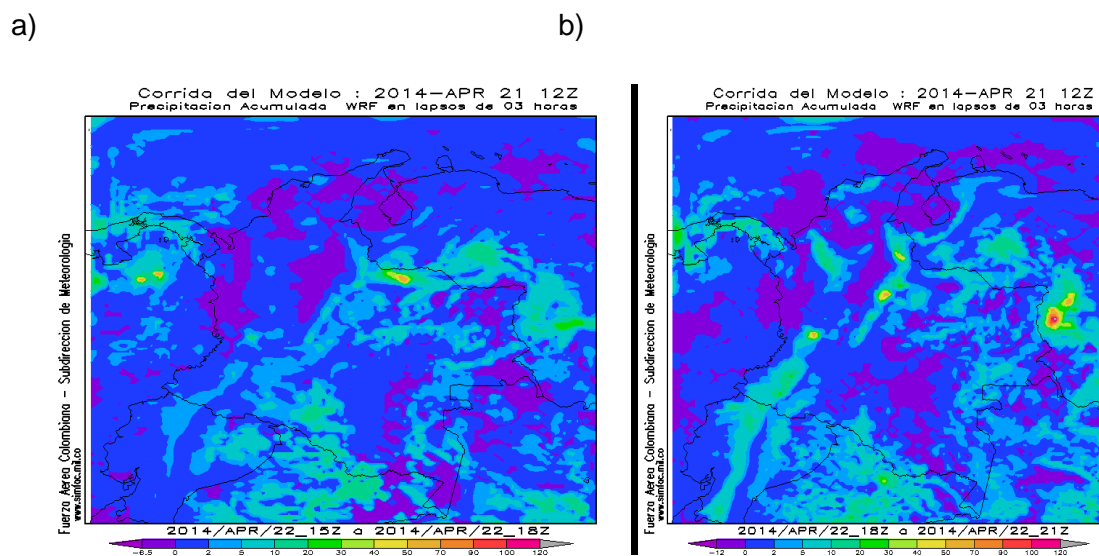


Figura 79: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 21 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 entre las 15 y las 21 UTC

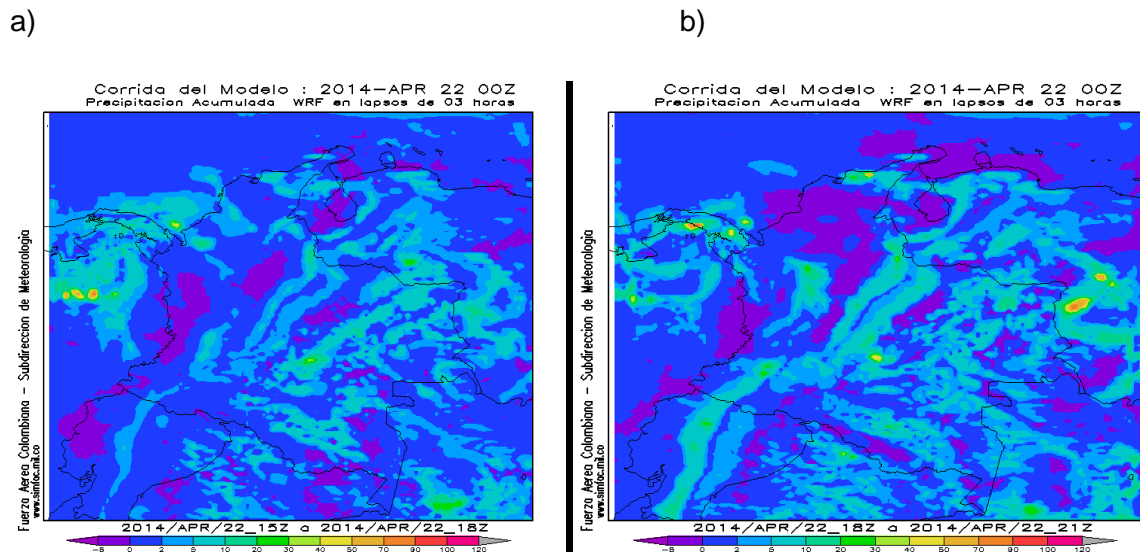
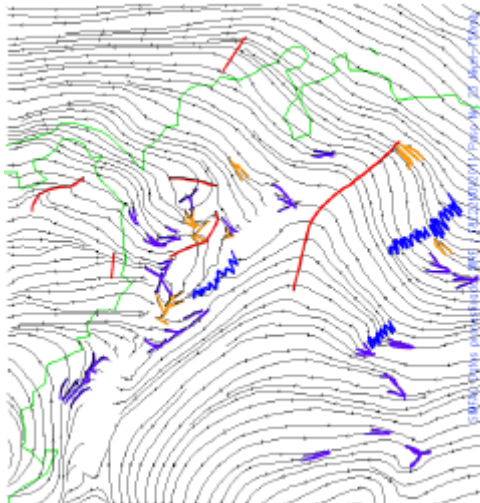


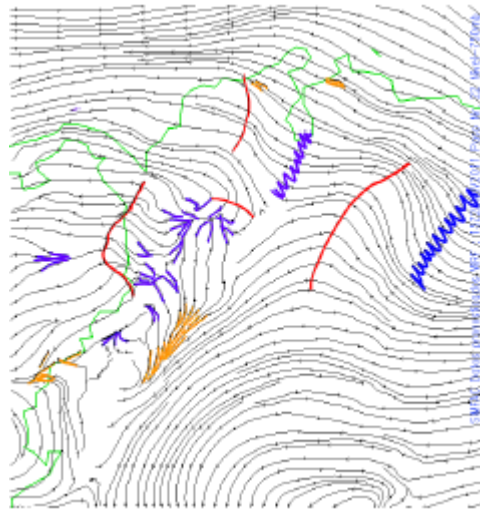
Figura 80: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 22 de abril de 2014, para el 22 de abril de 2014 entre las 15 y las 21 UTC

D. Anexos: corridas del modelo WRF 2.1.1 para el segundo caso del 22 de noviembre de 2011

a)



b)



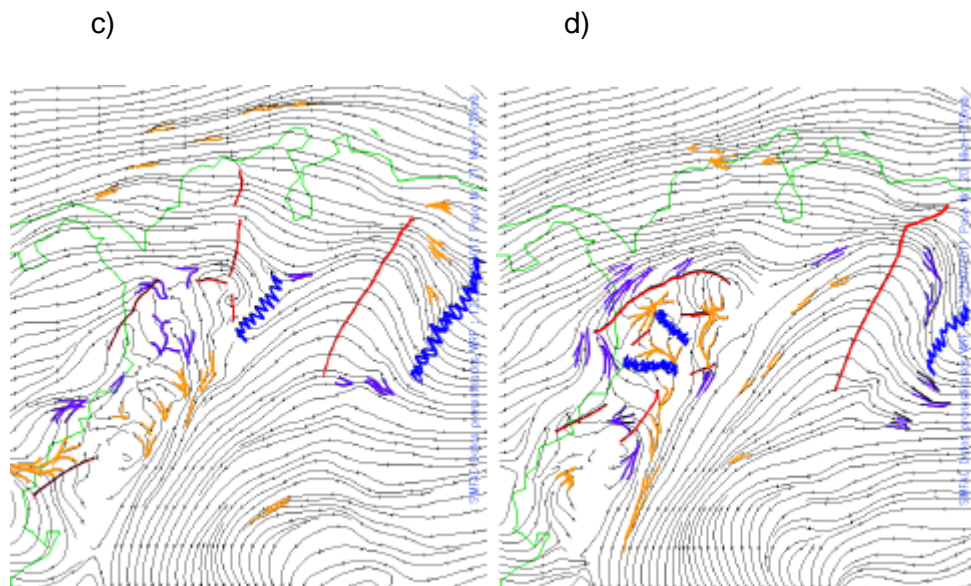


Figura 81: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 20 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c) y 21 UTC (d)

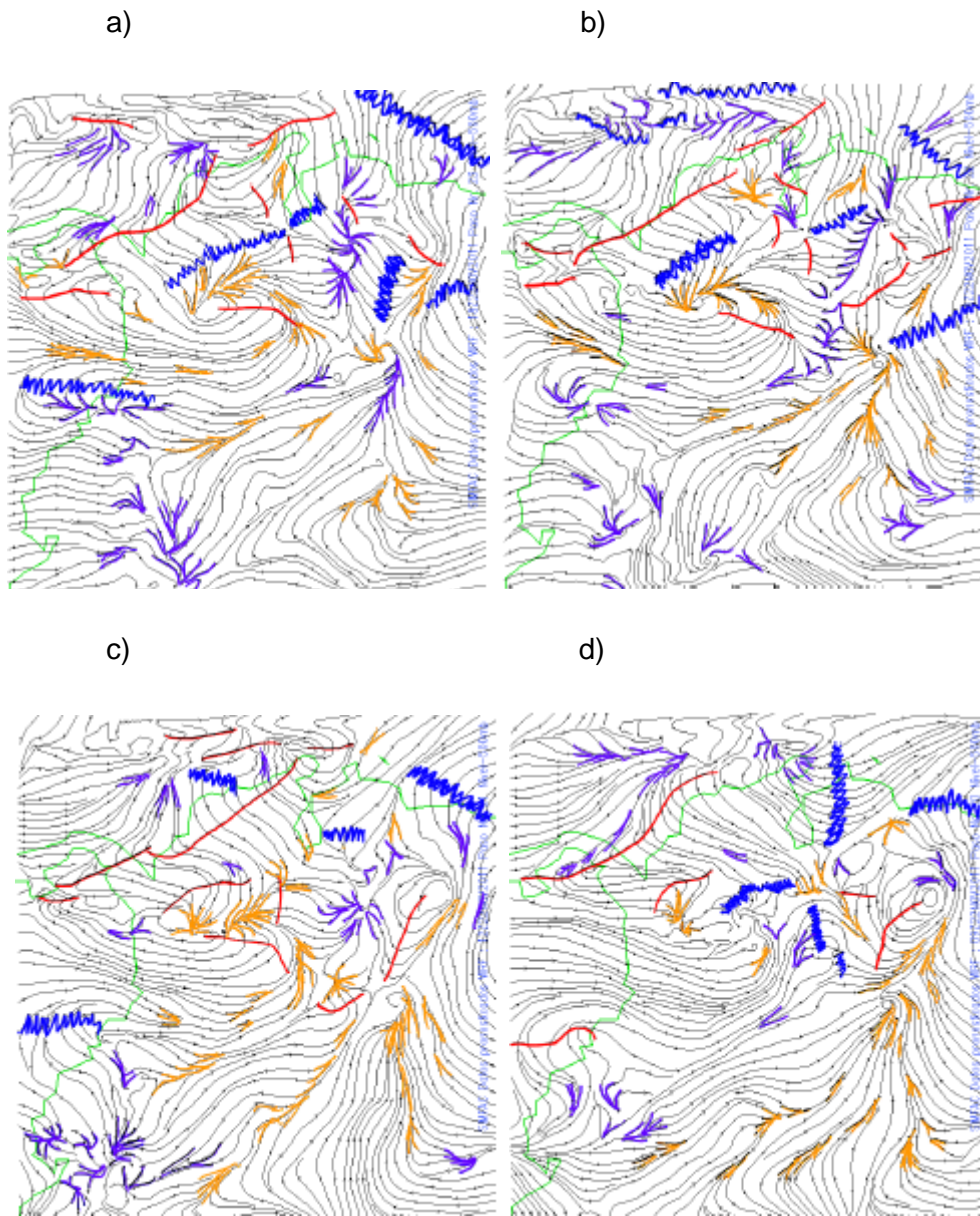


Figura 82: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 20 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c) y 21 UTC (d)

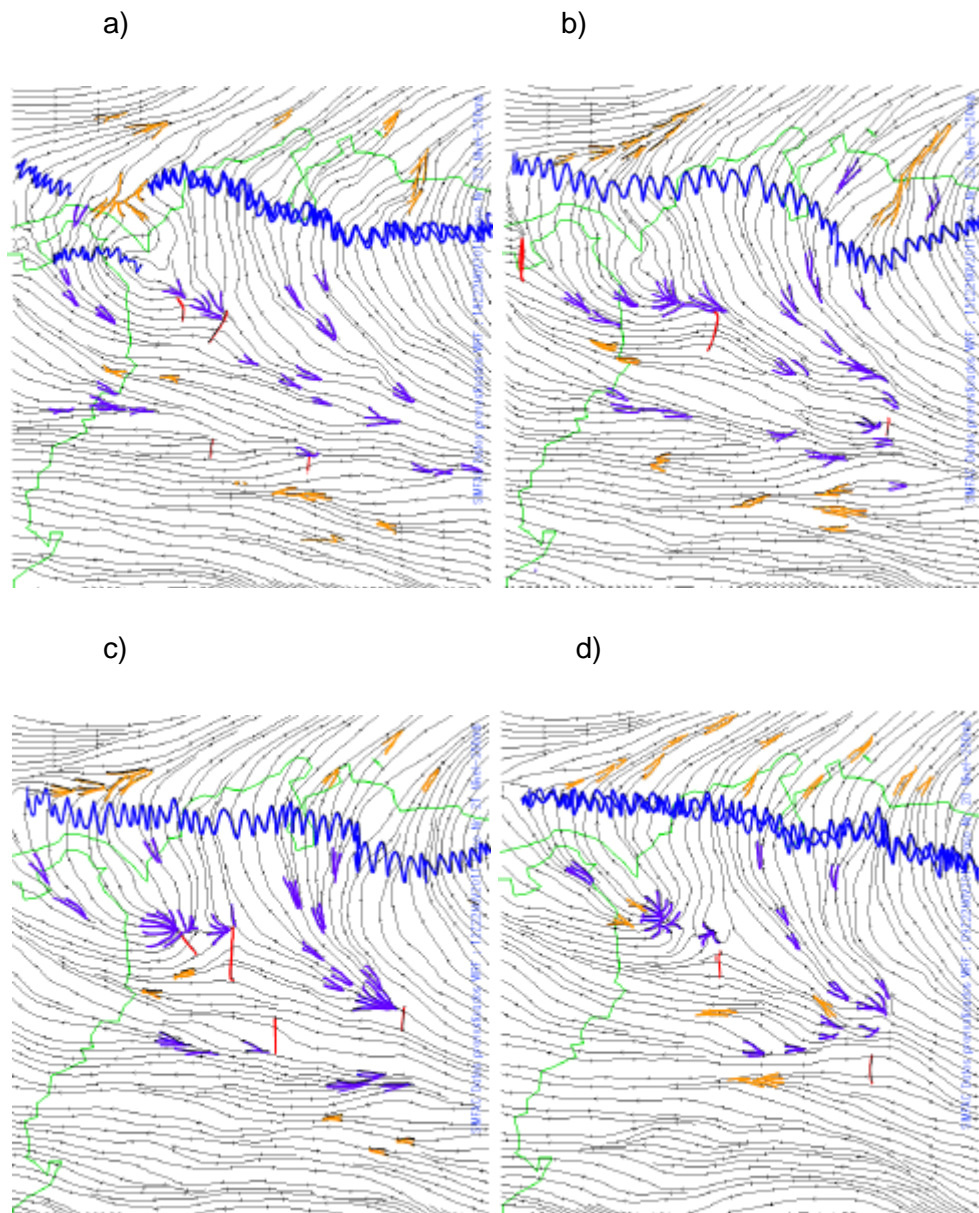
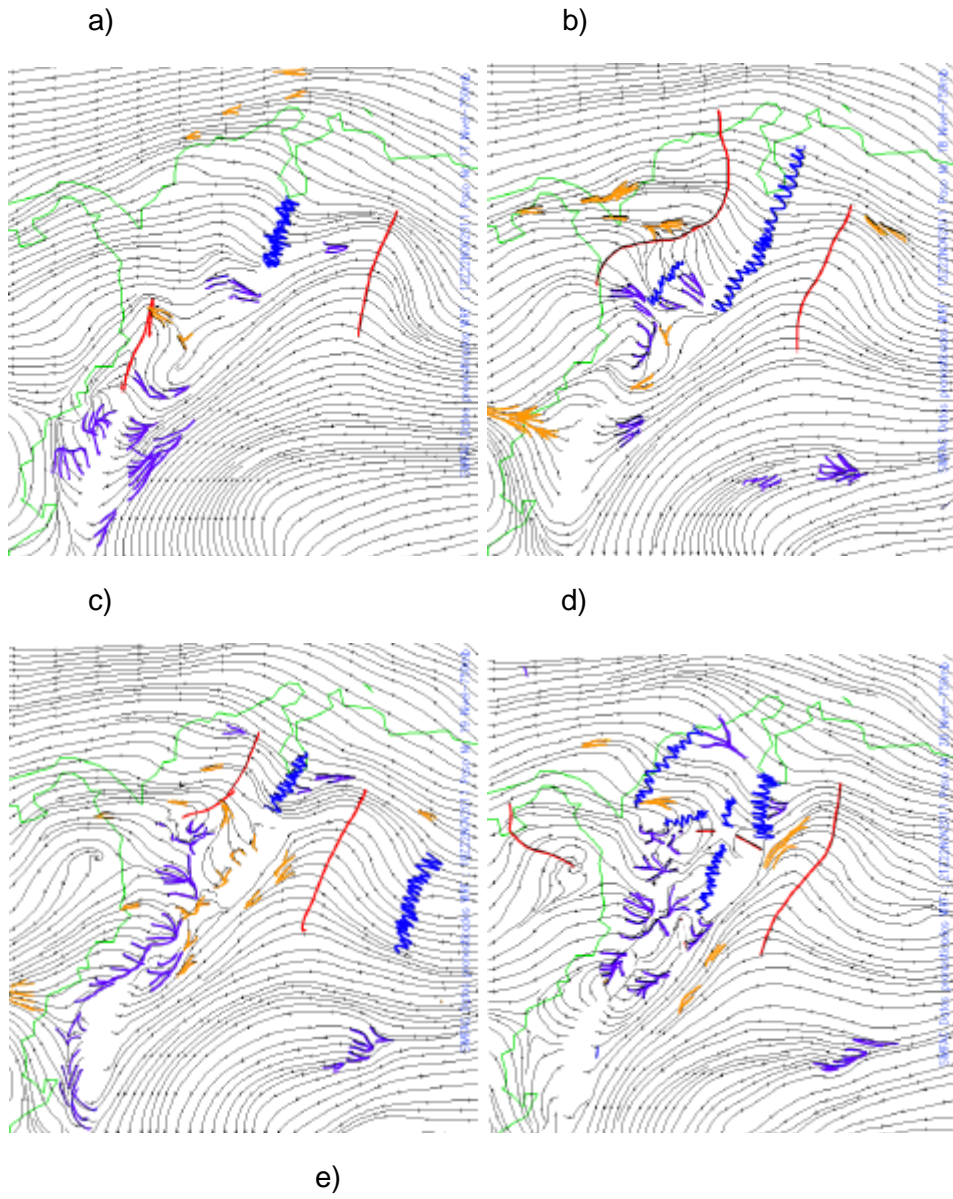


Figura 83: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 20 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c) y 21 UTC (d)



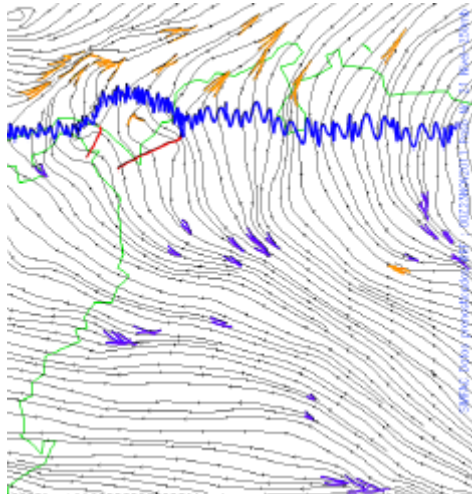
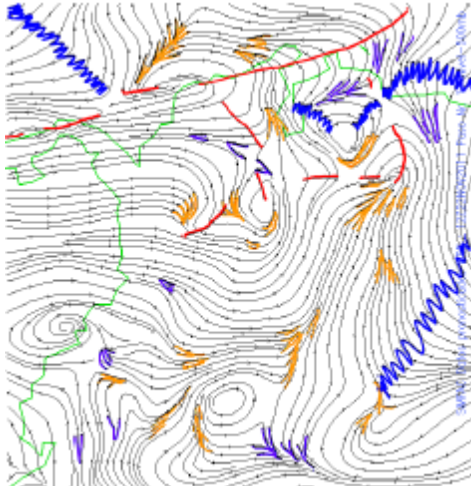
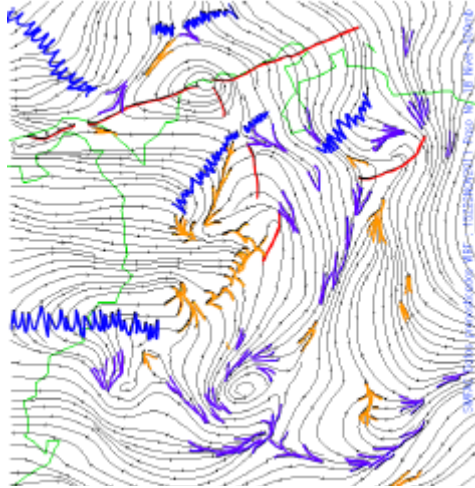


Figura 84: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 20 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c), 21 UTC (d) y 23 noviembre de 2011 a las 00 UTC (e)

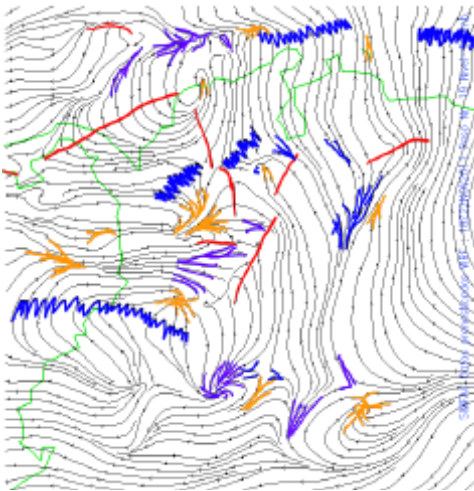
a)



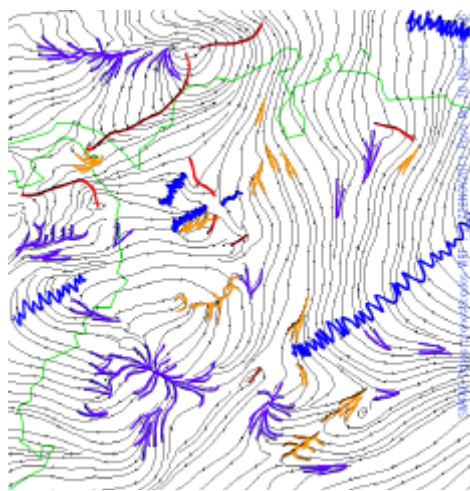
b)



c)



d)



e)

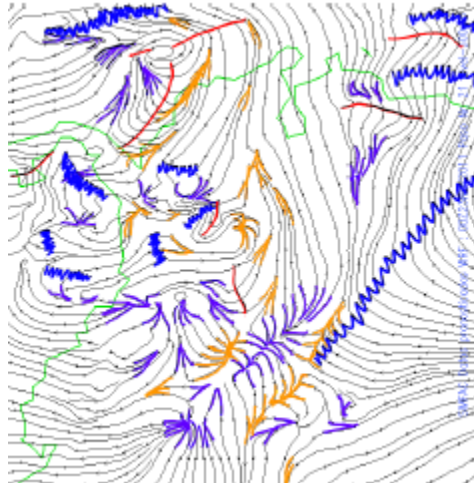
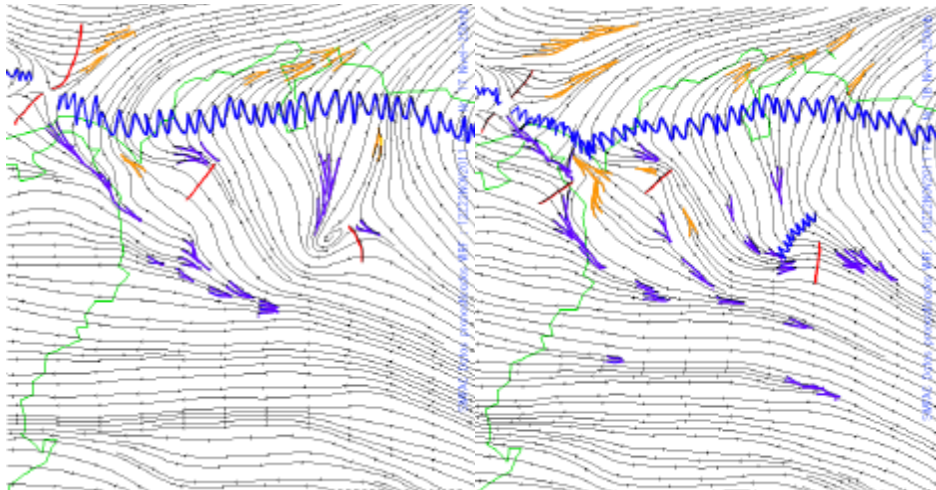


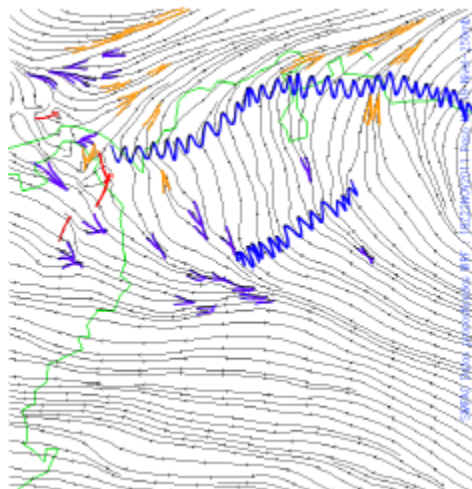
Figura 85: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 20 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c), 21 UTC (d) y 23 noviembre de 2011a las 00 UTC (e)

a)

b)



c)



d)

e)

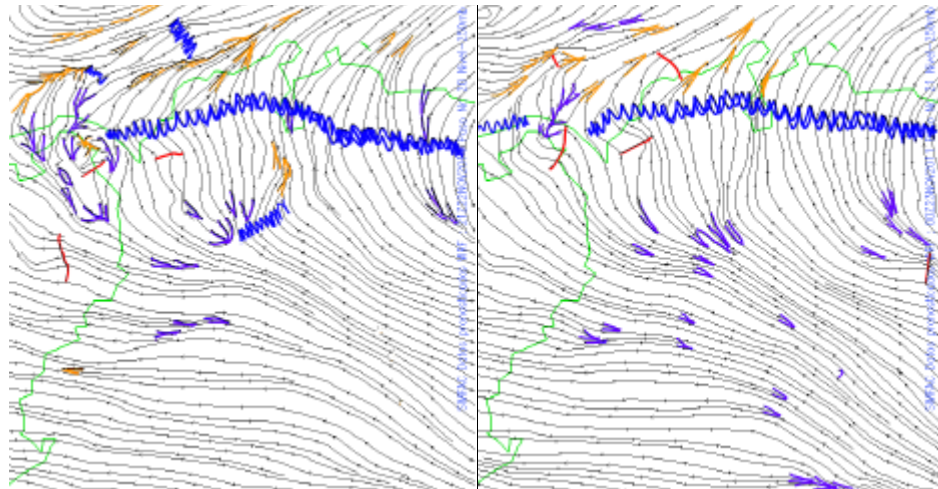
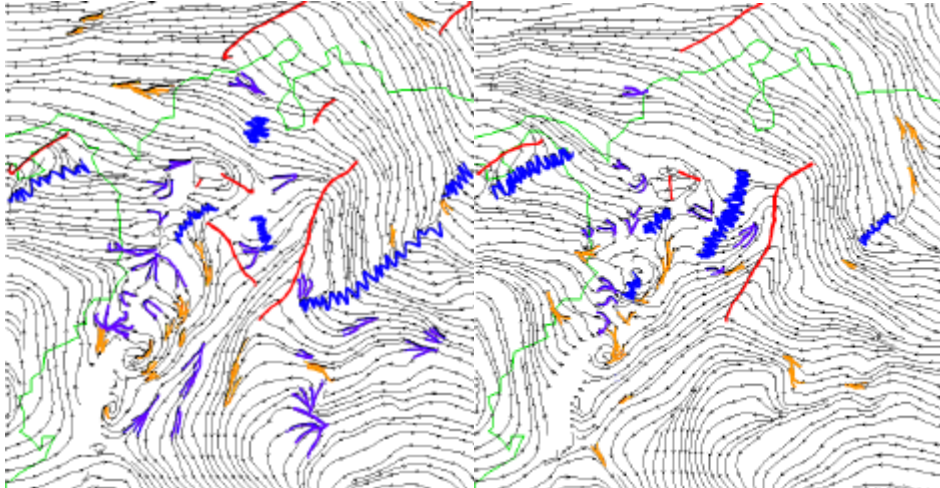


Figura 86: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 20 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c), 21 UTC (d) y 23 noviembre de 2011 a las 00 UTC (e)

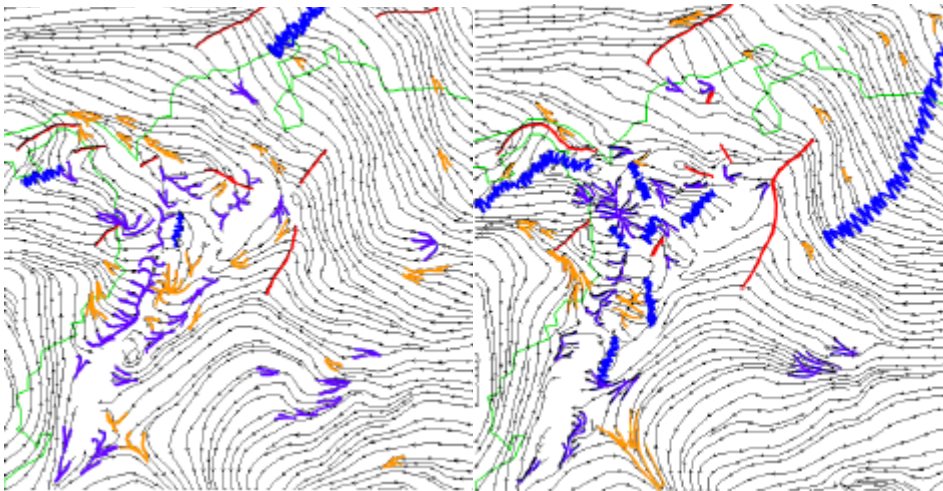
a)

b)



c)

d)



e)

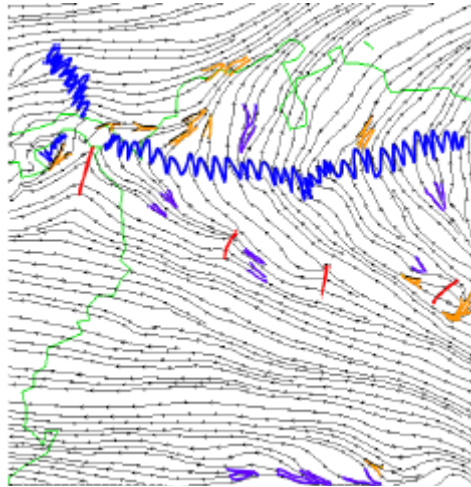
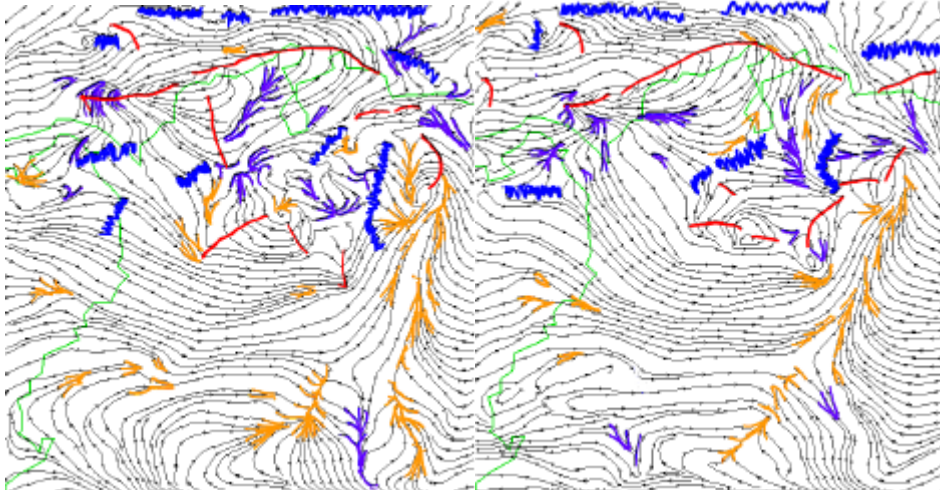


Figura 87: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 21 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c), 21 UTC (d) y 23 noviembre de 2011 a las 00 UTC (e)

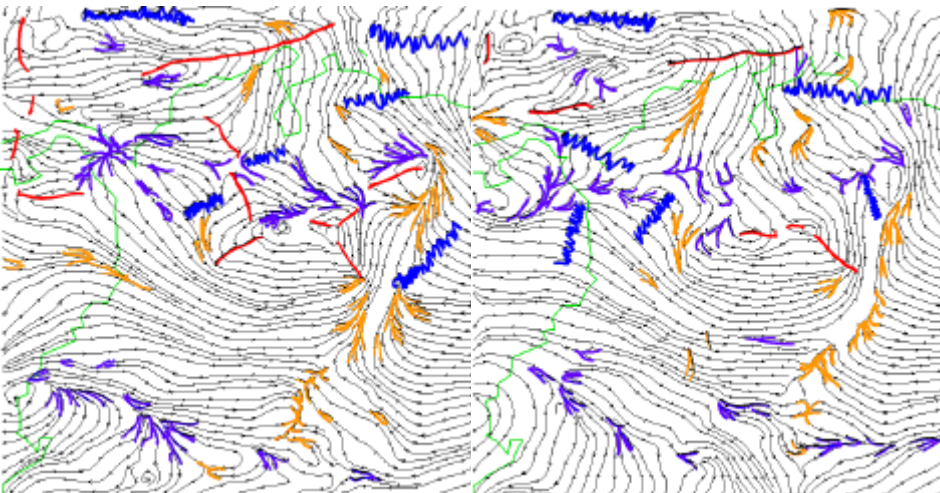
a)

b)



c)

d)



e)

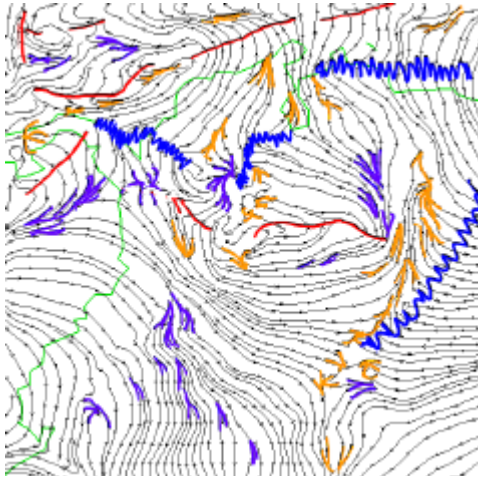
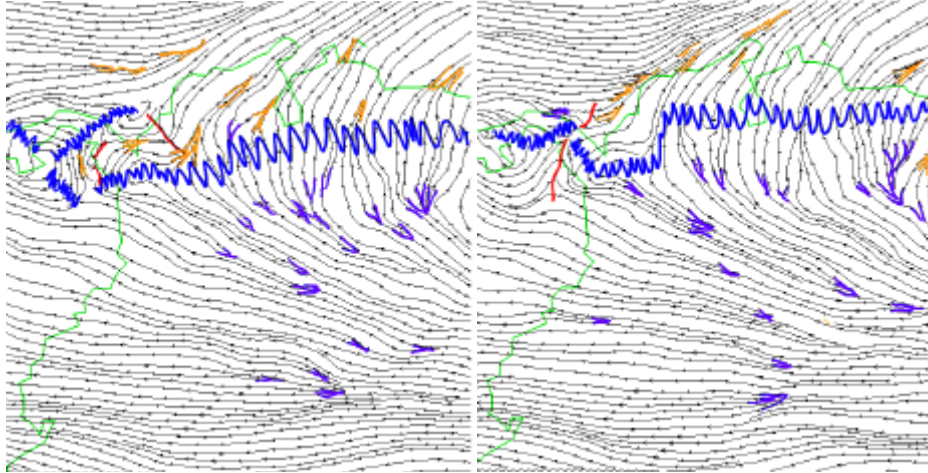


Figura 88: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 21 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c), 21 UTC (d) y 23 noviembre de 2011 a las 00 UTC (e)

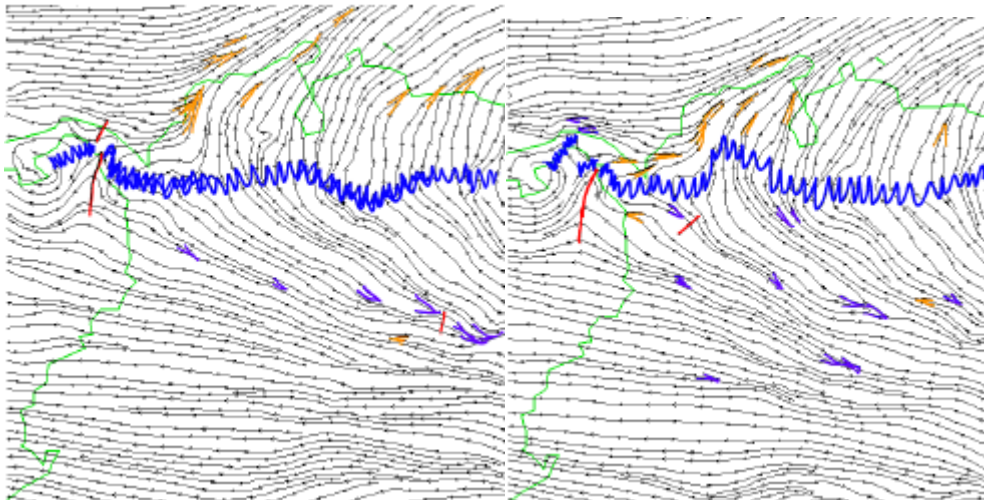
a)

b)



c)

d)



e)

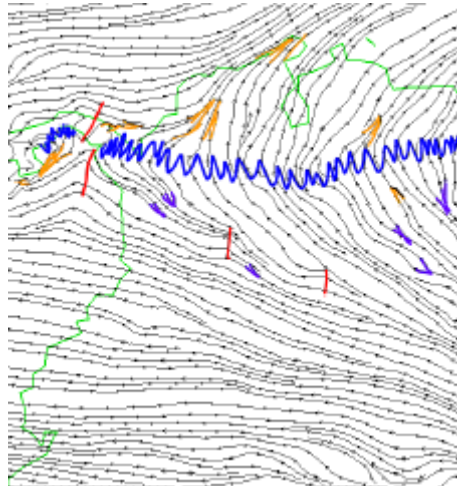
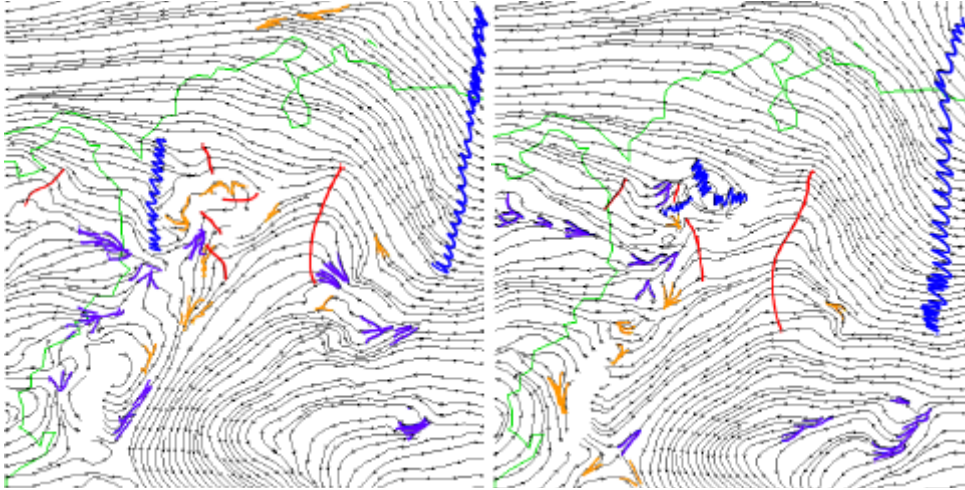


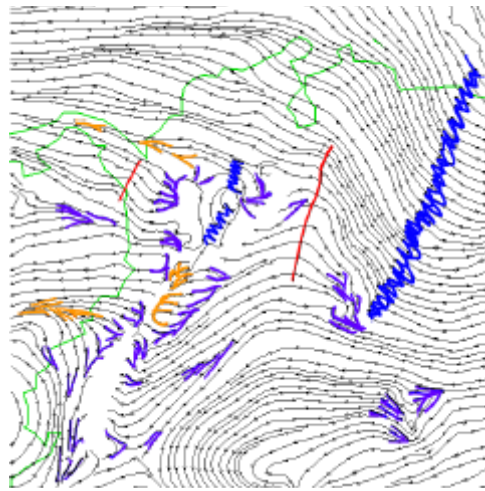
Figura 89: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 21 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c), 21 UTC (d) y 23 noviembre de 2011 a las 00 UTC (e)

a)

b)



c)



d)

e)



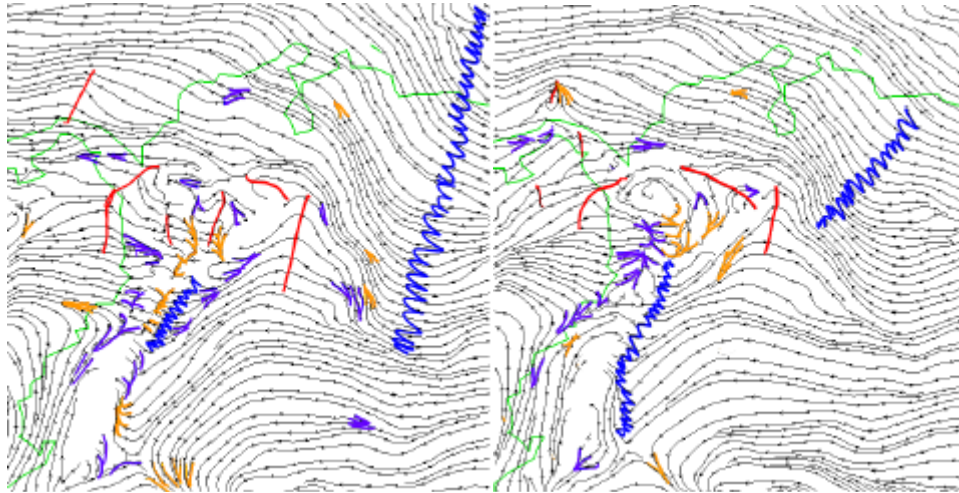
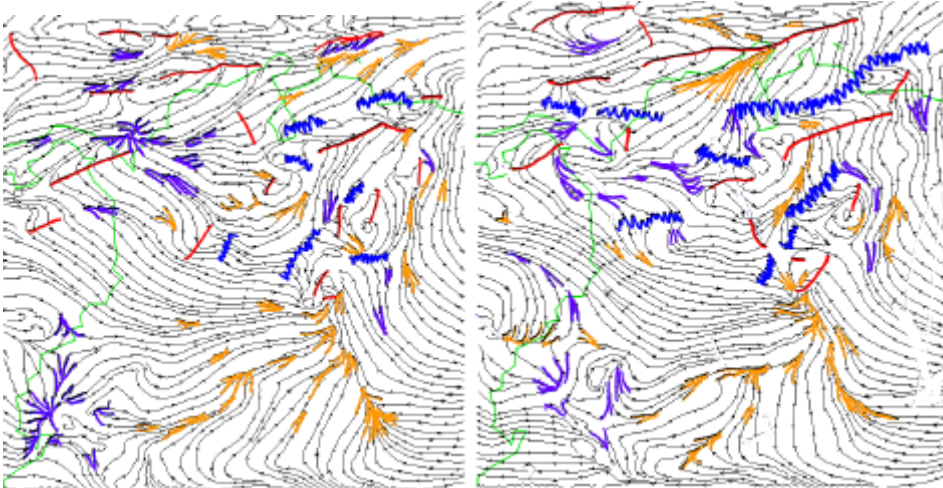


Figura 90: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 21 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c), 21 UTC (d) y 23 noviembre de 2011 a las 00 UTC (e)

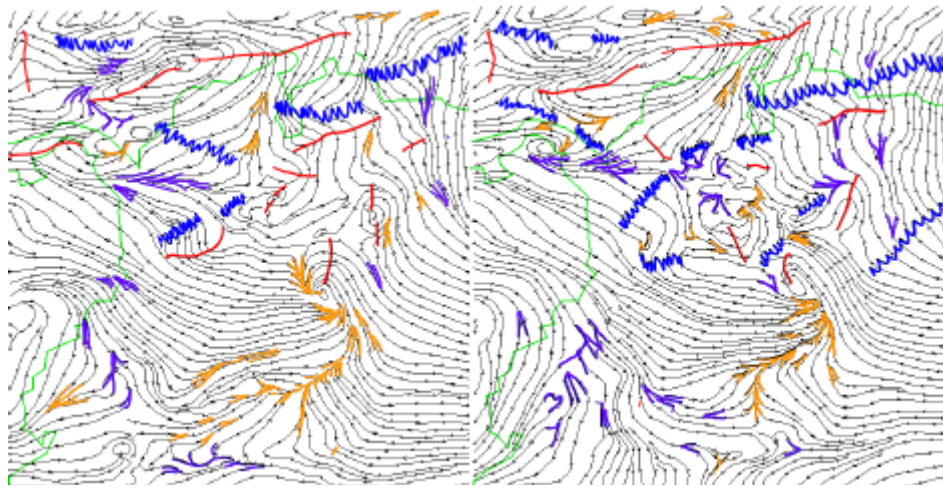
a)

b)



c)

d)



e)

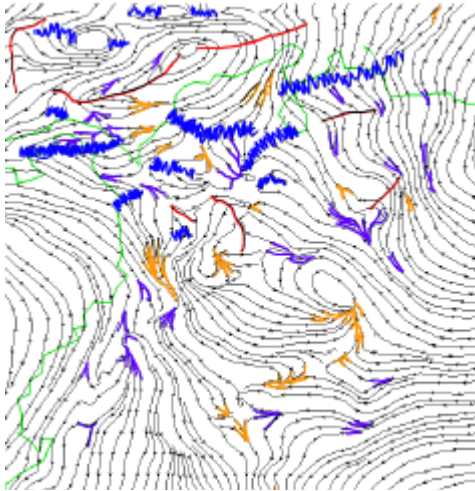
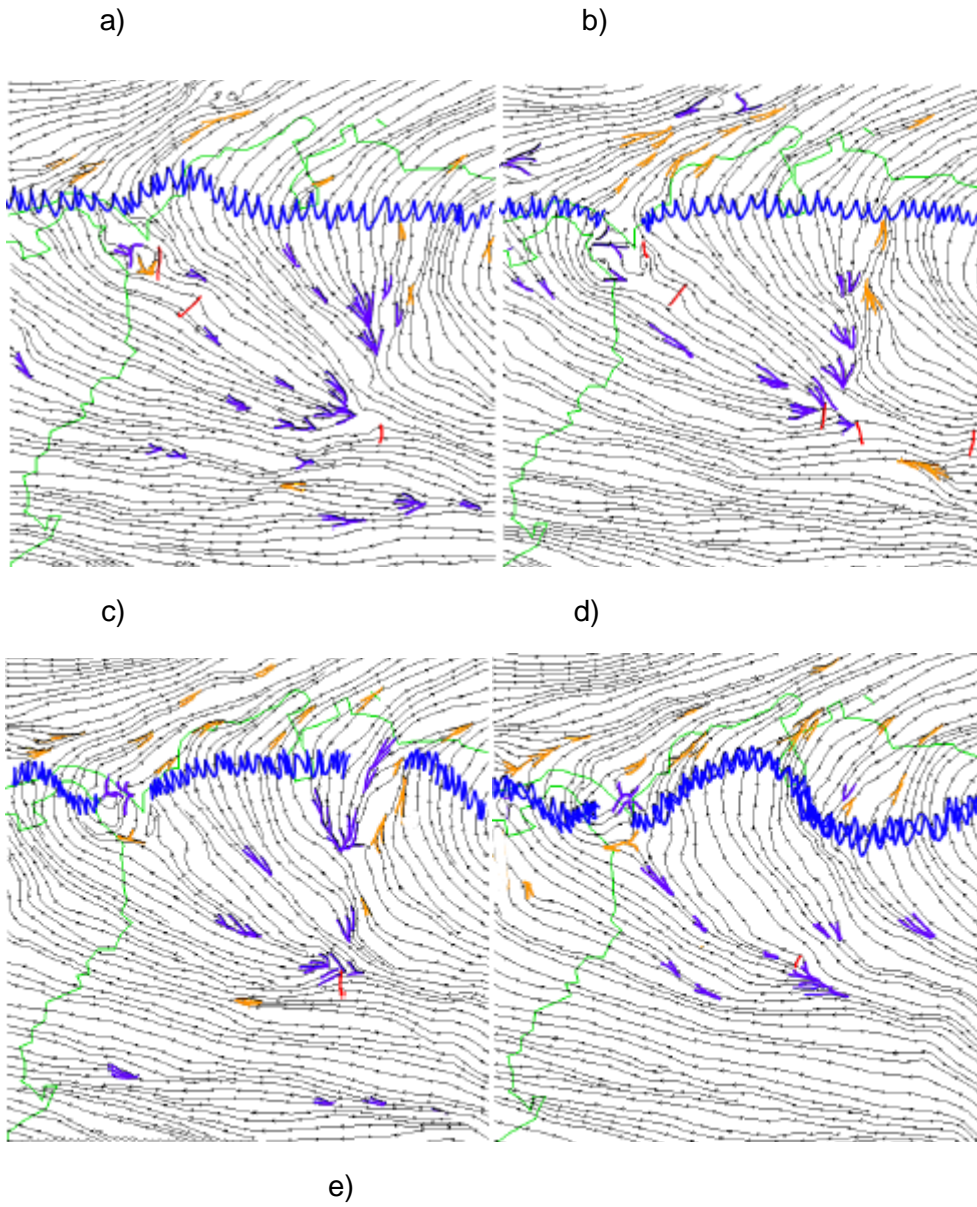


Figura 91: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 21 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c), 21 UTC (d) y 23 noviembre de 2011 a las 00 UTC (e)



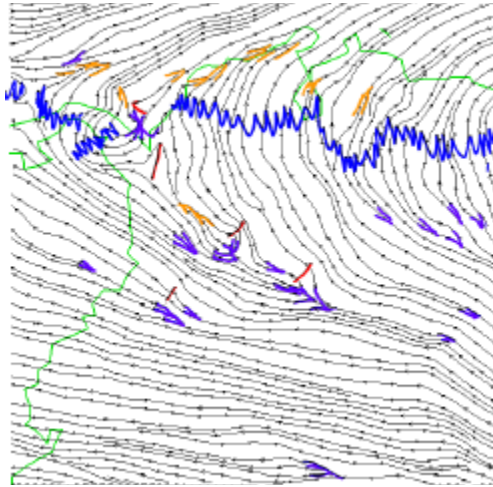


Figura 92: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 21 de noviembre de 2011, para el 22 noviembre de 2011 a las 12 (a), 15 (b), 18 (c), 21 UTC (d) y 23 noviembre de 2011 a las 00 UTC (e)

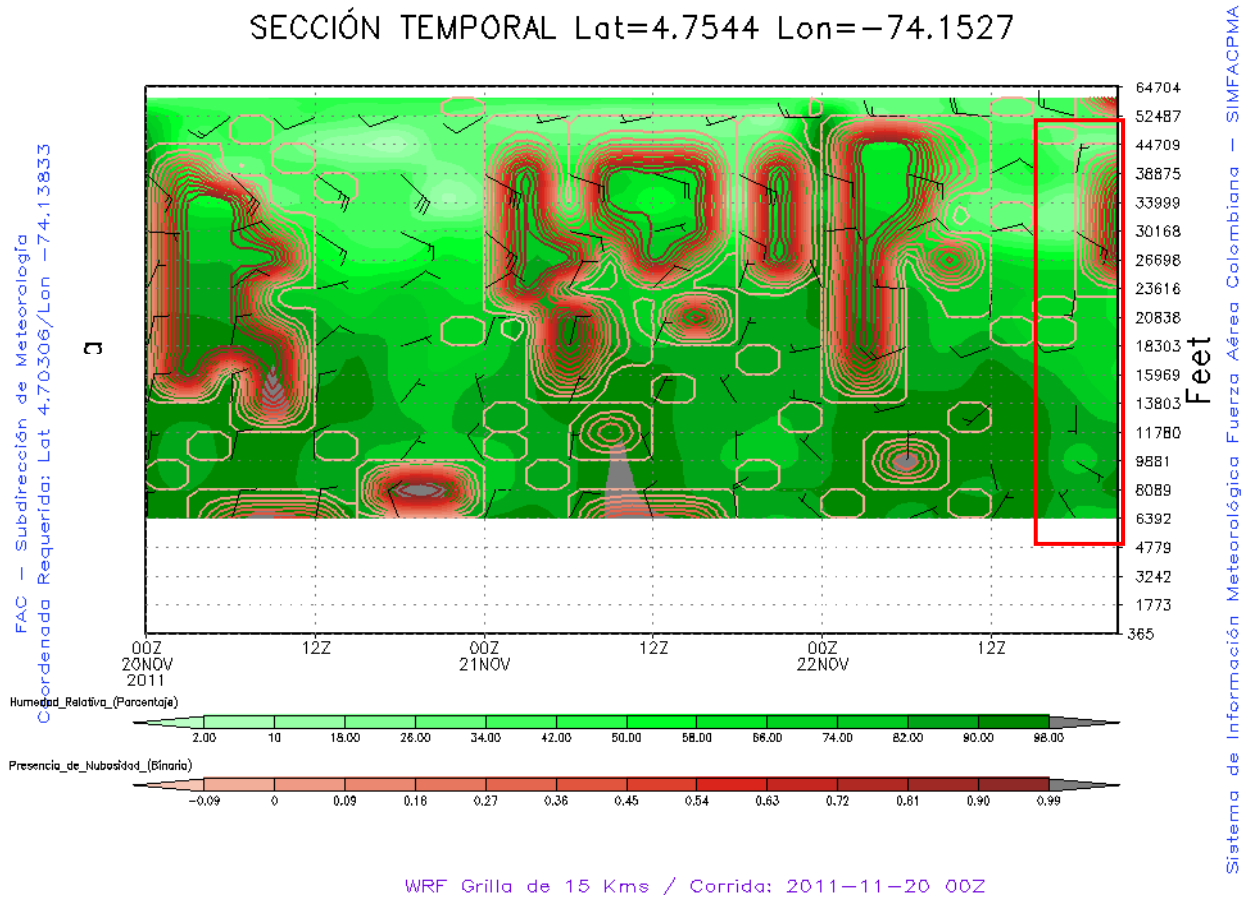


Figura 93: Sección temporal del SKBO de la corrida del 20 de noviembre de 2011 a las 00 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas

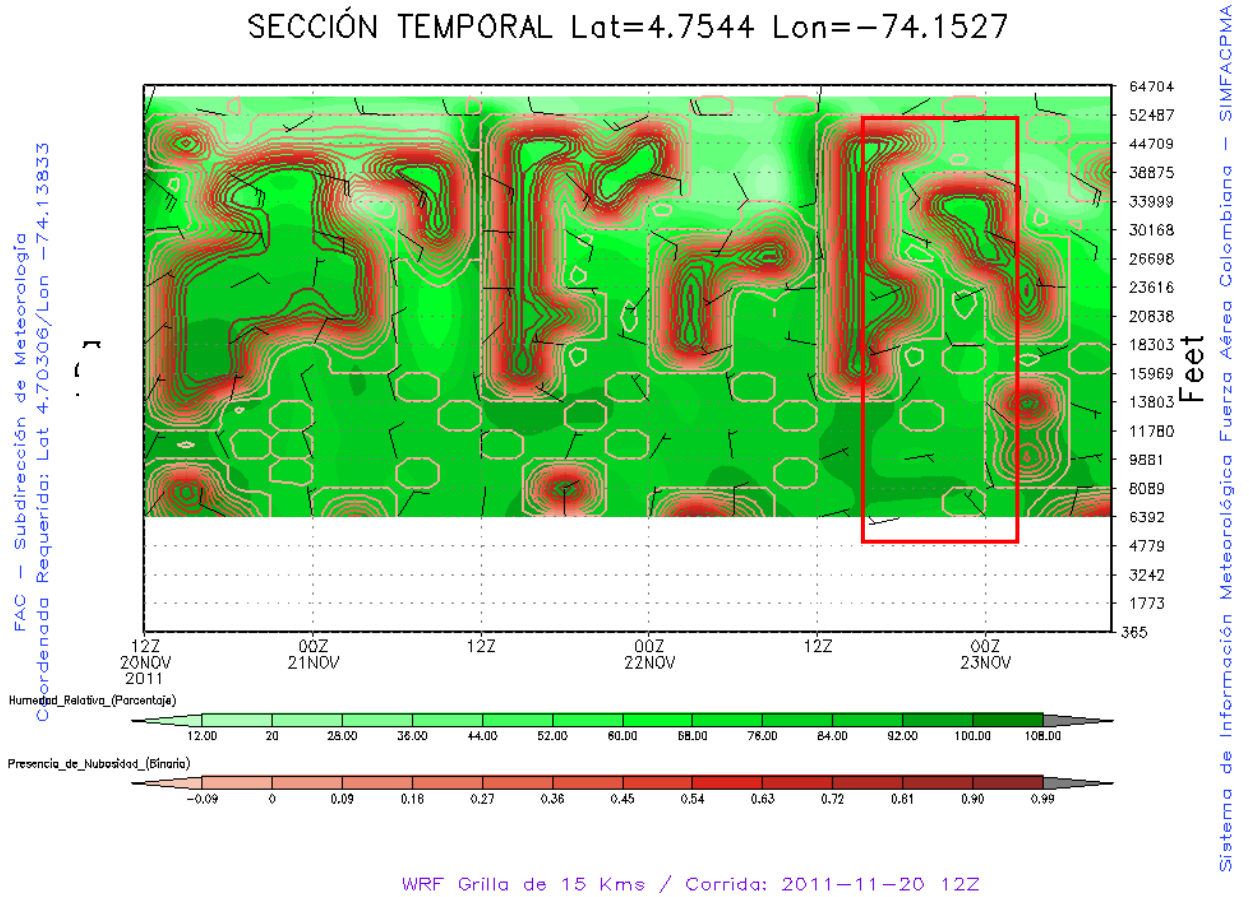


Figura 94: Sección temporal del SKBO de la corrida del 20 de noviembre de 2011 a las 12 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas.

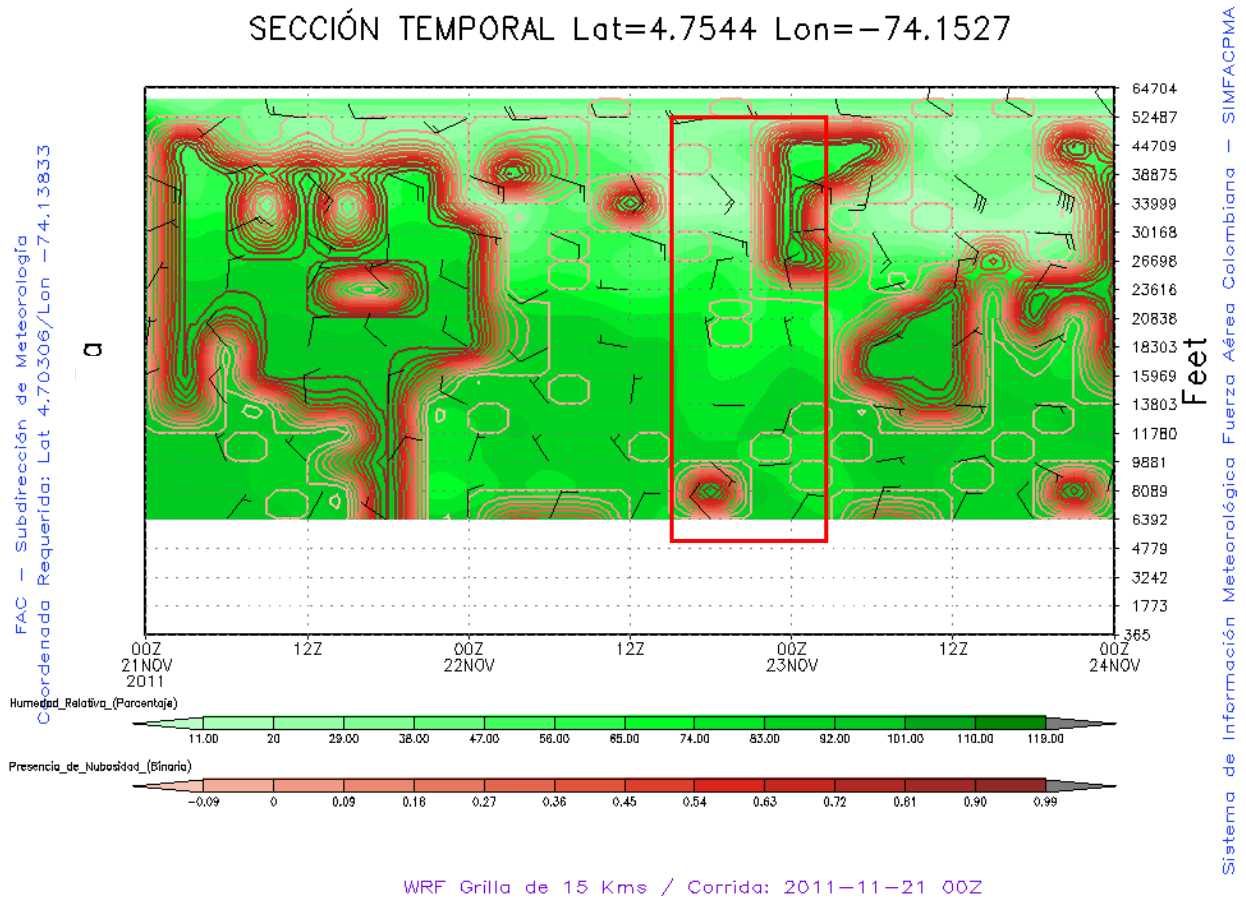


Figura 95: Sección temporal del SKBO de la corrida del 21 de noviembre de 2011 a las 00 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas.

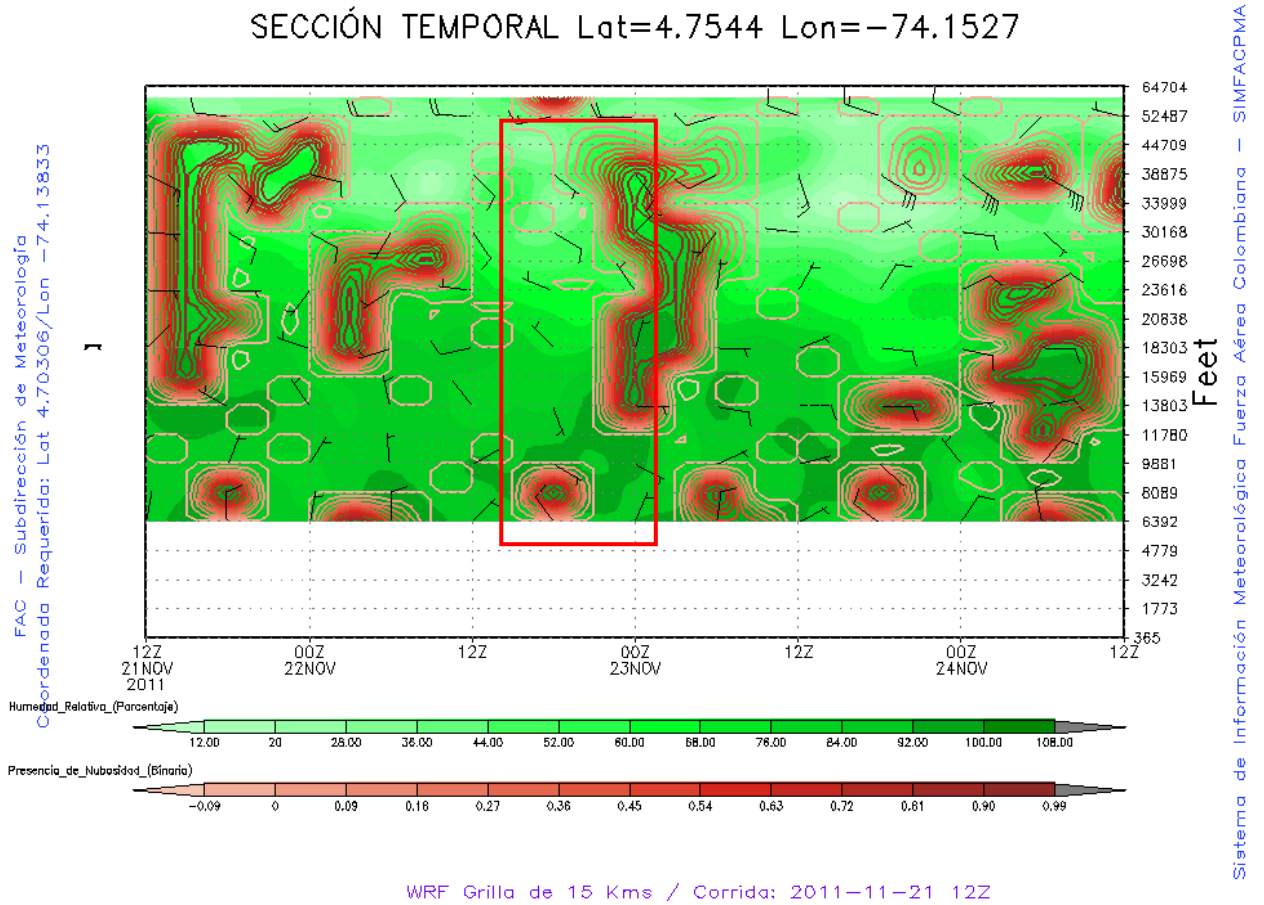


Figura 96: Sección temporal del SKBO de la corrida del 21 de noviembre de 2011 a las 12 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas.

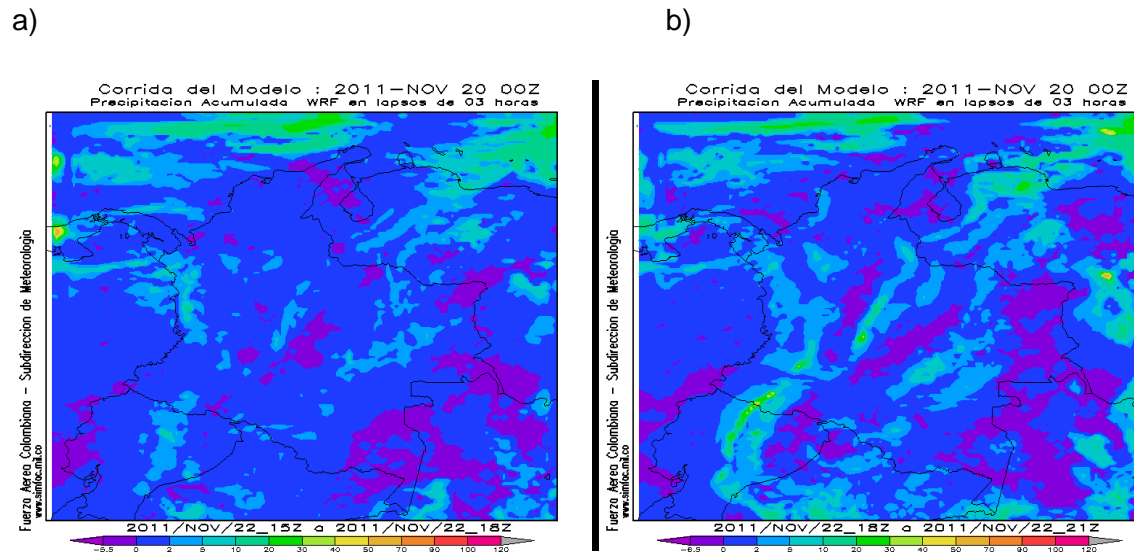


Figura 97: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 20 de noviembre de 2011, para el 22 de noviembre de 2011 entre las 18 UTC (a) y las 21 UTC (b)

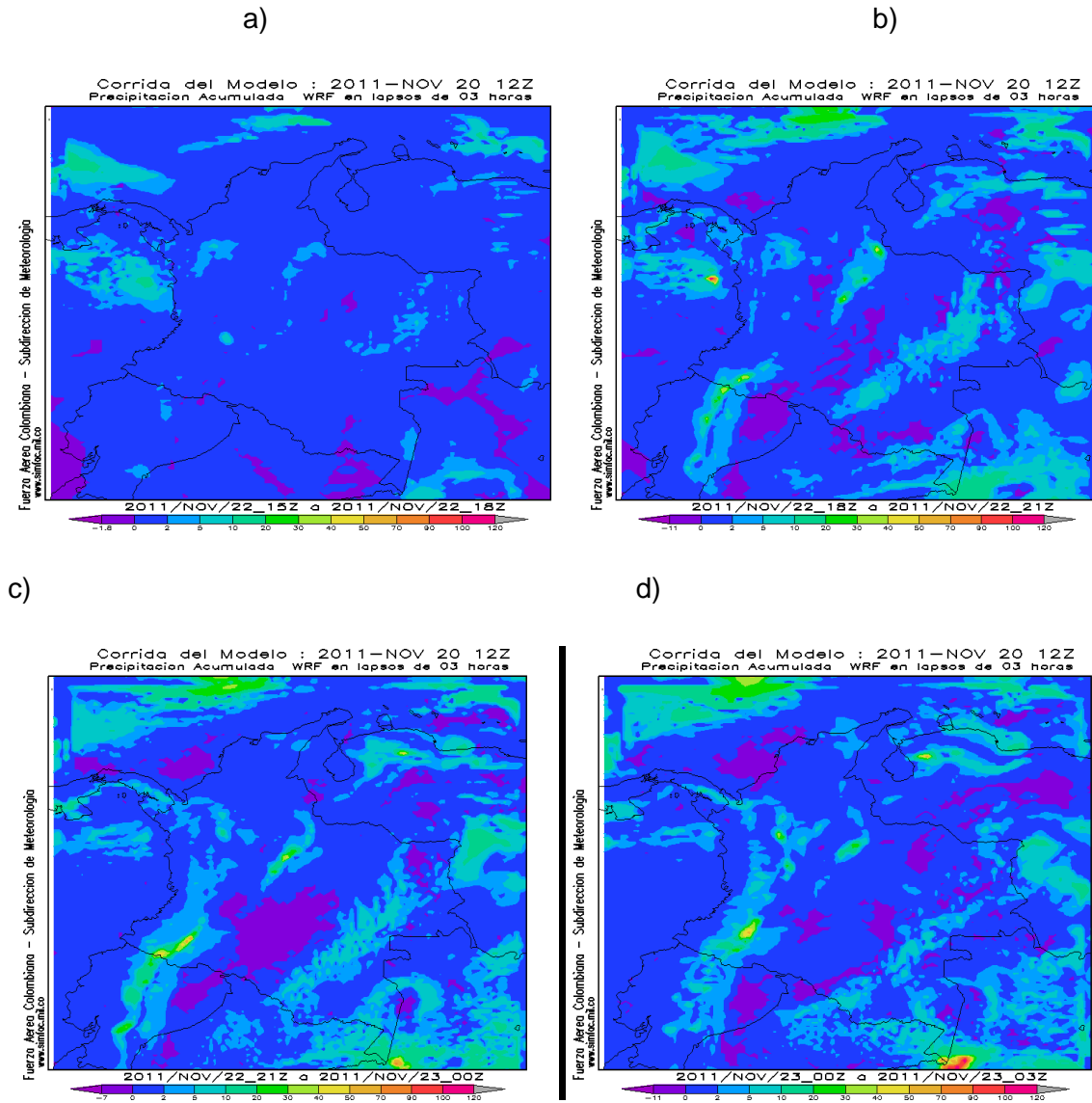


Figura 98: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 20 de noviembre de 2011, para el 22 de noviembre de 2011 a las 18 UTC (a), 21 UTC (b) y 00 UTC (c) y las 03 UTC (d) del 23 de noviembre de 2011

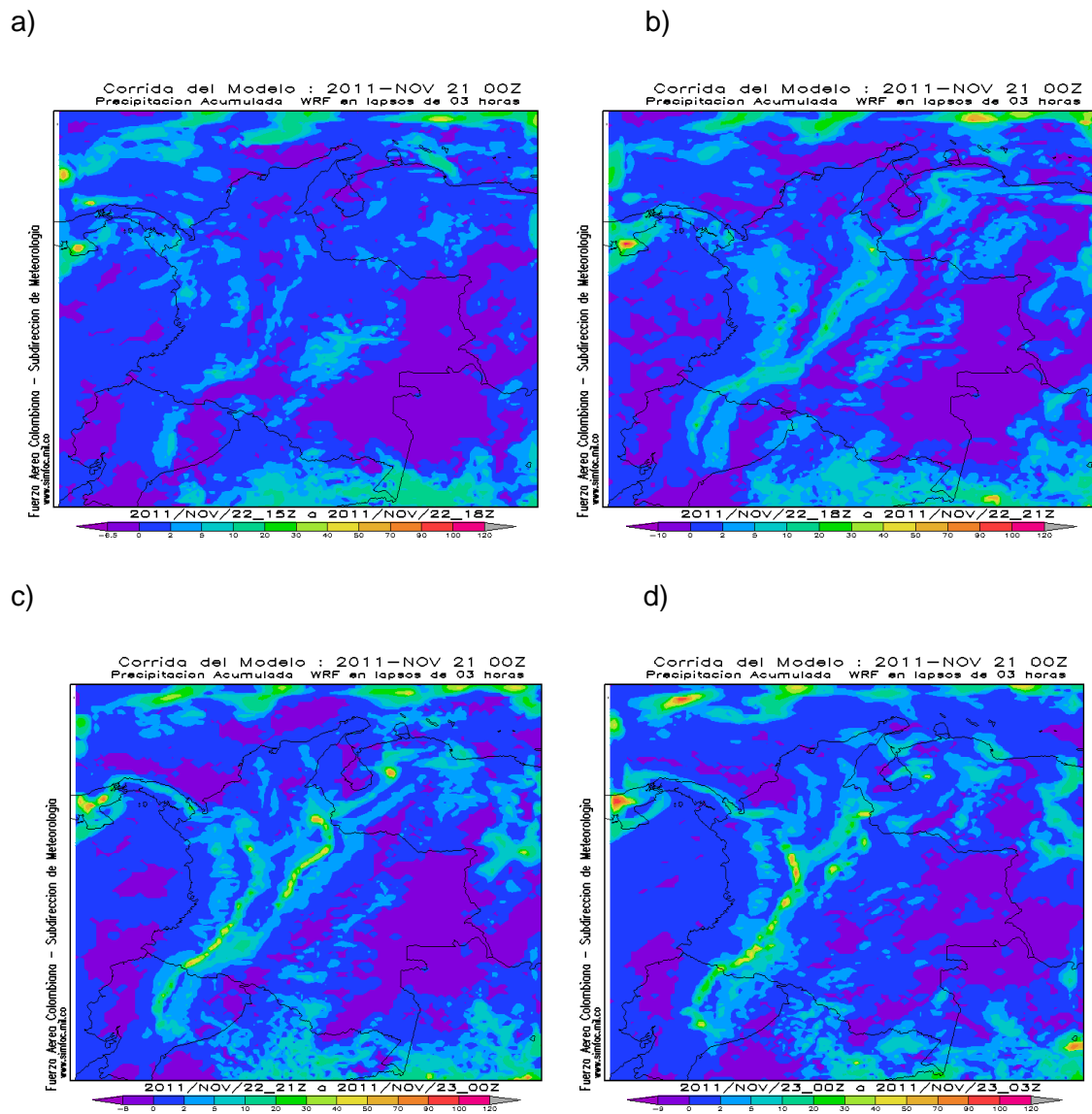


Figura 99: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 21 de noviembre de 2011, para el 22 de noviembre de 2011 entre las 18 UTC (a), 21 UTC (b) y 00 UTC (c) y las 03 UTC (d) del 23 de noviembre de 2011

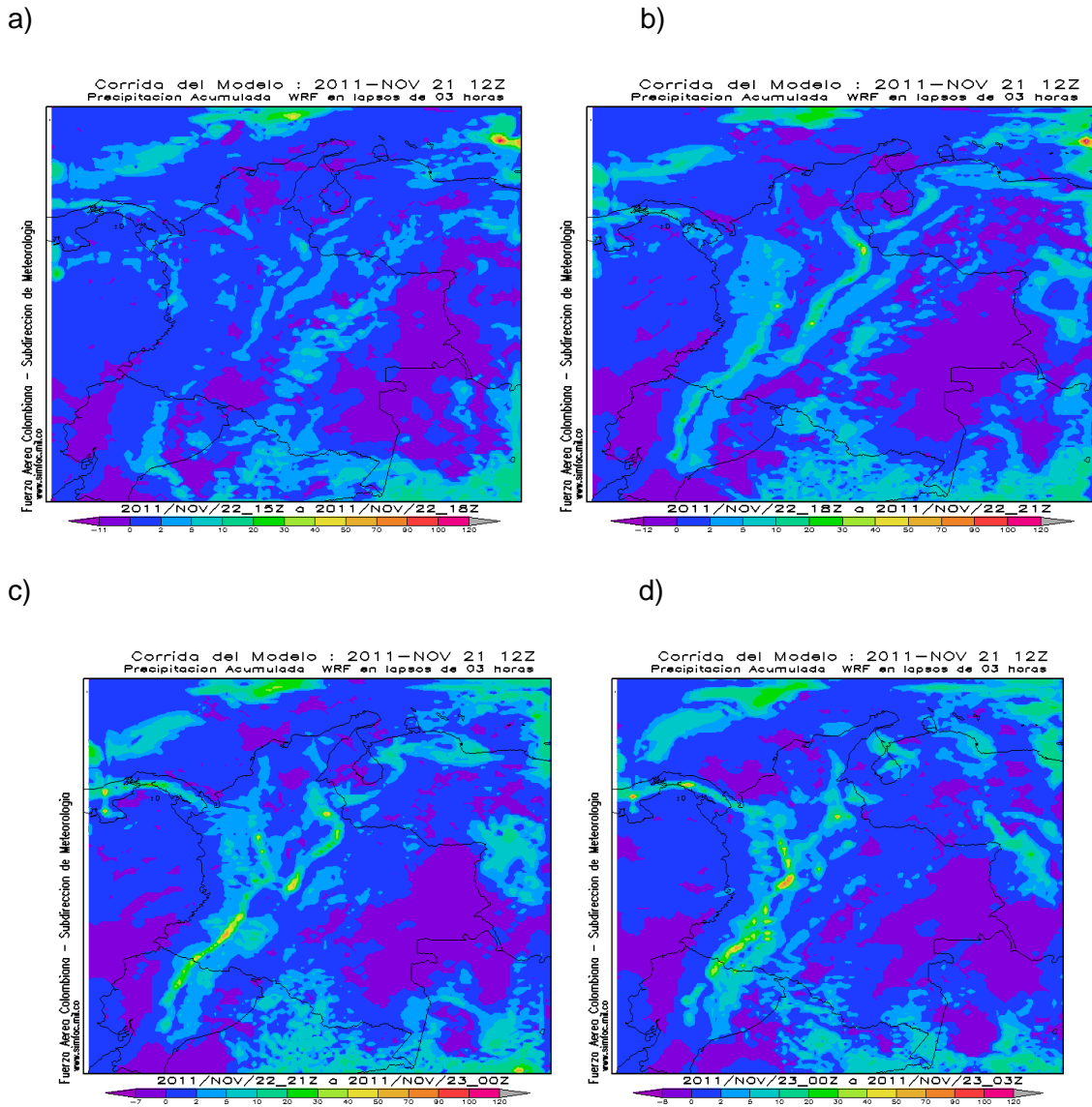
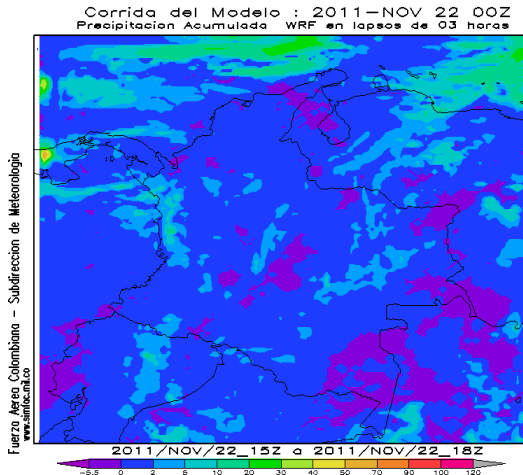
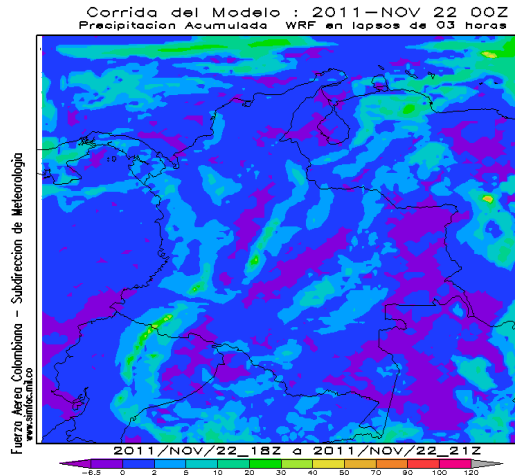


Figura 100: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 21 de noviembre de 2011, para el 22 de noviembre de 2011 entre las 18 UTC (a), 21 UTC (b) y 00 UTC (c) y las 03 UTC (d) del 23 de noviembre de 2011

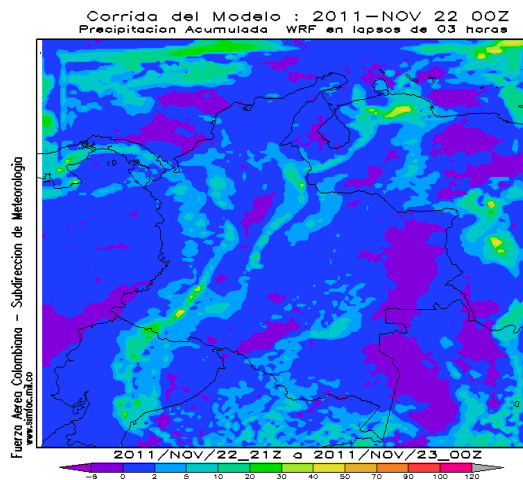
a)



b)



c)



d)

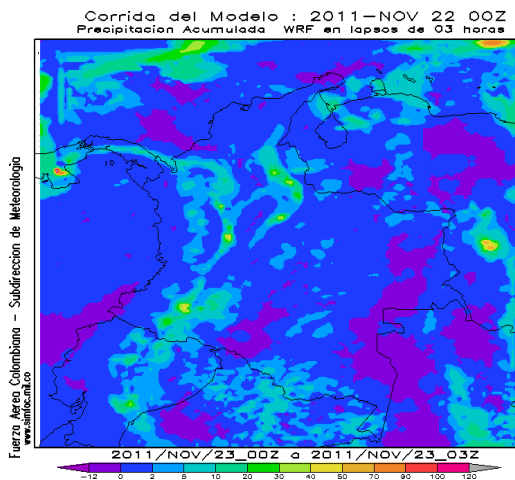
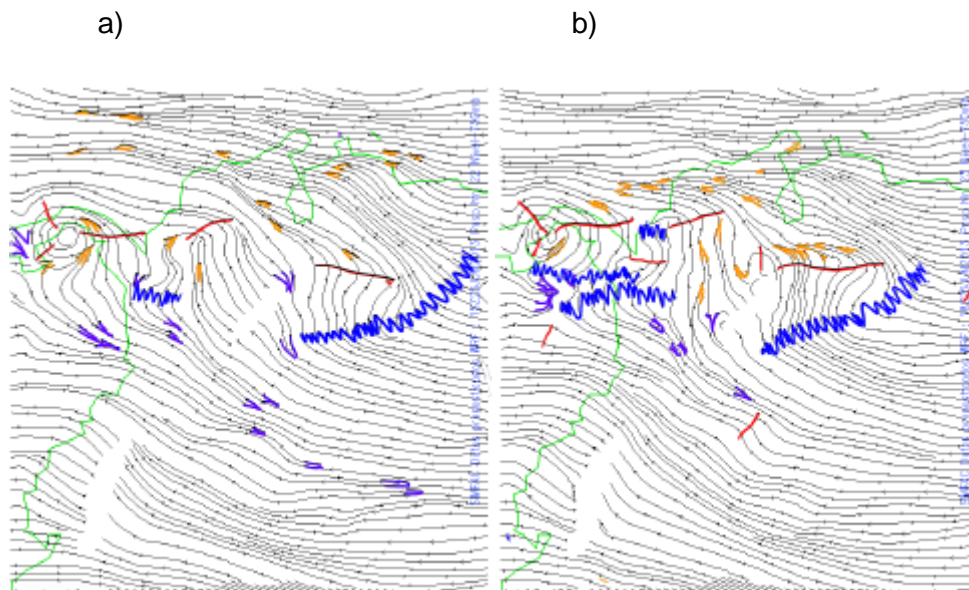


Figura 101: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 22 de noviembre de 2011, para el 22 de noviembre de 2011 entre las 18 UTC (a), 21 UTC (b) y 00 UTC (c) y las 03 UTC (d) del 23 de noviembre de 2011

E. Anexos: Corridas del modelo WRF 2.1.1 para el tercer caso del 25 de junio de 2013



c)

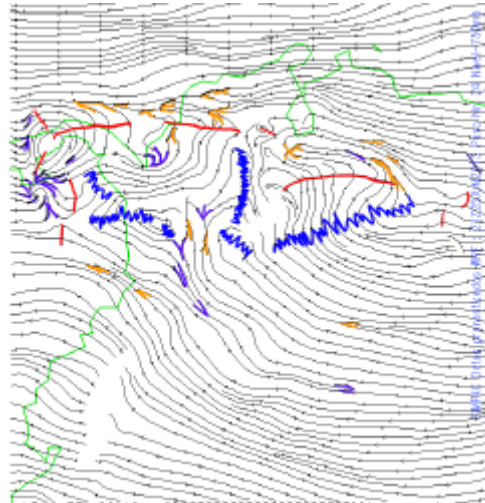


Figura 102: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 23 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 a las 15 UTC (a), 18 UTC (b) y 21 UTC (c)

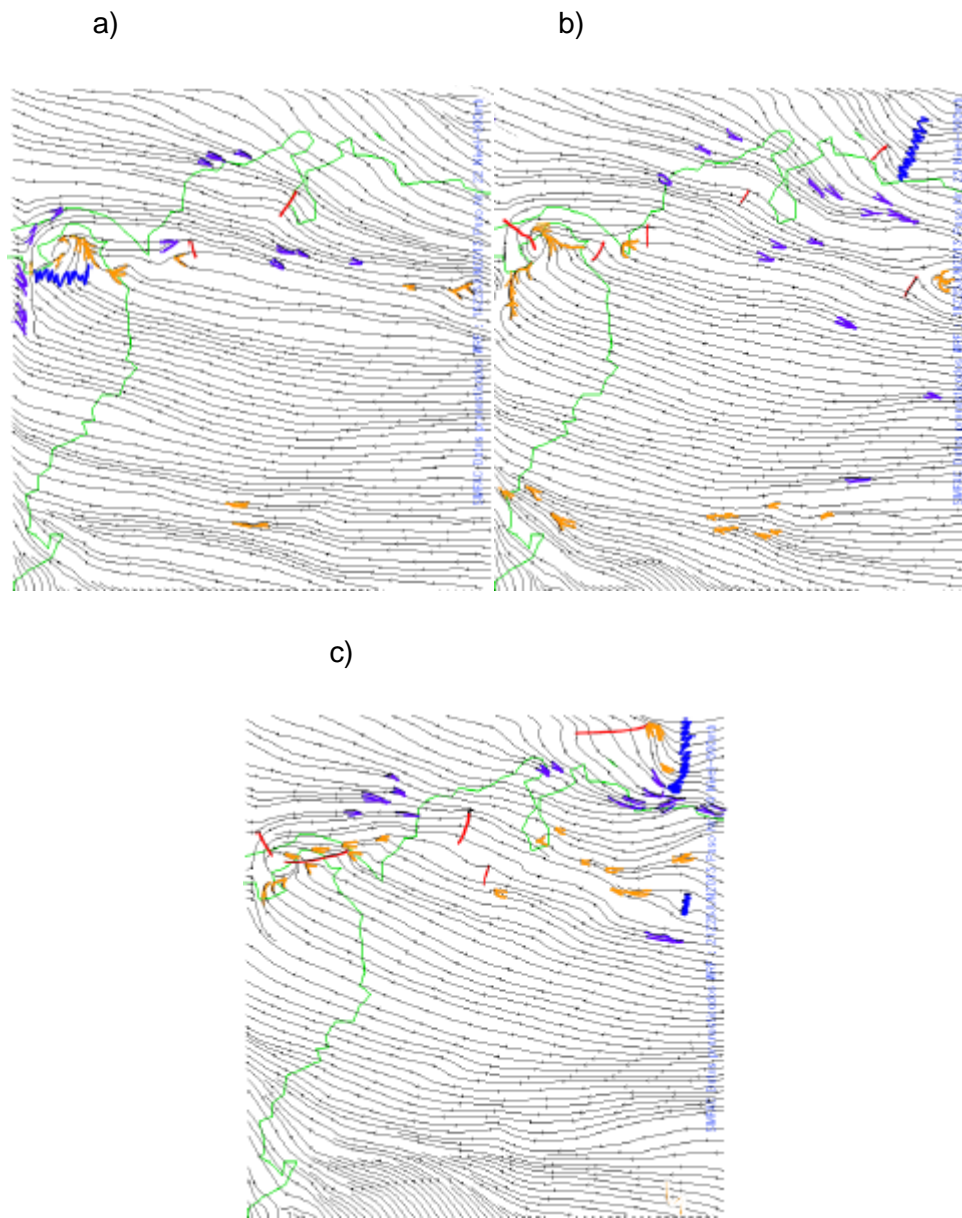


Figura 103: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 23 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 a las 15 UTC (a), 18 UTC (b) y 21 UTC (c)

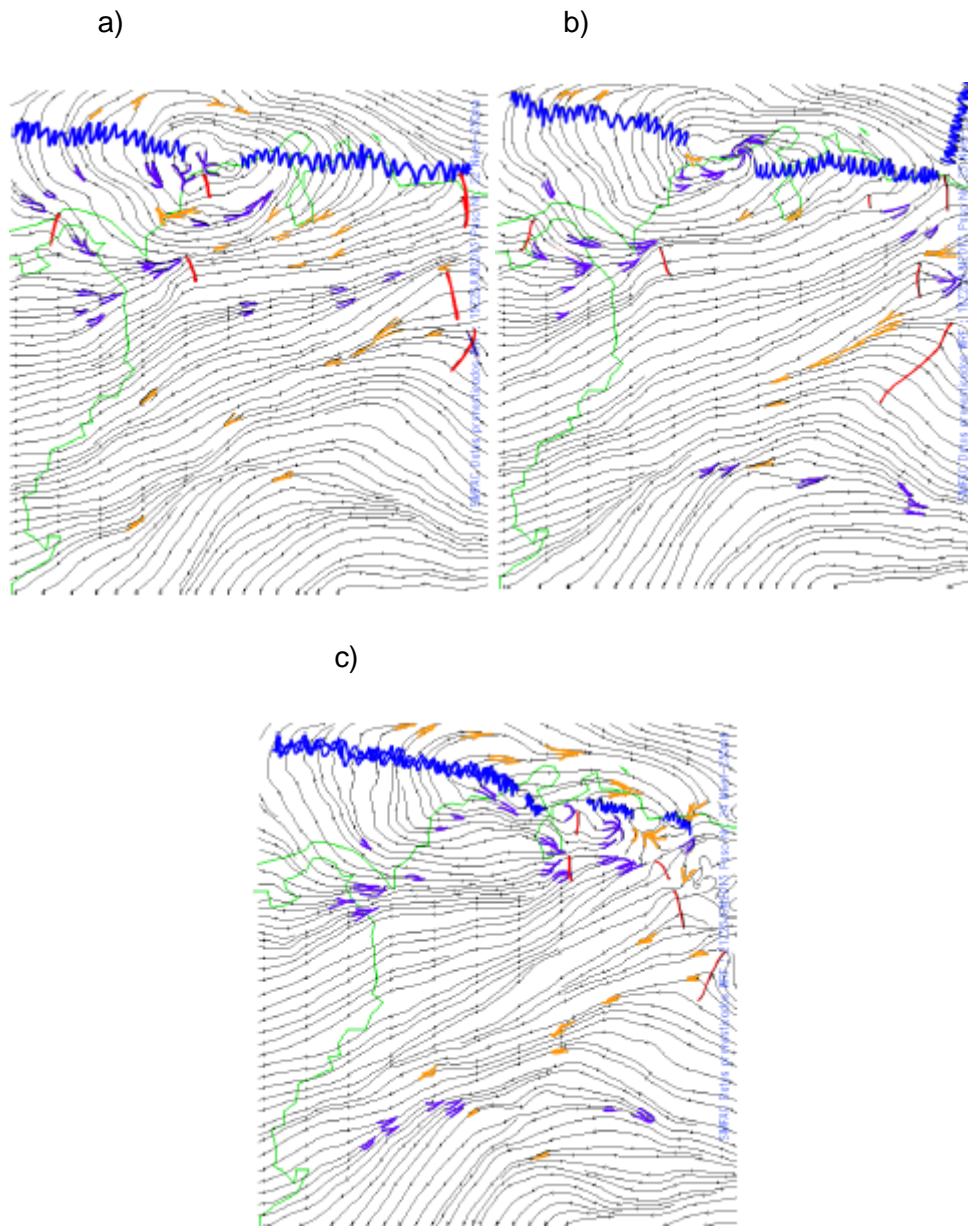


Figura 104: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 23 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 a las 15 UTC (a), 18 UTC (b) y 21 UTC (c)

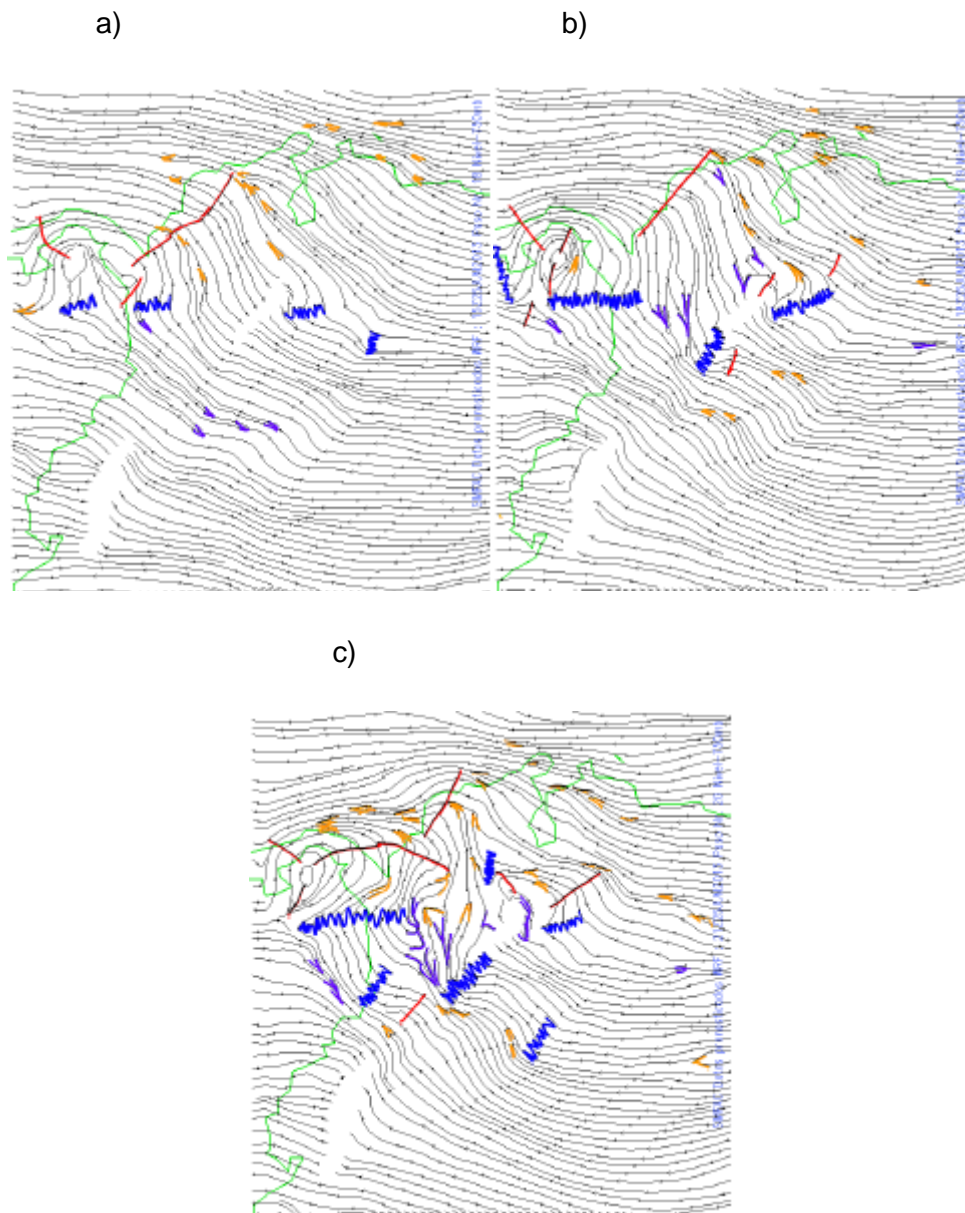


Figura 105: Mapa de vientos a 750 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 23 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 a las 15 UTC (a), 18 UTC (b) y 21 UTC (c)

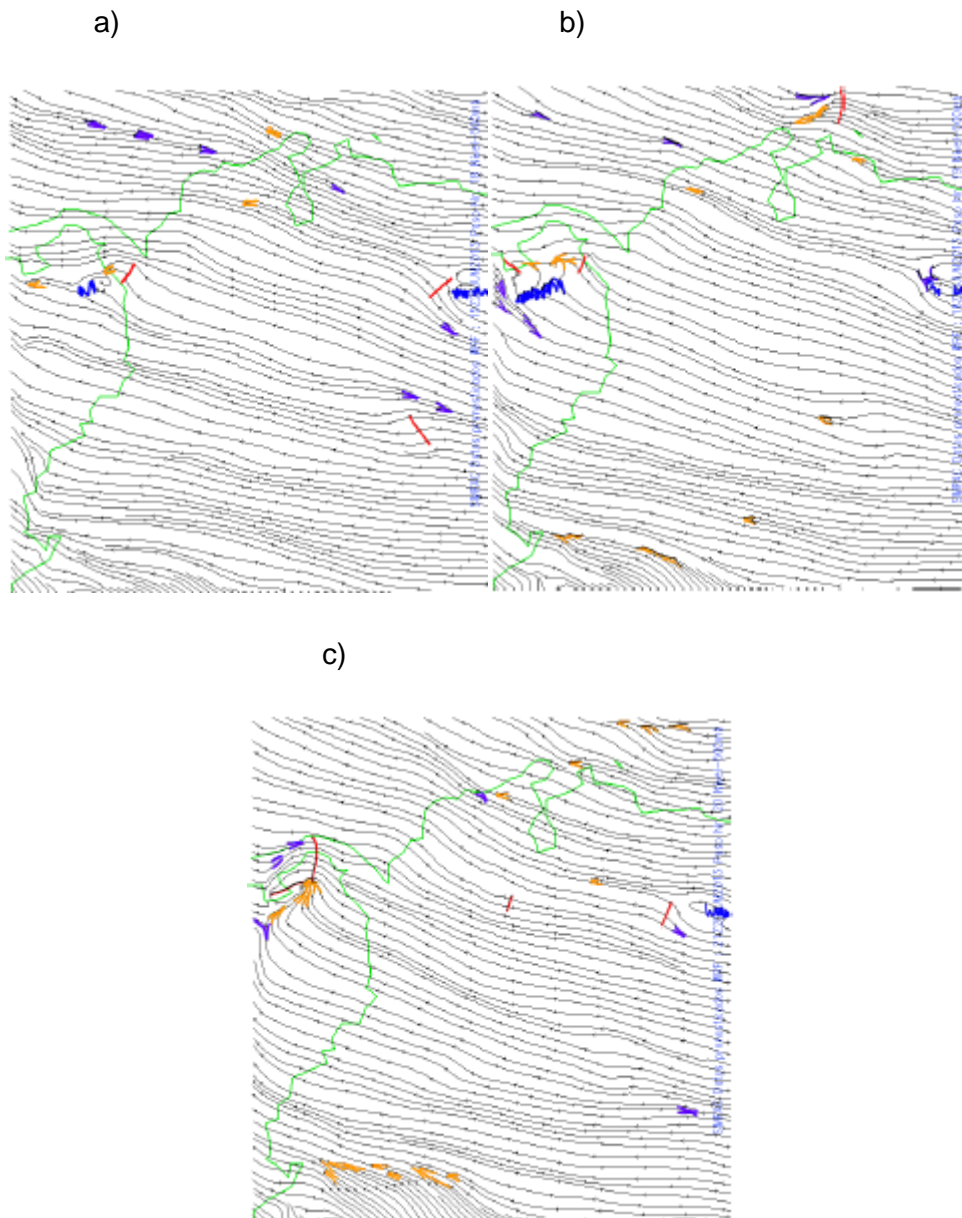


Figura 106: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 23 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 a las 15 UTC (a), 18 UTC (b) y 21 UTC (c)

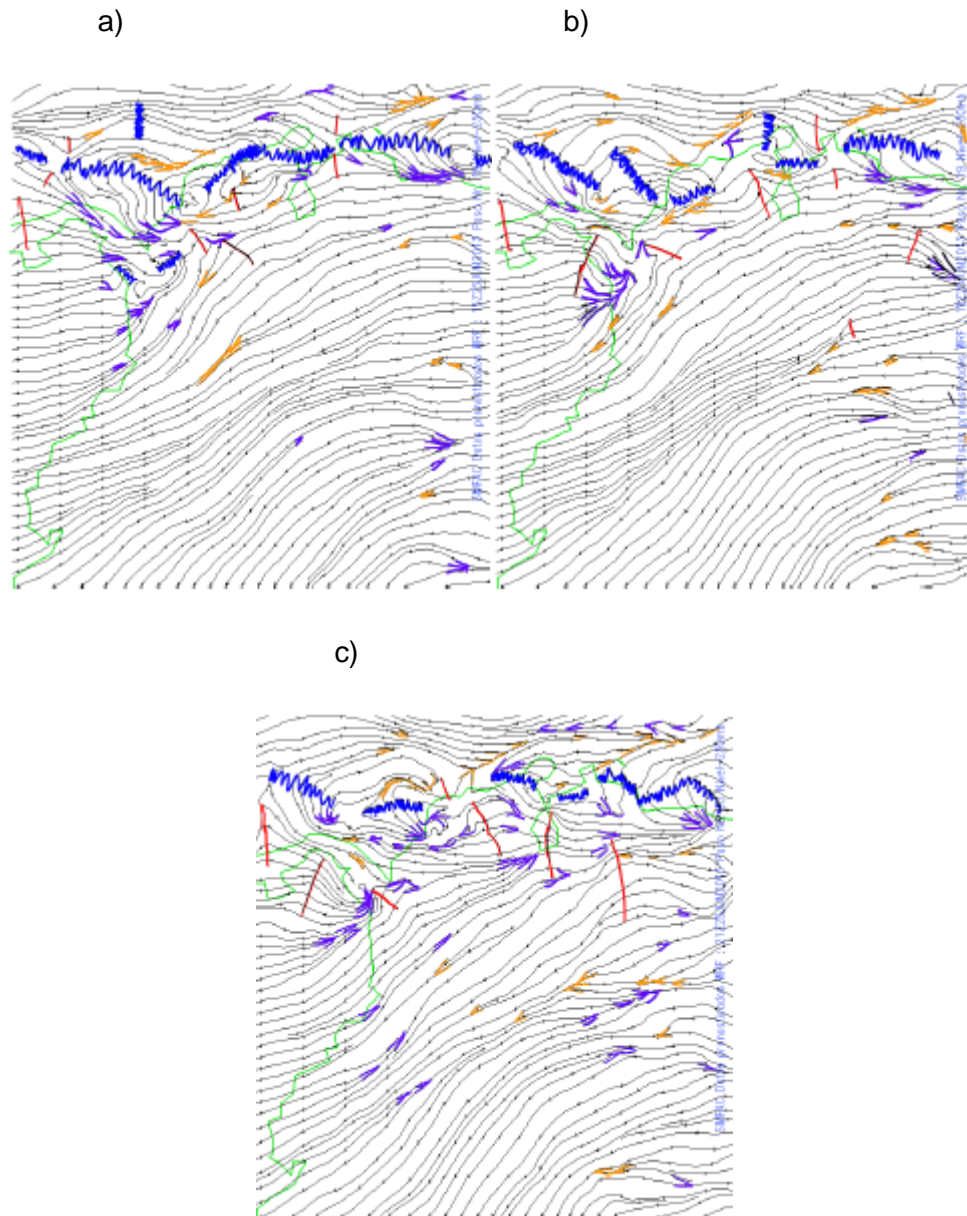


Figura 107: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 23 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 a las 15 UTC (a), 18 UTC (b) y 21 UTC (c)

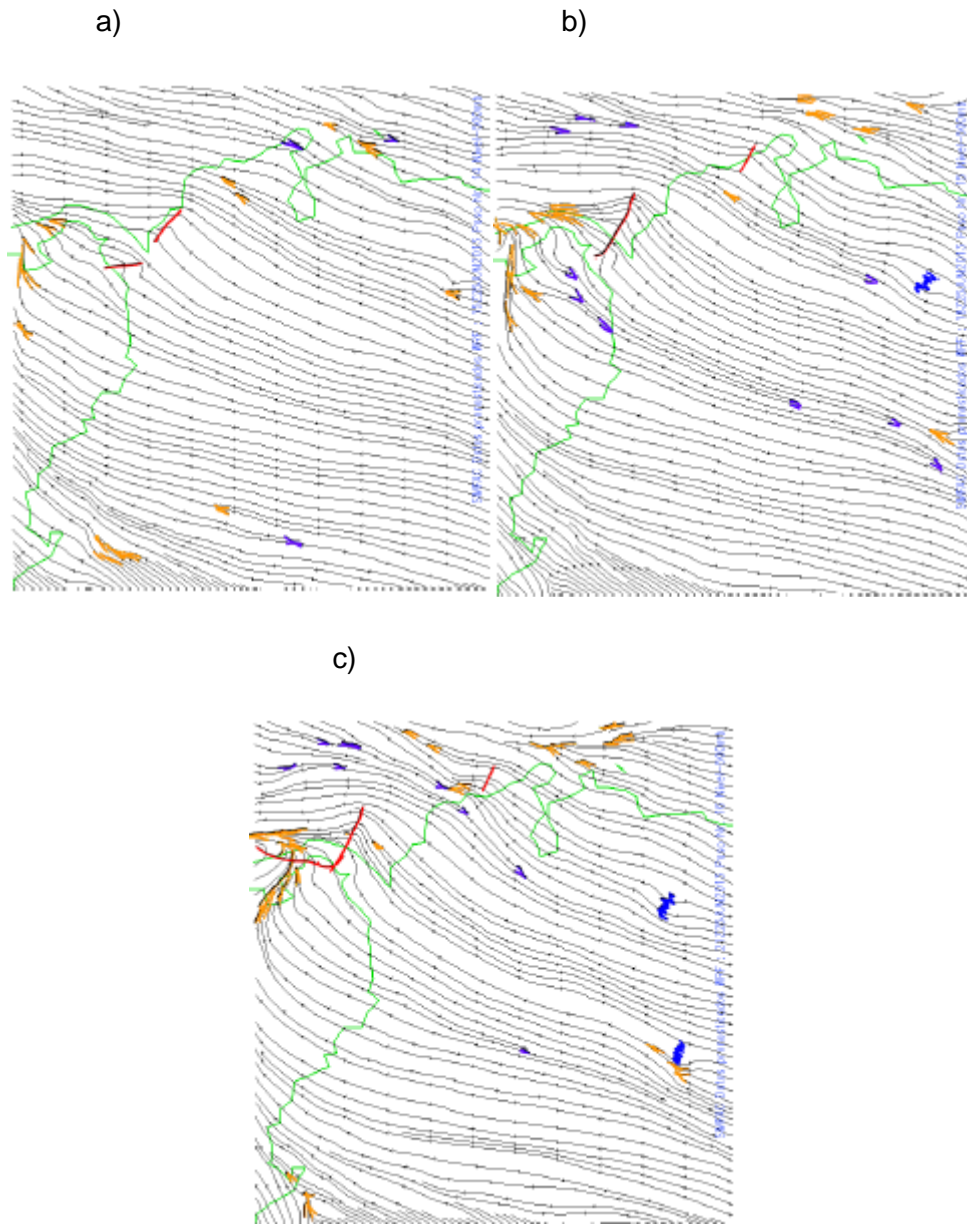


Figura 109: Mapa de vientos a 500 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 24 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 a las 15 UTC (a), 18 UTC (b) y 21 UTC (c)

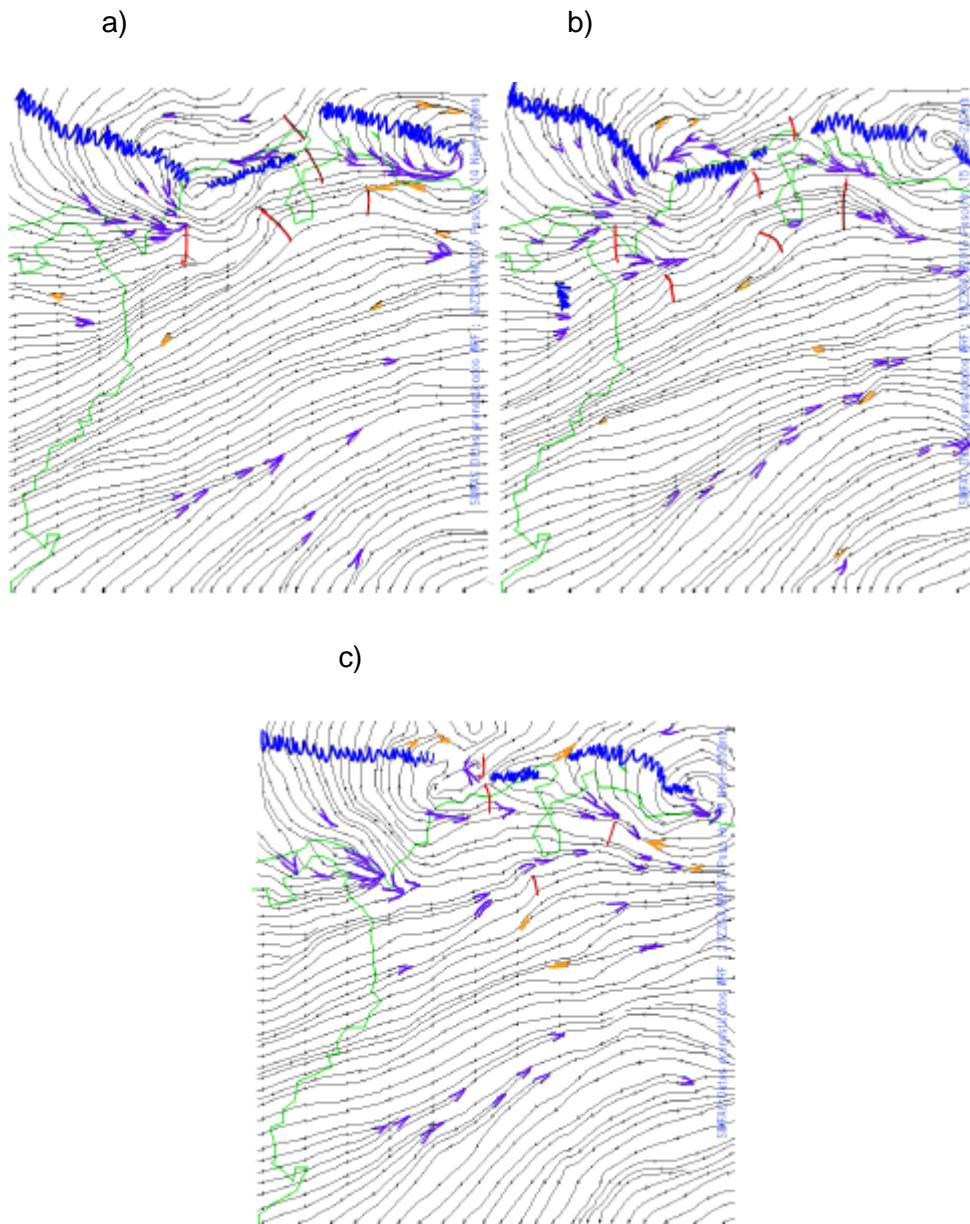


Figura 110: Mapa de vientos a 250 mb de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 24 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 a las 15 UTC (a), 18 UTC (b) y 21 UTC (c)

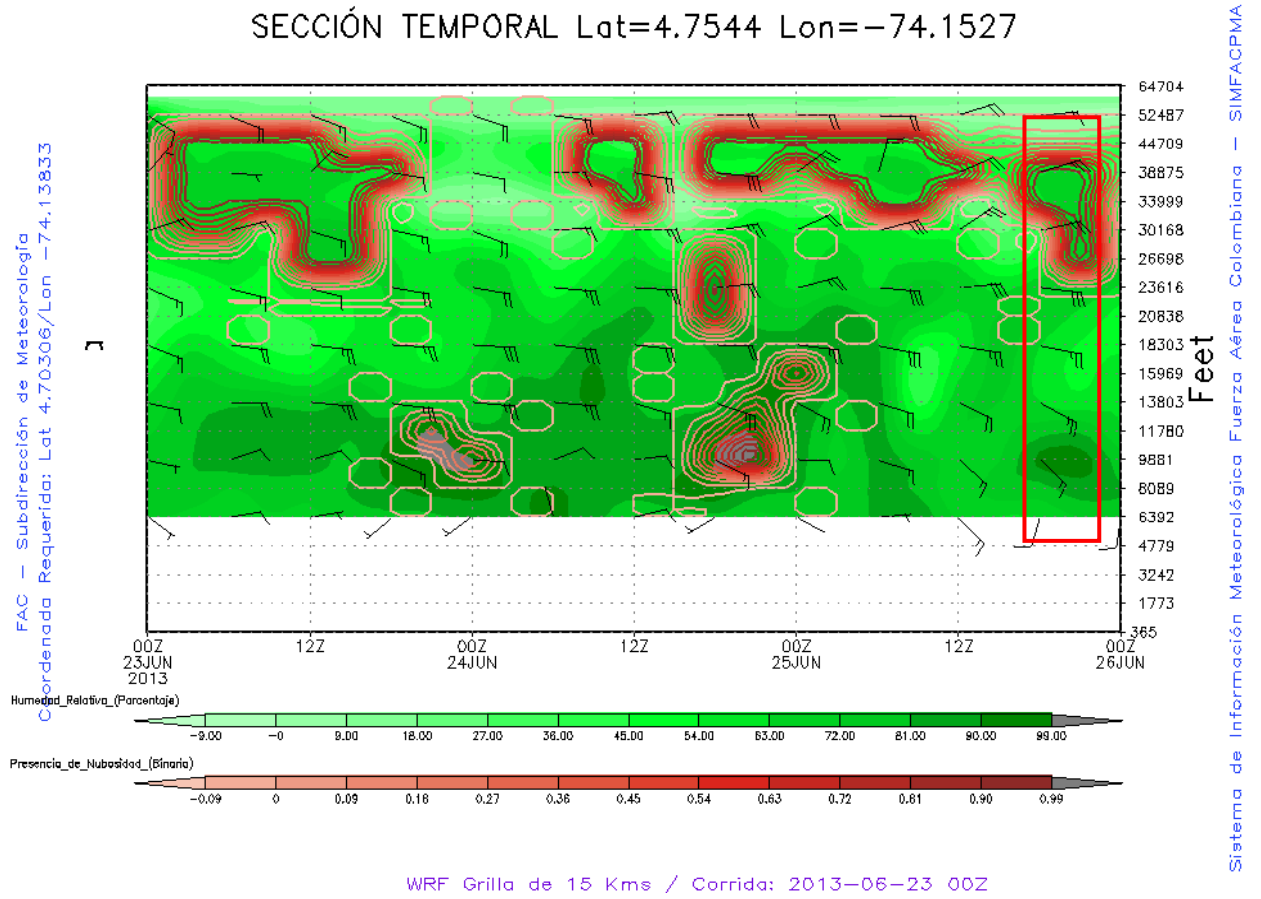


Figura 111: Sección temporal del SKBO de la corrida del 23 de junio de 2013 a las 00 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas.

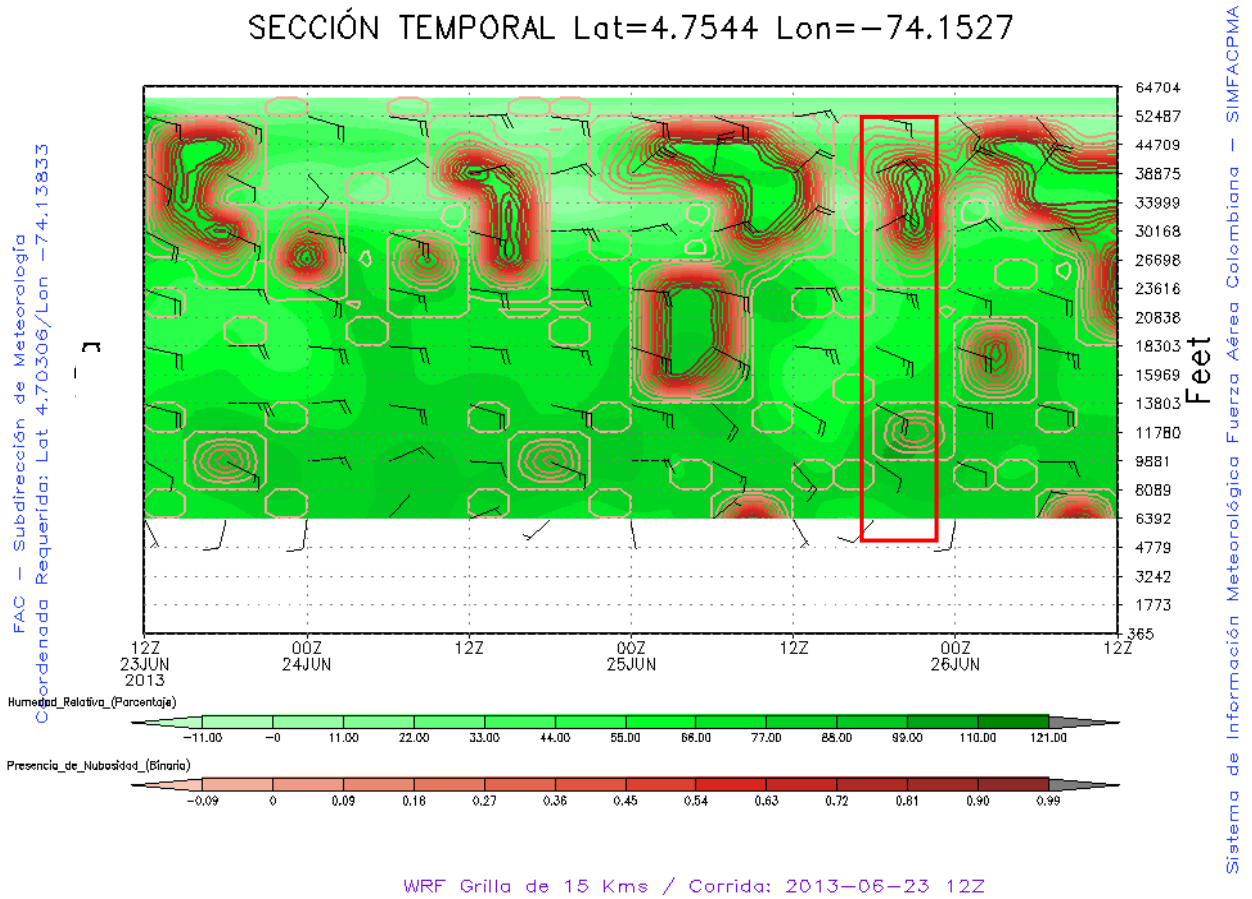


Figura 112: Sección temporal del SKBO de la corrida del 23 de junio de 2013 a las 12 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas.

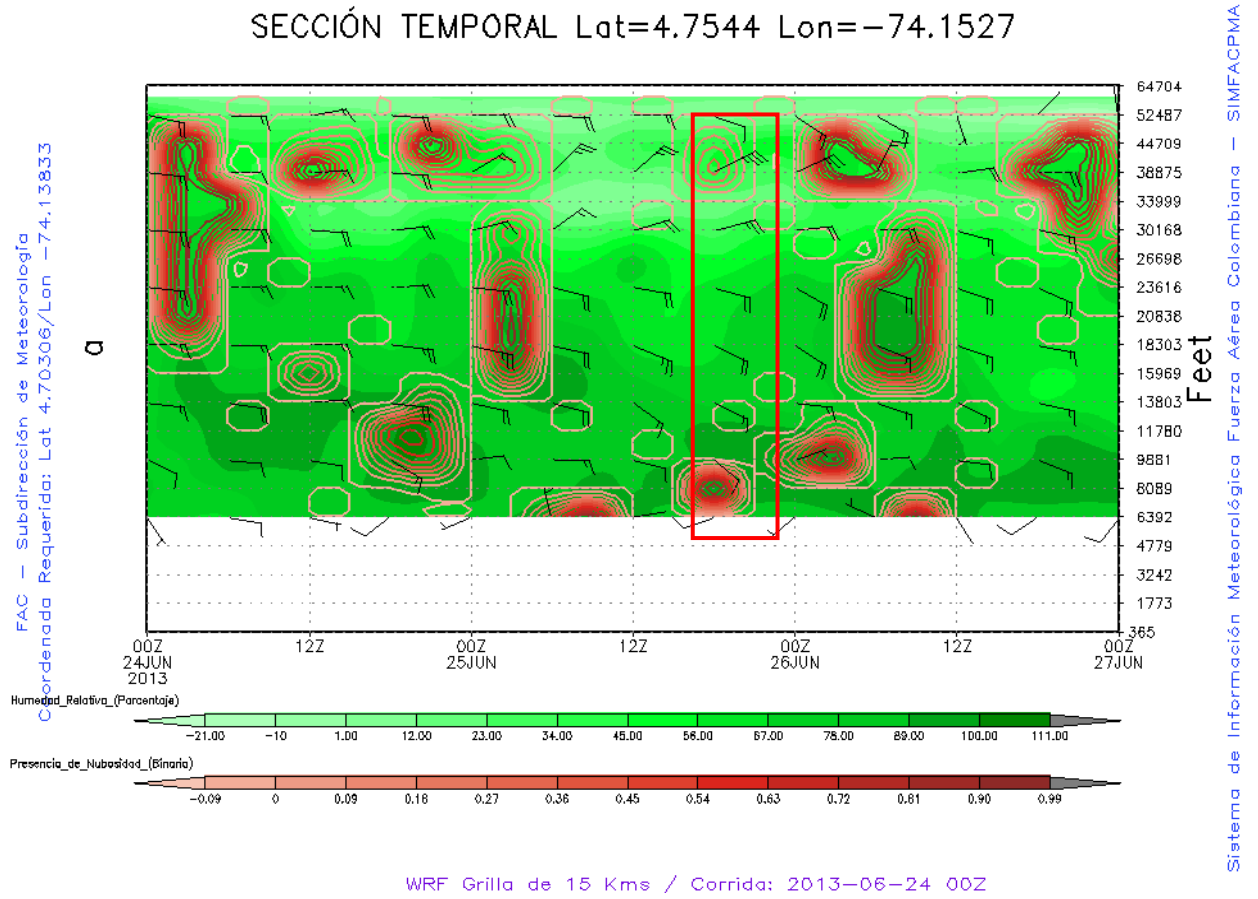
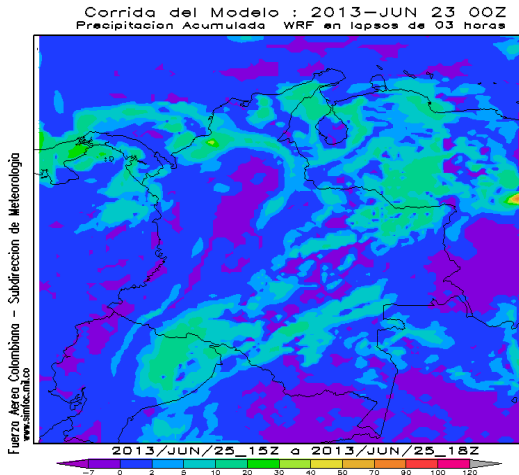


Figura 113: Sección temporal del SKBO de la corrida del 24 de junio de 2013 a las 00 UTC, generada con las variables humedad relativa [porcentaje] (verde), Presencia de Nubosidad [binaria] (roja) y Viento [Kt] graficado en vectores o barbas.

a)



b)

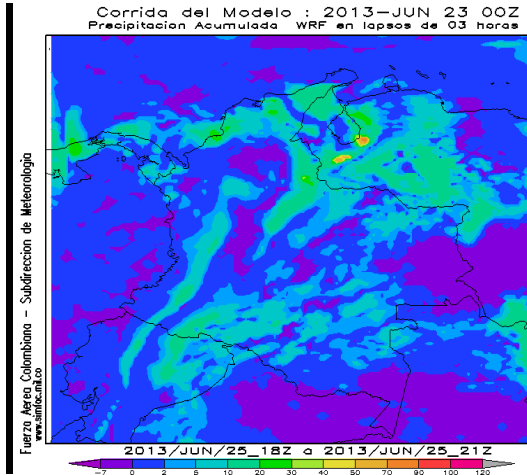
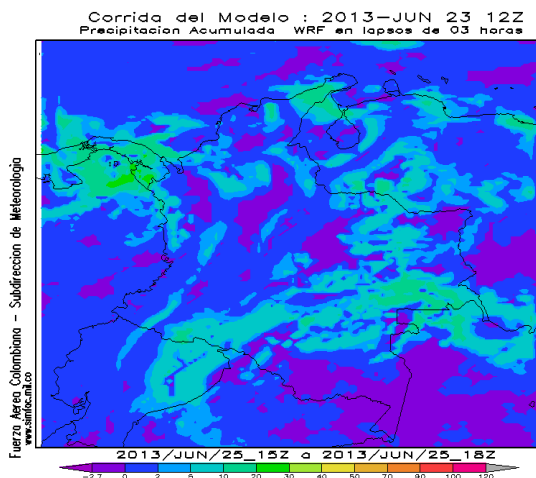


Figura 114: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 23 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 entre las 18 UTC (a) y 21 UTC (b)

a)



b)

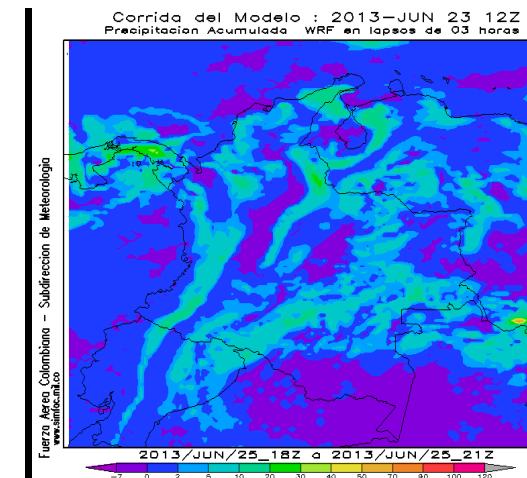


Figura 115: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 12 UTC del 23 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 entre las 18 UTC (a) y 21 UTC (b)

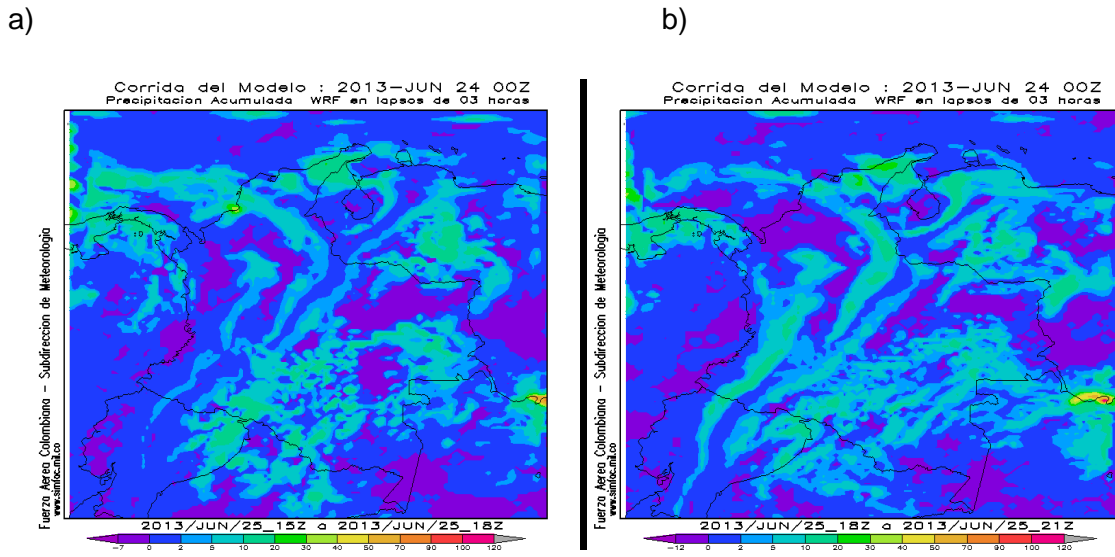


Figura 116: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 24 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 entre las 18 UTC (a) y 21 UTC (b)

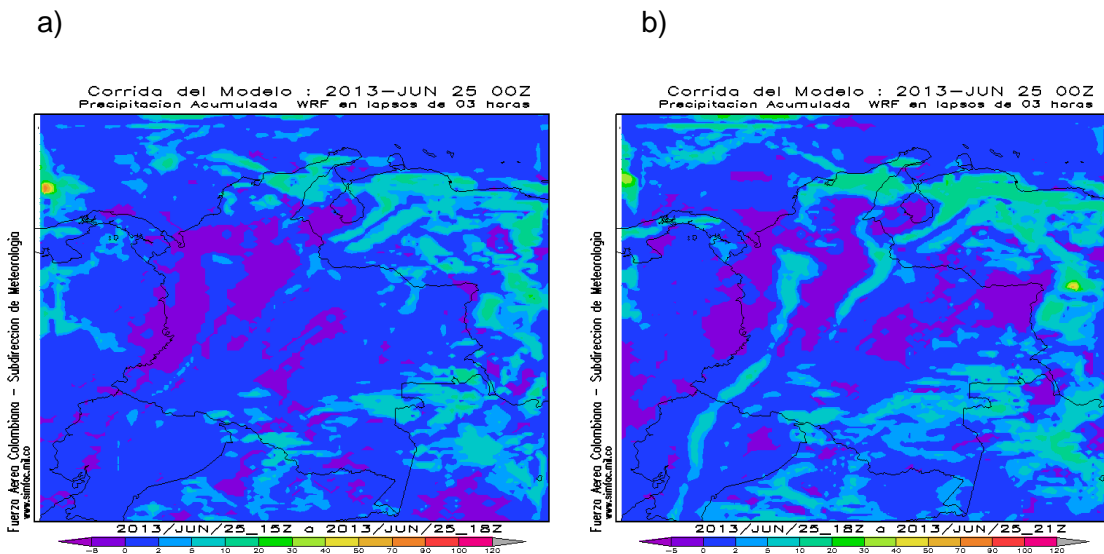


Figura 117: Mapa de precipitación acumulada cada 3 horas de la corrida del WRF 2.1.1 de la FAC de las 00 UTC del 25 de junio de 2013, para el 25 junio de 2013 entre las 18 UTC (a) y 21 UTC (b)

Bibliografía

Airports Council International - ACI World Airport Traffic Report; movimientos de carga por aeropuertos de América Latina, 2013.

Carrascal, M.P.2008.El medio atmosférico: meteorología y contaminación. Publications I Edicions de la Universitat de Barcelona. Barcelona.

Cardenas, Yadira. Análisis de las condiciones a gran escala y escala local para el pronóstico de tormentas eléctricas en Barranquilla. Bogotá D.C.: Tesis para optar el título de Magister en Ciencias-Meteorología en la Universidad Nacional de Colombia, 2003.

Carvajal et Al. Using MSG-SEVIRI Cloud Physical Properties and Weather Radar Observations for the Detection of Cb/Tcu Clouds. Estados Unidos: Journal of applied Meteorology and Climatology; 2011, vol 50.

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. (2015). Zona de Confluencia Intertropical. Abril 24, 2015, de Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas - C I O H Sitio web: <http://www.cioh.org.co/meteorologia/Climatologia/ClimatologiaCaribe3.php>

Cotton, W. R. E R. A. Anthes. Storm and cloud dynamics. Estados Unidos: Academic Press; 1989.

Cotton, W. R., M.-S. Lin, R.L. McAnelly and C. J. Tremback. A composite model of mesoscale convective complexes. Mon. Wea. Rev; 1989.

Eslava, J. Apuntes De Meteorología Y Climatología Regional. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia – sede Bogotá, Facultad de Geociencias; 1994.

Flores, R.2011. El suelo de cultivo y las condiciones climáticas. Ediciones Paraninfo, S.A. España.

Frazer, J. (2015). Señales de radar características de tiempo convectivo. Abril 21,2015, de COMET Sitio web:

http://download.comet.ucar.edu/msanchez/W_modulos/radar/severe_signatures_es/navmenu.php?printname=print_pulse_and_multicell.htm&page=1.0.0

Glynn, H. & H. Gary. 1999. Ingeniería Ambiental. Prentice Hall. México.

Guerrero Higuera, Á. M., García Ortega, E., Matellán Olivera, V., & Sánchez Gómez, J. L. Procesamiento paralelo de los pronósticos meteorológicos del modelo WRF mediante NCL: 2013.

Hoyos, I., Baquero-Bernal, A., Jacob, D. and Rodríguez, B.A. (2012): Variability of extreme events in the Colombian Pacific and Caribbean catchment basins, 2012. *Climate Dynamics*, pp. 1-19.

Hoyos, I., Baquero-Bernal, A., Jacob, D., & Rodríguez, B. (2013). Variability of extreme events in the Colombian Pacific and Caribbean catchment basins. *Climate Dynamics*, 40, 1985-2003

Hurtado G. La precipitación en Colombia. Bogotá, Colombia: Nota técnica IDEAM / METEO / 006; 2000.

Jiménez G. Ciclos de los Fenómenos Meteorológicos Adversos a la Operación Bajo Reglas de Vuelo Visual (VFR) en el Aeródromo "Germán Olano". Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia; 2004.

Larocca, S. (2007). Tormentas - Rayos y Truenos. Abril 27, 2015, de TFA Sitio web: http://www.tutiempo.net/silvia_larocca/

León, G. Zea, J. Eslava, J. Circulación general del trópico y la zona de confluencia intertropical en Colombia. *Meteorología Colombiana*; 2000.

Maddox, R. A. Mesoscale convective complexes. Estados Unidos: *Bulletin American Meteorological Society*; 1980, vol 61.

Manual de normas y procedimientos Fuerza Aérea, 2014.

Manual de Usuario SIMFAC, 2009

Met.net. Fenómenos a escala subsinóptica. Abril 19, 2015, de Met.Net Sitio web: <http://www.metnet.8k.com/fenomenos.htm>. 2000.

Michigan Technology Institute. Las nubes (segunda parte). 2015, de Surcando los cielos Sitio web: <http://surcandoloscielos.es/blog/las-nubes-segunda-parte/>.2010

Montoya, G & J. Eslava, (2000): Análisis de las condiciones que favorecen el desarrollo de la actividad convectiva y de las tormentas eléctricas en la Sabana de Bogotá. Geofísica. Colombiana., 4: 23-30.

Parafly. Los Torrecúmulos o Cumulus Congestus. Abril 23,2015, de PARAFLY Sitio web: http://clubparafly.com.ar/dev/publicaciones_detalle.php?p=346&seccion=1&PHPSESSID=824b42a52afc0859cb1b3f035f013b01 (consultada en noviembre 2014)

Poveda G, Zuluaga M, Mejía J. (2004) DIAGNÓSTICO DE SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA SOBRE COLOMBIA DURANTE 1998-2002.XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica Sao Paulo, Brasil, Octubre 2004.

Programa de Meteorología Aeronáutica.. Tormentas. Abril 27, 2015, de IDEAM Sitio web: <http://bart.ideam.gov.co/infgen/tormentas.htm>, 2015.

Ramírez, P.A. Ciclos de los fenómenos meteorológicos adversos a la operación bajo reglas de vuelo por instrumentos en el aeropuerto internacional “El Dorado” (Bogotá). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, D.C, Colombia. 2012.

Reyes, S. Introducción a la Meteorología. Sverre Petterssen. Méjico, 2001

Rojas, P. Ciclos de los fenómenos meteorológicos adversos a la operación bajo reglas de vuelo por instrumentos en el Aeropuerto Internacional “El dorado”. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2012.

Sakagami, T. (2009). El fenómeno de la Oscilación del Sur-El Niño (ENSO). Abril 25,2015, de Instituto de Tecnologías Educativas Sitio web: http://fjferreer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion05/1_el_fenmeno_de_la_oscilacin_del_surel_nio_enso.html

Solarte, M. (2007). Cumulonimbus. 2015, de GrupoAIDA Sitio web: http://www.cca.org.mx/cca/cursos/AIDA/Las_nubes_y_la_observacion_climatica_v2.0/ch04s01.html

Tullot, I. 2007. Climatología de España y Portugal. Ediciones Universidad Salamanca. Salamanca.

UAEAC. Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. Circular técnica reglamentaria 047. Procedimiento de estandarización de los reportes de Meteorología Aeronáutica UAEAC-IDEAM. Bogotá, Colombia: 2012

UAEAC. Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. Indicadores Industria Aeronáutica Colombiana / Economía. Bogotá, Colombia: 2009 (a).

UAEAC. Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. Informe Financiero Del Transporte Aéreo Colombiano. Bogotá, Colombia: 2009 (b).

Uribe, A (2012). Estimación de la capacidad del modelo WRF para pronosticar eventos extremos asociados con altas precipitaciones en la región Andina Colombiana. Tesis de Maestría en Ciencias Meteorología. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia: 2012.

Villalobos, R. (2009). El fenómeno ENOS la niña: fase fría del ENOS. Abril 25, 2015, de Instituto Meteorológico Nacional Sitio web: http://www.imn.ac.cr/educacion/enos/nina_ff8.html

Weisman, M. (1996). Impulso horizontal e inclinación de la corriente ascendente. Abril 26, 2015, de COMET Sitio web: http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/shear_es/navmenu.php?tab=1&page=3.0.0

Wilks, Daniel S. Statistical methods in the atmospheric sciences / Daniel S. Wilks. – 3rd ed: 2011.

Zipser, E. J. Use of a conceptual model of the life cycle of mesoscale convective systems to improve very-short-range forecasts. New York, Estados Unidos: Nowcasting, K. Browning (Ed.), Academic Press; 1982.

<http://eumetcal.meteo.fr/euromet/spanish/navig/begins.htm> (Consultada en mayo de 2010)

<http://ggweather.com/enso/oni.htm> (Consultada en septiembre de 2014)

<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (Consultada en septiembre de 2014)

<http://www.aerocivil.gov.co/AAeronautica/InvAccidentes/Accidentes/FINAL%20HK4682%20-%20part%20I.pdf> (Consultada en septiembre de 2014)

<http://www.cptec.inpe.br/> (Consultada en mayo de 2010)

<http://www.manualvuelo.com/INS/INS23.html> (Consultada en marzo de 2015)

http://www.meted.ucar.edu/tropical/textbook_2nd_edition_es/navmenu.php?tab=10&page=3.1.2 (Consultada en septiembre de 2014)

<http://www.nsof.class.noaa.gov/saa/products/welcome;jsessionid=F9BA0B29BC7FD055A667A8CAE5F8929D> (Consultada en septiembre de 2014)

<http://www.telemet.com/convert/index.php?js=Ppressurealtitude&table=29&l=es> (Consultada en marzo de 2015)

<http://www.um.es/geograf/clima/tema03.pdf> (Consultada en marzo de 2015)

<https://www.simfac.mil.co/news.php> (Consultada en septiembre de 2014)

http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/mtnval_es/glossary.htm#n (Consultada en agosto de 2015)