

Climatología de Potencial de Englamiento y Eventos de Englamiento Sobre el Territorio Continental Colombiano

Presenta: Kevin Alexander Chicaeme Ordoñez

Director: Ph.D. Astrid Baquero
Departamento de Física
Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C

Co-Director: Ph.D. John F. Mejía
Atmospheric Science Departament
Desert Research Institute. Reno, Nevada

Facultad de Ciencias
Departamento de Geociencias
Maestría en Ciencias, Meteorología
24 de marzo de 2021

Climatología de Potencial de Englamiento y Eventos de Englamiento Sobre el Territorio Continental Colombiano

Tesis de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ciencias, Meteorología

Presenta: Kevin Alexander Chicaeme Ordoñez

Director: Ph.D. Astrid Baquero
Departamento de Física
Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C

Co-Director: Ph.D. John F. Mejia
Atmospheric Science Departament
Desert Research Institute. Reno, Nevada

Línea de Investigación: Meteorología Aeronáutica
Grupo de Investigación: Grupo de Simulación del Sistema Climático Terrestre

Facultad de Ciencias
Departamento de Geociencias
Maestría en Ciencias, Meteorología
24 de marzo de 2021

Dedicado a Amy Alejandra

Mira siempre hacia lo alto, si crees que es posible has lo necesario para conseguirlo y nunca te rindas, pero ante todo sé feliz. Por siempre serás mi orgullo.

Contenido

Resumen	1
Abstract	2
Introducción	4
Estado del Arte	6
1. Climatología Potencial de Englamiento	9
1.1. Potencial de Englamiento	9
1.2. Sistemas Asociados a Englamiento	13
1.2.1. Sistemas locales y de mesoescala asociados a englamiento	13
1.2.2. Sistemas sinópicos y de macroescala asociados a englamiento en Colombia	14
1.3. Datos y Metodología	17
1.3.1. Datos	17
1.3.2. Selección y análisis de algoritmos de potencial de englamiento	26
1.3.3. Algoritmos RAOB	26
1.3.4. Algoritmo CIP-sonde	27
1.3.5. Algoritmo SLWS	33
1.3.6. Comparación de resultados entre algoritmos	33
1.3.7. Metodología para elaboración de la climatología	40
1.4. Discusión y Resultados	41

1.4.1.	Distribuciones tiempo-altitud de potencial de engelamiento	41
1.4.1.1.	Observaciones	41
1.4.1.2.	Algoritmo CIP-sonde-A mediante datos de ERA-5	52
1.4.1.3.	Algoritmo SLWS mediante datos de ERA-5	56
1.4.2.	Distribución geográfica de POTENG	60
1.5.	Conclusiones y Recomendaciones	71
2.	Eventos de Engelamiento de Aeronaves en Colombia	73
2.1.	Datos y Metodología	73
2.1.1.	Datos	73
2.1.2.	Metodología	76
2.2.	Discusión y Resultados	80
2.2.1.	Análisis de eventos de engelamiento de aeronaves en Colombia	80
2.2.2.	Potencial de engelamiento en eventos de aeronaves mediante algoritmos SLWS y CIP-sonde-A	86
2.3.	Conclusiones y Recomendaciones	91
3.	Casos de Estudio	93
3.1.	Datos y Metodología	93
3.1.1.	Datos	93
3.1.2.	Metodología	94
3.1.2.1.	Determinación de los casos de estudio	94
3.2.	Resultados y Análisis	95
3.2.1.	Caso 1	95

3.2.2.	Caso 2	104
3.2.3.	Caso 3	112
3.2.4.	Caso 4	119
3.2.5.	Casos de estudio de no engelamiento	126
3.3.	Conclusiones y Recomendaciones	128
4.	Desempeño de las Combinaciones WRF-CIP-sonde-A y WRF-SLWS en Casos de Estudio	129
4.1.	Datos y Metodología	129
4.1.1.	Datos	129
4.1.2.	Metodología	130
4.2.	Discusión y Resultados	134
4.2.1.	Casos de engelamiento	139
4.2.1.1.	Caso 1	139
4.2.1.2.	Caso 2	147
4.2.1.3.	Caso 3	153
4.2.1.4.	Caso 4	159
4.2.2.	Casos de no engelamiento	171
4.2.2.1.	Caso 5	171
4.2.2.2.	Caso 6	177
4.2.2.3.	Caso 7	183
4.2.2.4.	Caso 8	189
4.3.	Conclusiones y Recomendaciones	195

Anexos	197
A. Comparación de Algoritmo CIP-sonde-A y Resultados de Algoritmos RAOB	198
B. Datos Disponibles y Faltantes de Observaciones de Radiosondeo y Reportes METAR para Todas las Estaciones	211
C. Climatología de POTENG para Bucaramanga, Barranquilla y Marandúa	219
D. Base de Datos Eventos de Aeronaves	231
E. Análisis Casos de Estudio para Eventos de No Engelmiento	238
F. Parametrizaciones de WRF utilizadas en el presente estudio	264
F.0.1. Parametrizaciones en namelist.input	264
G. Mapas de Precipitación Ocumulada Mediante Simulaciones WRF para Cada Caso	266
H. Mapas de POTENG Algoritmos CIP-sonde-A Y SLWS	274

Índice de figuras

1.1. Variación típica de la concentración de núcleos de congelación con la temperatura (Rogers, 1976).	11
1.2. Límites termodinámicos y cinéticos entre el líquido y el hielo para agua líquida ordinaria a presión ambiente, T_M es el punto de fusión y T_H es la temperatura cinética spinodal. Por debajo de T_H es imposible evitar la cristalización (Mishima y Stanley, 1998), citado por (Kalová, 2012).	12
1.3. Ejemplo de detección y corrección de datos atípicos.	19
1.4. Datos faltantes de radiosondeos anual, (a) Bogotá de 2007 a 2018, (b) Leticia de 2009 a 2018, (c) Tres Esquinas de 2010 a 2018, (d) Cali de 2016 a 2018 y (e) Riohacha de 2009 a 2016.	22
1.5. Datos faltantes de radiosondeos mensual, (a) Bogotá de 2007 a 2018, (b) Leticia de 2009 a 2018, (c) Tres Esquinas de 2010 a 2018, (d) Cali de 2016 a 2018 y (e) Riohacha de 2009 a 2016.	23
1.6. Datos faltantes de reportes METAR por año, (a) Bogotá de 2007 a 2018, (b) Leticia de 2009 a 2018, (c) Tres Esquinas de 2010 a 2018, (d) Cali de 2016 a 2018 y (e) Riohacha de 2009 a 2016.	24
1.7. Datos faltantes METAR por mes, (a) Bogotá de 2007 a 2018, (b) Leticia de 2009 a 2018, (c) Tres Esquinas de 2010 a 2018, (d) Cali de 2016 a 2018 y (e) Riohacha de 2009 a 2016.	25
1.8. Diagrama de flujo del algoritmo CIP-sonde (Bernstein <i>et al.</i> , 2007)	28
1.9. Diagrama de flujo del algoritmo CIP-sonde-A.	29
1.10. Comportamiento de Tmap en función de la Temperatura.	31
1.11. Comportamiento de HRmap en función de la humedad relativa, de acuerdo a (Bernstein <i>et al.</i> , 2007).	32
1.12. Comportamiento de CTTmap en función de la Temperatura de tope de la nube	32

1.13. Comparación del potencial de engelamiento en el aeródromo KINL 2005-02-02 estimado con: a) CIP-sonde-A y b) CIP-sonde (Bernstein <i>et al.</i> , 2007)	34
1.14. Comparación del potencial de engelamiento en el aeródromo KAMA 1980-01-26 estimado con: a) CIP-sonde-A y b) CIP-sonde (Bernstein <i>et al.</i> , 2007)	34
1.15. Comparación del potencial de engelamiento en el aeródromo KTOP 1978-12-07 estimado con: a) CIP-sonde-A y b) CIP-sonde (Bernstein <i>et al.</i> , 2007)	35
1.16. Comparación del potencial de engelamiento en el aeródromo PACD 2005-02-02 estimado con: a) CIP-sonde-A y b) CIP-sonde (Bernstein <i>et al.</i> , 2007)	35
1.17. Comparación potencial de engelamiento estimado por: Algoritmo CIP-sonde-A y resultados de RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC estación de Bogotá 01-04-2018.	37
1.18. Comparación potencial de engelamiento estimado por: Algoritmo CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC estación de Bogotá 01-07-2018.	38
1.19. Comparación potencial de engelamiento estimado por: Algoritmo basado en CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes USAF84 %HR y AFGWC, estación de Bogotá 01-02-2018	39
1.20. Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y la altitud en Bogotá de 2007 a 2018 a las 12:00 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de a) 0.01 y b) 0.15 y de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a observaciones de radiosondeos y reportes METAR.	41
1.21. Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y la altitud en Leticia de 2009 a 2018 a las 12:00 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de a) 0.01 y b) 0.15 y de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a observaciones de radiosondeos y reportes METAR.	43
1.22. Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y la altitud en Tres Esquinas de 2010 a 2018 a las 12:00 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de a) 0.01 y b) 0.15 y de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a observaciones de radiosondeos y reportes METAR.	44
1.23. Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y la altitud en Cali de 2016 a 2018 a las 12:00 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de a) 0.01 y b) 0.15 y de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a observaciones de radiosondeos y reportes METAR.	44

1.24. Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y la altitud en Riohacha de 2009 a 2016 a las 12:00 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de a) 0.01 y b) 0.15 y de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a observaciones de radiosondeos y reportes METAR.	45
1.25. Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y nivel de presión en Bogotá, Leticia, Tres Esquinas, Cali y Riohacha a las 12 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de 0.01 de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a observaciones de radiosondeos y reportes METAR y para periodos de tiempos iguales a los tiempos de observación en cada estación señalados en la Tabla 1.4.	46
1.26. Frecuencia promedio (%) de POTENG según el año y nivel de presión en Bogotá, Leticia, Tres Esquinas, Cali y Riohacha a las 12 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de 0.01 de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a observaciones de radiosondeos y reportes METAR y para periodos de tiempos iguales a los tiempos de observación en cada estación señalados en la Tabla 1.4.	47
1.27. Serie de tiempo Isotermas 0°C, −25°C y −40°C Bogotá 12:00 UTC de 2000 a 2018	48
1.28. Diagramas de caja por mes del año para la altura de la isoterma 0°C a las 12 :00 UTC, para a) Bogotá de 2007 a 2018, b) Leticia de 2009 a 2018, c) Tres Esquinas de 2010 a 2018, d) Cali de 2016 a 2018 y e) Riohacha de 2009 a 2016.	49
1.29. Diagramas de caja por mes del año para valores de humedad relativa en altura a las 12 :00 UTC a 500 hPa, a) Bogotá de 2007 a 2018, b) Leticia de 2009 a 2018, c) Tres esquinas de 2010 a 2018, d) Cali de 2016 a 2018 y e) Riohacha de 2009 a 2016.	51
1.30. Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y nivel de presión en Bogotá, Leticia, Tres Esquinas, Cali y Riohacha a las 12 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de 0.01 de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a la reanálisis ERA-5 y para periodos de tiempos iguales a los tiempos de observación en cada estación señalados en la Tabla 1.4.	53
1.31. Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y nivel de presión en Bogotá, Leticia, Tres Esquinas, Cali y Riohacha a las 12 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de 0.01 de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado al reanálisis ERA-5 y para el periodo de 30 años comprendidos entre 1989 y 2018.	54

1.32. Frecuencia promedio (%) de POTENG según el año y nivel de presión en Bogotá, Leticia, Tres Esquinas, Cali y Riohacha a las 12 UTC de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado al reanálisis ERA-5 para el periodo comprendido entre 1989 y 2018 , el cuadro rojo representa el periodo comparativo con observaciones.	55
1.33. Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y nivel de presión en Bogotá, Leticia, Tres Esquinas, Cali y Riohacha a las 12 UTC de acuerdo al algoritmo SLWS aplicado al reanálisis ERA-5 y para periodos de tiempos iguales a los tiempos de observación en cada estación señalados en la Tabla 1.4.	57
1.34. Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y nivel de presión en Bogotá, Leticia, Tres Esquinas, Cali y Riohacha a las 12 UTC de acuerdo al algoritmo SLWS aplicado al reanálisis ERA-5 y para el periodo de 30 años comprendido entre 1989 y 2018.	58
1.35. Frecuencia promedio (%) de POTENG según el año y nivel de presión en Bogotá, Leticia, Tres Esquinas, Cali y Riohacha a las 12 UTC de acuerdo al algoritmo SLWS aplicado al reanálisis ERA-5 y para el periodo de 30 años comprendido entre 1989 y 2018.	59
1.36. Frecuencia relativa de POTENG para la columna entre los niveles isobáricos de 600 a 300 hPa sobre Colombia, calculada con el algoritmo CIP-sonde-A a partir del reanálisis ERA-5 para el periodo de 30 años de 1989 a 2018.	61
1.37. Frecuencia relativa total de POTENG mensual multianual para la columna entre los niveles isobáricos de 600 a 300 hPa sobre Colombia calculada con el algoritmo CIP-sonde-A a partir del reanálisis ERA-5 para de periodo de 30 años de 1989 a 2018.	63
1.38. Frecuencia relativa de POTENG para la columna entre los niveles isobáricos de 600 a 300 hPa sobre Colombia, calculada con el algoritmo SLWS a partir del reanálisis ERA-5 para el periodo de 30 años de 1989 a 2018.	65
1.39. Frecuencia relativa total de POTENG mensual multianual para la columna entre los niveles isobáricos de 600 a 300 hPa sobre Colombia, calculada con el algoritmo SLWS a partir del reanálisis ERA-5 para de periodo de 30 años de 1989 a 2018.	66
1.40. Diagrama de dispersión para valores de frecuencia de POTENG para ERA-5 para periodo 1989 a 2018, los valores son la frecuencia en cada coordenada de los mapas de las Figuras 1.36 y 1.38 obtenidos con los algoritmos CIP-sonde-A y SLWS respectivamente.	67

1.41. Diagrama de dispersión para valores de frecuencia de POTENG mediante ERA-5 para el periodo de 1989 a 2018, los valores son la frecuencia en cada coordenada de los mapas mensuales multianuales de las Figuras 1.37 y 1.39 obtenidos con los algoritmos CIP-sonde-A y SLWS respectivamente.	68
1.42. Frecuencia relativa de POTENG para las 12 UTC, 18 UTC, 00 UTC y 06 UTC, en Colombia para la columna entre los niveles isobáricos de 600 a 300 hPa, calculadas con el algoritmo CIP-sonde-A para el reanálisis ERA-5 para el periodo de 30 años de 1989 a 2018.	70
2.1. Ejemplo de evento extraído de registros de FDR	75
2.2. Mapa general eventos de engelamiento. La ubicación de cada punto en este mapa corresponde a las coordenadas en las cuales se detectó engelamiento por primera vez a partir de uso de sistemas de deshielo o el sensor de hielo, o la coordenada reportada por el piloto o los informes de seguridad.	81
2.3. Mapa general eventos de no engelamiento según registro FDR. La ubicación de cada punto en este mapa, corresponde a las coordenadas en las cuales se registró la máxima altitud de vuelo de aeronaves C-295, a bordo de las cuales no se registraron alertas de hielo ni se usaron sistemas de deshielo.	82
2.4. Diagramas de barras de número total absoluto de registros, número absoluto de registros con engelamiento y sin engelamiento, (a) por año, (b) por mes del año y (c) por hora del día.	83
2.5. Diagramas de barras de número relativo de registros con engelamiento, (a) por año, (b) por mes del año y (c) por hora del día.	84
2.6. Histograma de temperaturas TAT en eventos de engelamiento de acuerdo a FDR	85
2.7. Histograma de temperaturas SAT en eventos de engelamiento de acuerdo a FDR	85
2.8. Frecuencia altitud eventos de engelamiento FDR.	86
2.9. Puntajes de habilidad para detección de eventos de engelamiento en aeronaves, para los algoritmos CIP-sonde-A y SLWS, sin discriminar por nivel de altitud específico.	88
2.10. Puntajes de habilidad para detección de eventos de engelamiento en aeronaves, para los algoritmos CIP-sonde-A y SLWS, discriminando por nivel de altitud específico.	90

3.1. Ubicación de los 8 eventos tomados como casos de estudio.	95
3.2. Ubicación del lugar en el que se produjo el evento analizado como caso 1. El caso corresponde a un evento de seguridad aérea que se produjo el día 31 de julio de 2015 a las 19:45 UTC en el municipio de Codazzi, Cesar.	96
3.3. Cartas sinópticas de superficie para el caso 1.	97
3.4. Cartas de líneas de corriente en los niveles de 850 (a), 700 (b), 500 (c) y 250 hPa (d), a las 19:00 UTC, de acuerdo a datos del reanálisis ERA-5 para el caso 1.	98
3.5. Imágenes de satélite del canal IR que muestran la evolución del caso 1, tomadas a bordo del satélite GOES-13.	100
3.6. Imágenes Satelitales de los canales visibles y vapor de agua para el caso 1, tomadas a bordo del satélite GOES-13	101
3.7. Presencia de rayos (puntos) y tendencia de movimiento de celdas (conjunto de rayos demarcado) de acuerdo al sistema LINET VIEW Keraunos (2018), para el caso 1. Las predicciones de tendencia están hechas a partir de la última hora registrada y son válidos para tiempos desde 10 minutos hasta 60 minutos después de la hora base.	101
3.8. Evolución de perfil de POTENG entre las 18:00 UTC y las 21:00 UTC del 31 de julio de 2015 según los algoritmos SLWS y CIP-sonde-A aplicados a los datos de reanálisis ERA-5.	103
3.9. Ubicación y ruta del lugar en el que se produjo el evento analizado como caso 2. El caso corresponde a un registro FDR que se produjo el día 15 de marzo de 2016 a las 23:13 UTC en coordenadas 0.40° N 71.12° W departamento de Vaupés. Zona con sistemas de deshielo activado (Azul).	104
3.10. Cartas sinópticas de superficie para el caso 2	105
3.11. Cartas de líneas de corriente en los niveles de 850 (a), 700 (b), 500 (c) y 250 hPa (d), a las 23:00 UTC, de acuerdo a datos del reanálisis ERA-5 para el caso 2.	106
3.12. Imágenes satelitales del canal IR que muestran la evolución del caso 2, tomadas a bordo del satélite GOES-13.	108
3.13. Imágenes de satélite del canal visible y vapor de agua para el caso 2, tomadas a bordo del satélite GOES-13.	109

3.14. Radiosondeo más cercano a la estación de Leticia, Código 80398, para el día del caso 2.	109
3.15. Presencia de rayos (puntos) y tendencia de movimiento de celdas (conjunto de rayos demarcado) de acuerdo al sistema LINET VIEW Keraunos (2018), para el caso 2. Las predicciones de tendencia están hechas a partir de la ultima hora registrada y son válidos para tiempos desde 10 minutos hasta 60 minutos después de la hora base.	110
3.16. Evolución de perfil de POTENG entre las 21:00 UTC y las 00:00 UTC del 15 de marzo de 2016 según los algoritmos SLWS y CIP-sonde-A aplicados a los datos de reanálisis ERA-5.	111
3.17. Ubicación y ruta del lugar en el que se produjo el evento analizado como caso 3. El caso corresponde a un registro FDR que se produjo el día 26 de abril de 2016 a las 19:23 UTC en coordenadas 4.25° N 75.8° W, departamento del Valle del Cauca. Zona con sistemas de deshielo activado (Azul).	112
3.18. Cartas sinópticas de superficie para el caso 3.	113
3.19. Cartas de líneas de corriente en los niveles de 850 (a), 700 (b), 500 (c) y 250 hPa (d), a las 19:00 UTC, de acuerdo a datos del reanálisis ERA-5 para el caso 3.	114
3.20. Imágenes satelitales del canal IR que muestran la evolución del caso 3, tomadas a bordo del satélite GOES-13.	116
3.21. Imágenes de satélite canal visible y vapor de agua para el caso 3, tomadas a bordo del satélite GOES-13.	117
3.22. Presencia de rayos (puntos) y tendencia de movimiento de celdas (conjunto de rayos demarcado) de acuerdo al sistema LINET VIEW Keraunos (2018), para el caso 3. Las predicciones de tendencia están hechas a partir de la ultima hora registrada y son válidos para tiempos desde 10 minutos hasta 60 minutos después de la hora base.	117
3.23. Evolución de perfil de POTENG entre las 17:00 UTC y las 20:00 UTC del 26 de abril de 2016 según los algoritmos SLWS y CIP-sonde-A aplicados a los datos de reanálisis ERA-5.	118
3.24. Ubicación del lugar en el que se produjo el evento analizado como caso 4. El caso corresponde a un reporte SIGMET que se produjo el día 15 de octubre de 2015 a las 13:00 UTC en coordenadas 7.10° N 73.38° W departamento de Santander.	119

3.25. Cartas sinópticas de superficie para el caso 4.	121
3.26. Cartas de líneas de corriente en los niveles de 850 (a), 700 (b), 500 (c) y 250 hPa (d), a las 19:00 UTC, de acuerdo a datos del reanálisis ERA-5 para el caso 4.	122
3.27. Imágenes satelitales del canal IR que muestran la evolución del caso 4, tomadas a bordo del satélite GOES-13.	124
3.28. Imágenes de satélite canal visible y vapor de agua para el caso 4, tomadas a bordo del satélite GOES-13.	125
3.29. Presencia de rayos (puntos) y tendencia de movimiento de celdas (conjunto de rayos demarcado) de acuerdo al sistema LINET VIEW Keraunos (2018), para el caso 4. Las predicciones de tendencia están hechas a partir de la ultima hora registrada y son válidos para tiempos desde 10 hasta 60 minutos después de la hora base.	125
3.30. Evolución de perfil de POTENG entre las 11:00 UTC y las 14:00 UTC del 15 de octubre de 2015 según los algoritmos SLWS y CIP-sonde-A aplicados a los datos de reanálisis ERA-5.	126
4.1. Dominio 01 del WRF para este estudio.	131
4.2. Áreas definidas para estimación de PdE.	133
4.3. Puntajes de habilidad para detección de eventos de engelamiento en aeronaves en el área 1, para los algoritmos CIP-sonde-A y SLWS a partir de la salida del modelo WRF.	136
4.4. Puntajes de habilidad para detección de eventos de engelamiento en aeronaves en el área 2, para los algoritmos CIP-sonde-A y SLWS a partir de la salida del modelo WRF.	137
4.5. Puntajes de habilidad para detección de eventos de engelamiento en aeronaves en el área 3, para los algoritmos CIP-sonde-A y SLWS a partir de la salida del modelo WRF.	139
4.6. PdE para el 31 de julio de 2015 a las 19:00 UTC (caso 1) en función de la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones. PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS para todos los niveles entre 600 y 350 hpa y para el (a) área 1, (b) área 2 y (c) área 3.	141

4.7. PdE para el 31 de julio de 2015 a las 19:00 UTC (caso 1) en función a la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones y el nivel de presión.	142
4.8. Evolución temporal de PdE para el 31 de julio de 2015 (caso 1). El PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS aplicado a las 9 simulaciones para cada una de las tres áreas y todos los niveles entre 600 y 350 hPa.	143
4.9. Precipitación acumulada entre las 19:00 y 21:00 UTC del 31 de julio de 2015 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 19:00 UTC (caso 1) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 550 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 30 de julio a las 00:00 UTC. simulación que más PdE muestra y catalogada como la mejor.	145
4.10. Precipitación acumulada entre las 19:00 y 21:00 UTC del 31 de julio de 2015 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 19:00 UTC (caso 1) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 550 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 31 de julio a las 00:00 UTC. simulación que menos PdE muestra y catalogada como la peor.	146
4.11. PdE para el 15 de marzo de 2016 a las 23:00 UTC (caso 2) en función de la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones. PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS para todos los niveles ente 600 y 350 hpa y para el (a) área 1, (b) área 2 y (c) área 3.	148
4.12. PdE para el 15 de marzo de 2016 a las 23:00 UTC (caso 2) en función a la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones y el nivel de presión.	149
4.13. Evolución temporal de PdE para el 15 de marzo de 2016 (caso 2). El PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS aplicado a las 9 simulaciones para cada una de las tres áreas y todos los niveles entre 600 y 350 hPa.	150
4.14. Precipitación acumulada entre las 22:00 y 00:00 UTC del 15 de marzo de 2016 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 23:00 UTC (caso 2) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 500 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 13 de marzo a las 18:00 UTC. simulación que más PdE muestra y catalogada como la mejor.	151

4.15. Precipitación acumulada entre las 22:00 y 00:00 UTC del 15 de marzo de 2016 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 23:00 UTC (caso 2) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 500 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 15 de marzo a las 06:00 UTC. simulación que menos PdE muestra y catalogada como la peor.	152
4.16. PdE para el 26 de abril de 2016 a las 19:00 UTC (caso 3) en función de la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones. PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS para todos los niveles entre 600 y 350 hpa y para el (a) área 1, (b) área 2 y (c) área 3.	154
4.17. PdE para el 26 de abril de 2016 a las 19:00 UTC (caso 3) en función a la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones y el nivel de presión.	155
4.18. Evolución temporal de PdE para el 26 de abril de 2016 (caso 3). El PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS aplicado a las 9 simulaciones para cada una de las tres áreas y todos los niveles entre 600 y 350 hPa.	156
4.19. Precipitación acumulada entre las 19:00 a 21:00 UTC del 26 de abril de 2016 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 19:00 UTC (caso 3) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 500 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 23 de abril a las 18:00 UTC. simulación que más PdE muestra y catalogada como la mejor.	157
4.20. Precipitación acumulada entre las 19:00 a 21:00 UTC del 26 de abril de 2016 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 19:00 UTC (caso 3) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 500 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 24 de abril a las 18:00 UTC. simulación que menos PdE muestra y catalogada como la peor.	158
4.21. PdE para el 15 de octubre de 2015 a las 13:00 UTC (caso 4) en función de la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones. PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS para todos los niveles entre 600 y 350 hpa y para el (a) área 1, (b) área 2 y (c) área 3.	160
4.22. PdE para el 15 de octubre de 2015 a las 13:00 UTC (caso 4) en función a la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones y el nivel de presión.	161

4.23. Evolución temporal de PdE para el 15 de octubre de 2015 (caso 4). El PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS aplicado a las 9 simulaciones para cada una de las tres áreas y todos los niveles entre 600 y 350 hPa.	162
4.24. Precipitación acumulada entre las 13:00 a 15:00 UTC del 15 de octubre de 2015 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 13:00 UTC (caso 4) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 550 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 15 de octubre a las 06:00 UTC, simulación que ocupó el primer lugar en detectar mayores valores de PdE para SLWS Y el segundo lugar para CIP-sonde-A y es catalogada como la mejor.	163
4.25. Precipitación acumulada entre las 13:00 a 15:00 UTC del 15 de octubre de 2015 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 13:00 UTC (caso 4) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 550 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 14 de octubre a las 12:00 UTC. simulación que menos PdE muestra y catalogada como la peor.	164
4.26. PdE para el 15 de octubre de 2015 a las 13:00 UTC (caso 4) en función de la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones. PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS para todos los niveles ente 600 y 350 hpa y para el (a) área 1, (b) área 2 y (c) área 3.	166
4.27. PdE para el 15 de octubre de 2015 a las 13:00 UTC (caso 4) en función a la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones y el nivel de presión.	167
4.28. Evolución temporal de PdE para el 15 de octubre de 2015 (caso 4). El PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS aplicado a las 9 simulaciones para cada una de las tres áreas y todos los niveles entre 600 y 350 hPa.	168
4.29. Precipitación acumulada entre las 13:00 a 15:00 UTC del 15 de octubre de 2015 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 13:00 UTC (caso 4) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 550 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 15 de octubre a las 06:00 UTC, simulación que ocupó el primer lugar en detectar mayores valores de PdE para SLWS Y el segundo lugar para CIP-sonde-A y es catalogada como la mejor.	169

4.30. Precipitación acumulada entre las 13:00 a 15:00 UTC del 15 de octubre de 2015 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 13:00 UTC (caso 4) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 550 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 14 de octubre a las 12:00 UTC. simulación que menos PdE muestra y catalogada como la peor.	170
4.31. PdE para el 24 de junio de 2018 a las 15:00 UTC (caso 5) en función de la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones. PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS para todos los niveles ente 600 y 350 hpa y para el (a) área 1, (b) área 2 y (c) área 3.	172
4.32. PdE para el 24 de junio de 2018 a las 15:00 UTC (caso 5) en función a la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones y el nivel de presión.	173
4.33. Evolución temporal de PdE para el 24 de junio de 2018 (caso 5). El PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS aplicado a las 9 simulaciones para cada una de las tres áreas y todos los niveles entre 600 y 350 hPa.	174
4.34. Precipitación acumulada entre las 13:00 a 15:00 UTC del 24 de junio de 2018 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 15:00 UTC (caso 5) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 500 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 24 de junio a las 06:00 UTC. simulación que más PdE muestra y catalogada como la mejor.	175
4.35. Precipitación acumulada entre las 13:00 a 15:00 UTC del 24 de junio de 2018 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 15:00 UTC (caso 5) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 500 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 24 de junio a las 00:00 UTC. simulación que menos PdE muestra y catalogada como la peor.	176
4.36. PdE para el 13 de marzo de 2016 a las 15:00 UTC (caso 6) en función de la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones. PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS para todos los niveles ente 600 y 350 hPa y para el (a) área 1, (b) área 2 y (c) área 3.	178
4.37. PdE para el 13 de marzo de 2016 a las 15:00 UTC (caso 6) en función a la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones y el nivel de presión.	179

4.38. Evolución temporal de PdE para el 13 de marzo de 2016 (caso 6). El PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS aplicado a las 9 simulaciones para cada una de las tres áreas y todos los niveles entre 600 y 350 hPa.	180
4.39. Precipitación acumulada entre las 13:00 a 15:00 UTC del 13 de marzo de 2016 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 15:00 UTC (caso 6) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 500 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 11 de marzo a las 12:00 UTC. simulación que más PdE muestra y catalogada como la mejor.	181
4.40. Precipitación acumulada entre las 13:00 a 15:00 UTC del 13 de marzo de 2016 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 15:00 UTC (caso 6) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 500 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 11 de marzo a las 18:00 UTC. simulación que menos PdE muestra y catalogada como la peor.	182
4.41. PdE para el 6 de marzo de 2016 a las 04:00 UTC (caso 7) en función de la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones. PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS para todos los niveles ente 600 y 350 hPa y para el (a) área 1, (b) área 2 y (c) área 3.	184
4.42. PdE para el 6 de marzo de 2016 a las 04:00 UTC (caso 7) en función a la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones y el nivel de presión.	185
4.43. Evolución temporal de PdE para el 6 de marzo de 2016 (caso 7). El PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS aplicado a las 9 simulaciones para cada una de las tres áreas y todos los niveles entre 600 y 350 hPa.	186
4.44. Precipitación acumulada entre las 04:00 a 06:00 UTC del 6 de marzo de 2016 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 04:00 UTC (caso 7) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 500 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 05 de marzo a las 06:00 UTC. Simulación que más PdE muestra y catalogada como la mejor.	187

4.45. Precipitación acumulada entre las 04:00 a 06:00 UTC del 6 de marzo de 2016 según (a) los datos TRMM y b) según WRF. POTENG para las 04:00 UTC (caso 7) según los algoritmos c) CIP-sonde-A y d) SLWS para 500 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 03 de marzo a las 18:00 UTC. simulación que menos PdE muestra y catalogada como la peor.	188
4.46. PdE para el 17 de octubre de 2016 a las 13:00 UTC (caso 8) en función de la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones. PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS para todos los niveles ente 600 y 350 hpa y para el (a) área 1, (b) área 2 y (c) área 3.	190
4.47. PdE para el 17 de octubre de 2016 a las 13:00 UTC (caso 8) en función a la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones y el nivel de presión.	191
4.48. Evolución temporal de PdE para el 17 de octubre de 2016 (caso 8). El PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS aplicado a las 9 simulaciones para cada una de las tres áreas y todos los niveles entre 600 y 350 hPa.	192
4.49. Precipitación acumulada entre las 13:00 a 15:00 UTC del 17 de octubre de 2016 según (a) los datos TRMM y b) según WRF. POTENG para las 13:00 UTC (caso 8) según los algoritmos c) CIP-sonde-A y d) SLWS para 400 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 16 de octubre a las 12:00 UTC. simulación que más PdE muestra y catalogada como la mejor.	193
4.50. Precipitación acumulada entre las 13:00 a 15:00 UTC del 17 de octubre de 2016 según (a) los datos TRMM y b) según WRF. POTENG para las 13:00 UTC (caso 8) según los algoritmos c) CIP-sonde-A y d) SLWS para 400 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 16 de octubre a las 18:00 UTC. simulación que menos PdE muestra y catalogada como la peor.	194
A.1. Comparación potencial de englamiento estimado por: Algoritmo CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC 01-01-2018.	198
A.2. Comparación potencial de englamiento estimado por: Algoritmo CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC 01-03-2018.	199

A.3. Comparación potencial de englamiento estimado por: Algoritmo CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC 01-05-2018.	200
A.4. Comparación potencial de englamiento estimado por: Algoritmo basado en CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC 01-06-2018.	201
A.5. Comparación potencial de englamiento estimado por: Algoritmo basado en CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC 01-08-2018.	202
A.6. Comparación potencial de englamiento estimado por: Algoritmo basado en CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC 01-09-2018.	203
A.7. Comparación potencial de englamiento estimado por: Algoritmo CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC 01-10-2018.	204
A.8. Comparación potencial de englamiento estimado por: Algoritmo CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC 01-11-2018.	205
A.9. Comparación potencial de englamiento estimado por: Algoritmo CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC 01-12-2018.	206
A.10.Comparación potencial de englamiento estimado por: Algoritmo CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC 02-02-2018.	207
A.11.Comparación potencial de englamiento estimado por: Algoritmo CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC 02-09-2018.	208
A.12.Comparación potencial de englamiento estimado por: Algoritmo CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC 02-11-2018.	209
A.13.Comparación potencial de englamiento estimado por: Algoritmo CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC 05-12-2018.	210

B.1. Datos radiosondeo disponibles (Azul) y faltantes (Rojo) mensual, periodo de tiempo de observaciones para cada estación.	211
B.2. Datos radiosondeo disponibles (Azul) y faltantes (Rojo) mensual, periodo de tiempo de observaciones para cada estación.	212
B.3. Datos radiosondeo disponibles (Azul) y faltantes (Rojo) anual, periodo de tiempo de observaciones para cada estación.	213
B.4. Datos radiosondeo disponibles (Azul) y faltantes (Rojo) anual, periodo de tiempo de observaciones para cada estación.	214
B.5. Datos METAR disponibles (Azul) y faltantes (Rojo) mensual, periodo de tiempo de observaciones para cada estación.	215
B.6. Datos METAR disponibles (Azul) y faltantes (Rojo) mensual, periodo de tiempo de observaciones para cada estación.	216
B.7. Datos METAR disponibles (Azul) y faltantes (Rojo) anual, periodo de tiempo de observaciones para cada estación.	217
B.8. Datos METAR disponibles (Azul) y faltantes (Rojo) anual, periodo de tiempo de observaciones para cada estación.	218
C.1. Datos faltantes radiosondeos anual y mensual, (a) Bucaramanga año 2018, (b) Barranquilla año 2018, (c) Marandúa año 2017 y 2018.	219
C.2. Datos faltantes METAR anual y mensual, (a) Bucaramanga año 2018, (b) Barranquilla año 2018, (c) Marandúa año 2017 y 2018.	220
C.3. Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y la altitud, en Bucaramanga año 2018 a las 12:00 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de a) 0.01 y b) 0.15 y de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a observaciones radiosondeo y reportes METAR.	221
C.4. Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y la altitud, en Barranquilla año 2018 a las 12:00 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de (a) 0.01 y (b) 0.15 y de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a observaciones radiosondeo y reportes METAR.	221

C.5. Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y la altitud, en Marandúa años 2017 y 2018 a las 12:00 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de (a) 0.01 y (b) 0.15 y de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a observaciones radiosondeo y reportes METAR.	222
C.6. Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y nivel de presión en Bucaramanga, Barranquilla y Marandúa a las 12 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de 0.01 de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a observaciones de radiosondeos y reportes METAR y para periodos de tiempos iguales a los tiempos de observación en cada estación señalados en la Tabla 1.4.	223
C.7. Frecuencia promedio (%) de POTENG según el año y nivel de presión en Bucaramanga, Barranquilla y Marandúa a las 12:00 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de 0.01 de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a observaciones de radiosondeos y reportes METAR y para periodos de tiempos iguales a los tiempos de observación en cada estación señalados en la Tabla 1.4.	224
C.8. Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y nivel de presión en Bucaramanga, Barranquilla y Marandúa a las 12:00 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de 0.01 de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado al reanálisis ERA-5 y para periodos de tiempos iguales a los tiempos de observación en cada estación señalados en la Tabla 1.4.	225
C.9. Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y nivel de presión en Bucaramanga, Barranquilla y Marandúa a las 12:00 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de 0.01 de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado al reanálisis ERA-5 y para el periodo de 30 años comprendido entre 1989 y 2018.	226
C.10. Frecuencia promedio (%) de POTENG según el año y nivel de presión en Bucaramanga, Barranquilla y Marandúa a las 12:00 UTC de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado al reanálisis ERA-5 para el periodo comprendido entre 1989 y 2018 (el cuadro rojo representa el periodo comparativo con observaciones).	227
C.11. Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y nivel de presión en Bucaramanga, Barranquilla y Marandúa a las 12:00 UTC de acuerdo al algoritmo SLWS aplicado al reanálisis ERA-5 y para periodos de tiempos iguales a los tiempos de observación en cada estación señalados en la Tabla 1.4.	228

C.12. Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y nivel de presión en Bucaramanga, Barranquilla y Marandúa a las 12:00 UTC de acuerdo al algoritmo SLWS aplicado al reanálisis ERA-5 y para el periodo de 30 años comprendido entre 1989 y 2018.	228
C.13. Frecuencia promedio (%) de POTENG según el año y nivel de presión en Bucaramanga, Barranquilla y Marandúa a las 12 UTC de acuerdo al algoritmo SLWS aplicado al reanálisis ERA-5 y para el periodo de 30 años comprendido entre 1989 y 2018.	229
C.14. Frecuencia relativa de POTENG para las 12 UTC, 18 UTC, 00 UTC y 06 UTC, en Colombia para la columna entre los niveles isobáricos de 600 a 300 hPa, calculadas con el algoritmo SLWS para el reanálisis ERA-5 para el periodo de 30 años de 1989 a 2018.	230
E.1. Ubicación del lugar en el que se produjo el evento analizado como caso 5. El caso corresponde a registro de FDR que se produjo el día 24 de junio de 2018 a las 15:18 UTC en coordenadas 9.86° N -74.41° W departamento del Magdalena.	238
E.2. Cartas sinópticas de superficie para el caso 5.	239
E.3. Cartas de líneas de corriente en los niveles de 850 (a), 700 (b), 500 (c) y 250 hPa (d), a las 19:00 UTC, de acuerdo a datos del reanálisis ERA-5 para el caso 5.	240
E.6. Presencia de rayos (puntos) y tendencia de movimiento de celdas (conjunto de rayos demarcado) de acuerdo al sistema LINET (Keraunos, 2018), para el caso 5. Las predicciones de tendencia están hechas a partir de la última hora registrada y son válidos para tiempos desde 10 minutos hasta 60 minutos después de la hora base.	241
E.4. Imágenes satelitales del canal IR que muestran la evolución del caso 5, tomadas a bordo del satélite GOES-16.	242
E.5. Imagen de satélite canal visible para el caso 5, tomada a bordo del satélite GOES-13.	243
E.7. Evolución de perfil de POTENG entre las 13:00 UTC y las 16:00 UTC del 24 de junio de 2018 según los algoritmos SLWS y CIP-sonde-A aplicados a los datos de reanálisis ERA-5.	243

E.8. Ubicación del lugar en el que se produjo el evento analizado como caso 6. El caso corresponde a registro de FDR que se produjo el día 13 de marzo de 2016 a las 14:27 UTC en coordenadas 1.15° N 71.84 W departamento del Guaviare.	244
E.9. Cartas sinópticas de superficie para el caso 6.	245
E.10. Cartas de líneas de corriente en los niveles de 850 (a), 700 (b), 500 (c) y 250 hPa (d), a las 19:00 UTC, de acuerdo a datos del reanálisis ERA-5 para el caso 6.	246
E.11. Radiosondeo más cercano, Leticia Código (80398) para el día del caso 6. . . .	247
E.15. Evolución de perfil de POTENG para algoritmos SLWS y CIP-sonde-A mediante datos de reanálisis ERA-5 para el caso-6.	247
E.12. Imágenes satelitales del canal IR que muestran la evolución del caso 6, tomadas a bordo del satélite GOES-13.	248
E.13. Imágenes de satélite canal visible y vapor de agua para el caso 6, tomadas a bordo del satélite GOES-13.	249
E.14. Presencia de rayos (puntos) y tendencia de movimiento de celdas (conjunto de rayos demarcado) de acuerdo al sistema LINET (https://linetview.nowcast.de/linetview/pages/index.html) para el caso 6. Las predicciones de tendencia están hechas a partir de la última hora registrada y son válidas para tiempos desde 10 minutos hasta 60 minutos después de la hora base.	249
E.16. Ubicación del lugar en el que se produjo el evento analizado como caso 7. El caso corresponde a registro de FDR que se produjo el día 06 de marzo de 2016 a las 04:00 UTC en coordenadas 4.06° N 76.22° W departamento del Valle del Cauca.	250
E.17. Cartas sinópticas de superficie para el caso 7	251
E.18. Cartas de líneas de corriente en los niveles de 850 (a), 700 (b), 500 (c) y 250 hPa (d), a las 19:00 UTC, de acuerdo a datos del reanálisis ERA-5 para el caso 7.	252
E.19. Imágenes satelitales del canal IR que muestran la evolución del caso 7, tomadas a bordo del satélite GOES-13.	254
E.20. Imagen de satélite canal vapor de agua para el caso 7, tomadas a bordo del satélite GOES-13.)	255

E.21. Presencia de rayos (puntos) y tendencia de movimiento de celdas (conjunto de rayos demarcado) de acuerdo al sistema LINET (https://linetview.nowcast.de/linetview/pages/index.html) para el caso 7. Las predicciones de tendencia están hechas a partir de la ultima hora registrada y son válidos para tiempos desde 10 minutos hasta 60 minutos después de la hora base.	255
E.22. Evolución de perfil de POTENG entre las 02:00 UTC y las 05:00 UTC del 06 de Marzo de 2016 según los algoritmos SLWS y CIP-sonde-A aplicados a los datos de reanálisis ERA-5.	256
E.23. Ubicación del lugar en el que se produjo el evento analizado como caso 8. El caso corresponde a registro de FDR que se produjo el día 17 de octubre de 2016 a las 12:54 UTC en coordenadas 6.48° N 73.28° W departamento de Santander.	257
E.24. Cartas sinópticas de superficie para el caso 8.	258
E.25. Cartas de líneas de corriente en los niveles de 850 (a), 700 (b), 500 (c) y 250 hPa (d), a las 19:00 UTC, de acuerdo a datos del reanálisis ERA-5 para el caso 8.	259
E.26. Imágenes satelitales del canal IR que muestran la evolución del caso 8, tomadas a bordo del satélite GOES-13.	261
E.27. Imágenes de satélite canal visible y vapor de agua para el caso 8, tomadas a bordo del satélite GOES-13.	262
E.28. Presencia de rayos (puntos) y tendencia de movimiento de celdas (conjunto de rayos demarcado) de acuerdo al sistema LINET (https://linetview.nowcast.de/linetview/pages/index.html) para el caso 8. Las predicciones de tendencia están hechas a partir de la ultima hora registrada y son válidos para tiempos desde 10 minutos hasta 60 minutos después de la hora base.	262
E.29. Evolución de perfil de POTENG entre las 11:00 UTC y las 14:00 UTC del 17 de octubre de 2016 según los algoritmos SLWS y CIP-sonde-A aplicados a los datos de reanálisis ERA-5.	263
G.1. Resultados de simulación WRF de precipitación acumulada para 3 (de 19:00 a 21:00) horas caso 1.	266
G.2. Resultados de simulación WRF de precipitación acumulada para 3 (de 19:00 a 21:00) horas caso 2.	267

G.3. Resultados de simulación WRF de precipitación acumulada para 3 (de 19:00 a 21:00) horas caso 3.	268
G.4. Resultados de simulación WRF de precipitación acumulada para 3 (de 19:00 a 21:00) horas caso 4.	269
G.5. Resultados de simulación WRF de precipitación acumulada para 3 (de 19:00 a 21:00) horas caso 5.	270
G.6. Resultados de simulación WRF de precipitación acumulada para 3 (de 19:00 a 21:00) horas caso 6.	271
G.7. Resultados de simulación WRF de precipitación acumulada para 3 (de 19:00 a 21:00) horas caso 7.	272
G.8. Resultados de simulación WRF de precipitación acumulada para 3 (de 19:00 a 21:00) horas caso 8.	273
H.1. Resultados de algoritmo CIP-sonde-A para caso 1.	274
H.2. Resultados de algoritmo CIP-sonde-A para caso 2.	275
H.3. Resultados de algoritmo CIP-sonde-A para caso 3.	276
H.4. Resultados de algoritmo CIP-sonde-A para caso 4.	277
H.5. Resultados de algoritmo CIP-sonde-A para caso 5.	278
H.6. Resultados de algoritmo CIP-sonde-A para caso 6.	279
H.7. Resultados de algoritmo CIP-sonde-A para caso 7.	280
H.8. Resultados de algoritmo CIP-sonde-A para caso 8.	281
H.9. Resultados de algoritmo SLWS para caso 1.	282
H.10. Resultados de algoritmo SLWS para caso 2.	283
H.11. Resultados de algoritmo SLWS para caso 3.	284
H.12. Resultados de algoritmo CIP-sonde-A para caso 4.	285
H.13. Resultados de algoritmo SLWS para caso 5.	286

H.14.Resultados de algoritmo SLWS para caso 6.	287
H.15.Resultados de algoritmo SLWS para caso 7.	288
H.16.Resultados de algoritmo SLWS para caso 8.	289

Índice de tablas

1.1. Variables de radiosondeo requeridas	17
1.2. Características datos de reanálisis ERA-5 utilizados para climatología	18
1.3. Variables requeridas de ERA-5	18
1.4. Ubicación estaciones y datos faltantes posterior realización de calidad de datos.	20
2.1. Sistemas de deshielo y alertas registrados en el sistema FDR para aeronave C-295	74
2.2. Estructura de una tabla de contingencia (Wilks, 2006).	77
2.3. Tabla de contingencia para detección de eventos de engelamiento de aeronaves en toda la columna según el algoritmo CIP-sonde-A aplicado a datos de ERA-5.	87
2.4. Tabla de contingencia para detección de eventos de engelamiento de aeronaves en toda la columna según el algoritmo SLWS aplicado a datos de ERA-5.	87
2.5. Tabla de contingencia para eventos de engelamiento de aeronaves en los distintos niveles de la columna según el algoritmo CIP-sonde-A aplicado a datos de ERA-5.	89
2.6. Tabla de contingencia para eventos de engelamiento de aeronaves en los distintos niveles de la columna según el algoritmo SLWS aplicado a datos de ERA-5.	89
3.1. Reportes METAR de los aeródromos de Riohacha y Valledupar para las 19:00 y 20:00 UTC del día 31 de julio de 2015.	99
3.2. Reportes METAR de los aeródromos de San José del Guaviare y Mitú para las 22:00 y 23:00 UTC del día 15 de marzo de 2016.	107
3.3. Reportes METAR de los aeródromos de Armenia e Ibagué para las 19:00, 20:00 UTC del día 26 de abril de 2016.	115
3.4. Reportes METAR de los aeródromos de Bucaramanga y Barrancabermeja para las 11:00, 12:00 y 13:00 UTC del día 15 de octubre de 2015.	123

4.1.	Variables requeridas de la salida del modelo para algoritmo SLWS y CIP-sonde-A.	129
4.2.	Características de datos de imágenes satelitales TRMM.	130
4.3.	Características del modelo WRF y de los datos GFS usados en este estudio. . .	132
4.4.	Rangos de intensidad para algoritmos de detección	134
4.5.	Tabla de contingencia de resultados de simulaciones con WRF para los 8 casos de estudio para el área 1 mediante algoritmo CIP-sonde-A.	135
4.6.	Tabla de contingencia de resultados de simulaciones con WRF para los 8 casos de estudio para el área 1 mediante algoritmo SLWS.	135
4.7.	Tabla de contingencia de resultados de simulaciones con WRF para los 8 casos de estudio para el área 2 mediante algoritmo CIP-sonde-A.	137
4.8.	Tabla de contingencia de resultados de simulaciones con WRF para los 8 casos de estudio para el área 2 mediante algoritmo SLWS.	137
4.9.	Tabla de contingencia de resultados de simulaciones con WRF para los 8 casos de estudio para el área 3 mediante algoritmo CIP-sonde-A.	138
4.10.	Tabla de contingencia de resultados de simulaciones con WRF para los 8 casos de estudio para el área 3 mediante algoritmo SLWS.	139
D.1.	Base de datos de eventos a partir de aeronaves.	231
E.1.	Reportes METAR de los aeródromos de Barranquilla , Santa Marta y Valledupar para las 14:00, 15:00 y 16:00 UTC del día 24 de junio de 2018.	241
E.2.	Reportes METAR de los aeródromos de Armenia y Cali para las 03:00, 04:00 y 05:00 UTC del día 06 de marzo de 2016.	253
E.3.	Reportes METAR de los aeródromos de Bucaramanga y Barrancabermeja para las 12:00, 13:00 y 14:00 UTC del día 17 de octubre de 2016.	260
F.1.	Parametrizaciones físicas WRF para este estudio.	264

Glosario de Siglas y Acrónimos

AD BLW MNM MET Aerodrome Below Minimum Meteorological - Aeródromo Bajo Mínimos Meteorológicos

AD OPR IMC Aerodrome Operation in Instrumental Meteorological Conditions - Operación de Aeródromo en Condiciones Meteorológicas Instrumentales

AFGWC Air Force Global Weather Central - Central meteorológica global de la fuerza aérea de los Estados Unidos

AIREP Air Report - Aeronotificación

ALS Agua Líquida Sobreenfriada

ARS Aviation Reporting System - Sistema de informes de aviación

ATS Air Traffic Service - Servicio de tránsito aéreo

AV Avianca

AWS Air Weather Service - Servicio Meteorológico del Aire de los Estados Unidos

B Bias - Sesgo

BCFG Bancos de niebla

BKN Broken Sky - Cielo Fragmentado

CAL Contenido de Agua Líquida

CB Cumulonimbus

CC Fraction of Cloud Cover - Fracción de cobertura de nube

CIP Current Icing Product - Producto de Formación de Hielo Actual

CIP-sonde Current Icing Product Sonde - Producto de Formación de Hielo Actual por Sonda

CIP-sonde-A Adapted Current Icing Product Sonde - Producto de Formación de Hielo Actual por Sonda Adaptado

CLWC Specific Cloud Liquid Water Content - Contenido Específico de Agua Líquida en la Nube

c_p Calor específico

CTT Cloud Top Temperature - Temperatura de tope de la nube

CTTmap Cloud Top Temperature Interest map - Mapa de Interés de Temperatura de tope de la nube

CSI Critical Success Index - Índice Crítico de Éxito

CSS Clayton Skill Score - Puntuación de habilidad de Clayton

DRI Desert Research Institute - Instituto de Investigación del Desierto

e_i Presión de vapor con respecto al hielo

e_{si} Presión de vapor de saturación con respecto al hielo

ECMWF European Centre for Medium - Range Weather Forecasts - Centro Europeo para Pronósticos Meteorológicos de Mediano Alcance

ERA-40 Second generation ECMWF atmospheric reanalysis of the global climate - Segunda generación del reanálisis atmosférico del ECMWF del clima global

ERA-5 Fifth generation ECMWF atmospheric reanalysis of the global climate - Quinta generación del reanálisis atmosférico del ECMWF del clima global

F False Alarm Rate - Tasa de Falsas Alarmas

FAA Federal Aviation Administration - Administración Federal de Aviación

FAC Fuerza Aérea Colombiana

FAR False Alarm Ratio - Relación de Falsa Alarma

FDR Flight Data Recorder - Registrador de datos de vuelo

FEW Few clouds - Nubes escasas

FG Fog - Niebla

GFS Global Forecast System - Sistema de Pronóstico Global

GGs Gotas Grandes Sobreenfriadas

GOES Geostationary Operational Environmental Satellite - Satélite Geoestacionario Operacional Ambiental

GSS Gilbert Skill Score - Puntaje de habilidad de Gilbert

h Altura geopotencial

H Hit Rate - Tasa de Aciertos

HLC Hola Local Colombia

HSS Heidke Skill Score Heidke - Puntuación de habilidad de Heidke

HR Humedad Relativa

HR_i Humedad relativa con respecto al hielo

HRmap Relative Humidity Interest map - Mapa de Interés de Humedad Relativa

HZ Haze - Calima/Bruma

HR_w Humedad relativa con respecto al agua líquida

IDEAM Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

JAXA Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón - Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) para estudiar la lluvia. Estos datos son el resultado del algoritmo TMPA (Multi-satellite Precipitation Analysis TRMM)

Lig Ligero

LWC Liquid Water Content - Contenido de Agua Líquida

METAR Meteorological Aerodrome Report - Informe Meteorológico de Aeródromo

Mod Moderado

NASA National Aeronautics and Space Administration - Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio

NCAR National Center for Atmospheric Research - Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas de los Estados Unidos

NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration - Administración Nacional Oceánica y Atmosférica

NWS National Weather Service - Servicio meteorológico Nacional de los Estados Unidos

OACI Organización de Aviación Civil Internacional

OAT Outside Air Temperature - Temperatura del Aire Exterior

OVC Overcast sky - Cielo cubierto

P Presión

PC Proportion Correct - Proporción Correcta

PdE Probabilidad de Englamiento

PdP Probabilidad de Precipitación

PIREP Pilot Report - Reporte de Piloto

POTGGS Potencial de Gotas Grandes Sobreenfriadas

POTENG Potencial de Englamiento

PSS Peirce Skill Score - Puntaje de habilidad de Peirce

Q Yule's Q Skill Score - Puntuación de habilidad de Yule

Qcloud Relación de mezcla de agua de nube

Qrain Relación de mezcla de agua de lluvia

RAINC Precipitación convectiva acumulada

RAINNC Precipitación no convectiva acumulada

RAINSH Precipitación convectiva superficial

RAOB The Universal Rawinsonde Observation program - El programa de observación universal de radiosonda

RMK Remarks - Observaciones

SAT Static Air Temperature - Temperatura del Aire Estática

SCT Scattered Sky - Cielo Disperso

Sev Severo

SIG Sistema de Información Geográfica

SIGMA System of Icing Geographic Identification in Meteorology for Aviation - Sistema de Identificación Geográfica de Hielo en Meteorología para Aviación

SIGMET Significant Meteorological Information - Información meteorológica significativa

SIMFAC Sistema de Información Meteorológica para la Fuerza Aérea Colombiana y la Aviación de Estado

SKAR Código OACI aeródromo de Armenia

SKBO Código OACI aeródromo de Bogotá

SKBG Código OACI aeródromo de Bucaramanga

SKBQ Código OACI aeródromo de Barranquilla

SKCL Código OACI aeródromo de Cali

SKED Región de información de vuelo El Dorado para Bogotá

SKEJ Código OACI aeródromo de Barrancabermeja

SKIB Código OACI aeródromo de Ibagué

SKLT Código OACI aeródromo de Leticia

SKMU Código OACI aeródromo de Mitú

SKRH Código OACI aeródromo de Riohacha

SKSJ Código OACI aeródromo de San José del Guaviare

SKSM Código OACI aeródromo de Santa Marta

SKTQ Código OACI aeródromo de Tres Esquinas

SKUA Código OACI aeródromo de Marandúa

SKVP Código OACI aeródromo de Valledupar

SLD Supercooled Large Droplets

SLDPOT Supercooled Large Droplets Potential

SLW Supercooled Liquid Water - Agua líquida sobreenfriada

SLWS Supercooled Liquid Water Simulation - Simulación de Agua Líquida Sobreenfriada

T Temperatura

TAT Total Air Temperature - Temperatura Total del Aire

TCU Torrecúmulos

T_d Temperatura de punto de rocío

Tmap Temperature Interest map - Mapa de Interés de Temperatura

TMPA Multi-satellite Precipitation Analysis TRMM - Análisis de precipitación multisatélite TRMM

TRMM Tropical Rainfall Measuring Mission - Misión de Medición de Lluvia Tropical

TS Tormenta

UA Universidad de Arizona

UAEAC Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil

UW Universidad de Wyoming

USAF United States Air Force - Fuerza Aérea de los Estados Unidos

UTC Universal Time Coordinated - Tiempo Universal Coordinado

v Velocidad del aire

VCFG Fog in the Vicinity - Niebla en las Vecindades

VCSH Showers in the Vicinity - Chubascos en las Vecindades

WRF Weather Research and Forecasting model - Modelo de Investigación y Pronóstico del Tiempo

ZCIT Zona de Confluencia Intertropical

Resumen

El engelamiento en la aviación sucede cuando gotas de agua líquida sobreenfriada en la atmósfera (ALS o SLW por su sigla en inglés), se congelan y crean una capa de hielo en el exterior de las aeronaves, reduciendo la sustentación aerodinámica y causando daños en diferentes sistemas. Debido a la falta de observaciones y plataformas de investigación, Colombia no cuenta con información de frecuencia y distribución espacio-temporal de ambientes favorables para el engelamiento, denominado en este estudio potencial de engelamiento (POTENG); tampoco se evidencia la existencia de métodos para diagnosticar, monitorear y pronosticar este fenómeno, que ha sido relacionado con varios accidentes aéreos en el país.

En el presente estudio se estimó la climatología de POTENG mediante la implementación de dos algoritmos: el Current Icing Product Sonde (CIP-sonde; Bernstein *et al.* (2007)), adaptado a la disponibilidad de datos en el área de estudio (CIP-sonde-A), y el Supercooled Liquid Water Simulation (SLWS), basado en el ALS explícito calculado por modelos numéricos. Estos algoritmos requieren parámetros meteorológicos en superficie y en altura, para ello, se utilizaron observaciones METAR, radiosondeos y el reanálisis atmosférico de quinta generación del clima global (ERA-5) generado por el Centro Europeo para Pronósticos Meteorológicos a Medio Plazo (ECMWF).

Se realizaron pruebas para determinar cuál algoritmo detecta con mayor eficiencia eventos registrados a bordo de aeronaves a partir de los datos de ERA-5. También, se seleccionaron 8 casos de estudio en base a reportes y datos de las aeronaves, donde en cuatro de ellos se registra haber experimentado engelamiento y en los otros cuatro no se evidencia reporte directo del fenómeno. Estos casos, fueron analizados a través de observaciones que aportan a la detección de engelamiento y finalmente, se utilizó el Weather Research and Forecasting model (WRF) con la configuración de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC), para aplicar los dos algoritmos mencionados anteriormente y evaluarlos a partir de los casos específicos.

Los resultados revelan que a diferencia de SLWS, el algoritmo CIP-SONDE se ajustó más a los reportes de las aeronaves y produjo mejores pronósticos cuando se usó para los casos de estudio. Adicionalmente, se observó que POTENG sigue los patrones climáticos espacio-temporales asociados al ciclo anual de la lluvia y que en los resultados del ciclo diurno, POTENG tiende a ser más alto en horas de la noche y madrugada. En general, los resultados mostraron que el algoritmo CIP-sonde-A se ajustó más a los reportes de las aeronaves y produjo mejores pronósticos cuando se usó para los casos de estudio.

Finalmente, se realizaron recomendaciones para ayudar a disminuir el riesgo en el sector de seguridad aérea, a través del desarrollo de una evaluación y calibración

continua de las herramientas de diagnóstico y pronóstico aquí sugeridas. También, se propone hacer una recopilación constante y sistemática en la toma de datos a bordo de aeronaves, reportes e incidentes aéreos asociados a eventos meteorológicos, como el engelamiento y la turbulencia.

Abstract

Icing in aviation occurs when droplets of supercooled liquid water in the atmosphere (ALS or SLW) freeze and create a layer of ice on the exterior of aircraft, reducing aerodynamic lift and causing damage to aircraft systems. Due to the lack of observations and research platforms, Colombia does not have information on the frequency and spatio-temporal distribution of favorable environments for icing, referred to in this study as icing potential (POTENG); There is also no evidence of the existence of methods to diagnose, monitor and forecast this phenomenon, which has been related to several air accidents in the country.

In the present study the climatology of POTENG was estimated by implementing two algorithms: the Current Icing Product Sonde (CIP-sonde; Bernstein *et al.* (2007)), adapted to the availability of data in the study area (CIP-sonde- A), and the Supercooled Liquid Water Simulation (SLWS), based on the explicit ALS calculated by numerical models. These algorithms require meteorological parameters on the surface and in height, for this, METAR observations, radiosonde observations and the fifth generation atmospheric reanalysis of the global climate (ERA-5) generated by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) were used.

Tests were carried out to determine which algorithm most efficiently detects events recorded on board aircraft from the ERA-5 data. Also, 8 case studies were selected based on reports and aircraft data, where in four of them it is recorded that they had experienced icing and in the other four there was no direct report of the phenomenon. These cases were analyzed through observations that contribute to the detection of icing and finally, the Weather Research and Forecasting model (WRF) was used with the configuration of the Colombian Air Force (FAC), to apply the two algorithms mentioned above and evaluate them from the specific cases.

The results reveal that unlike SLWS, the CIP-SONDE algorithm adjusted more closely to aircraft reports and produced better forecasts when used for case studies. Additionally, it was observed that POTENG follows the spatio-temporal climatic patterns associated with the annual rain cycle and that in the results of the diurnal cycle, POTENG tends to be higher at night and early morning. Overall, the results

showed that the CIP-probe-A algorithm got more right to aircraft reports and produced better forecasts when used for case studies.

Finally, recommendations were made to help reduce risk in the aviation security sector, through the development of a continuous evaluation and calibration of the diagnostic and prognostic tools suggested here. Also, it is proposed to make a constant and systematic compilation of data on board aircraft, reports and air incidents associated with meteorological events, such as icing and turbulence.

Introducción

La formación de hielo en la superficie de los aviones es una amenaza latente que los aviadores deben prevenir, identificar y sortear en sus rutas, ya que esta condición puede causar pérdida de la sustentación, reducción de la velocidad, afectación a sistemas e incluso llevar a la pérdida del control de las aeronaves. Debido a las numerosas afectaciones negativas que trae la acumulación de hielo en un vuelo, el POTENG es un componente importante para el pronóstico del tiempo en aviación (Politovich, 2003). Considerables accidentes en la aviación mundial, tanto de vuelos comerciales como militares, han atribuido al engelamiento como causa principal, generando tanto pérdidas humanas como sobrecostos por daños para las entidades aeronáuticas.

Existen varios antecedentes de accidentes aéreos por engelamiento. Entre ellos, el 18 de mayo del 2011 un avión tipo Saab 340A de SOL Líneas Aéreas se estrelló a 20 km al norte de Prahuaníyeu, Argentina. De acuerdo a la investigación, el accidente se atribuyó a la creciente acumulación de hielo en el escudo de viento y los planos (AviationSafetyNetwork, 2015). Según Appiah-Kubi (2011), en Estados Unidos entre 1978 y 2010 se presentaron 1202 casos, entre eventos y accidentes aéreos, atribuidos a formación de hielo.

Lozano (2013) realizó un estudio estadístico a nivel mundial, acerca de accidentes aéreos entre 1967 y 2010 causados por fenómenos meteorológicos peligrosos para la aviación. Encontró que se atribuyen porcentajes considerables al engelamiento en algunas fases del vuelo, siendo las fases de aproximación y despegue las más frecuentes, los porcentajes de accidentes para la fase de despegue, ascenso, crucero, descenso, aproximación y aterrizaje fueron respectivamente 13.6 %, 6.8 %, 0.4 %, 1 %, 10.6 % y 8.8 %, comparado con otros fenómenos meteorológicos.

A nivel nacional, la FAC reporta accidentes fatales por influencia del engelamiento. El más reciente, corresponde a una aeronave CN-235 que presentó condiciones de engelamiento e impactó contra el terreno en inmediaciones a la Vereda La Paloma en el municipio de Codazzi, Cesar, el 31 de julio de 2015. También se registran otros 2 casos fatales y otros eventos en los que las tripulaciones han logrado sortear exitosamente estas condiciones.

La FAC y la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (UAEAC), son las entidades de autoridad aérea en Colombia. Actualmente sus pronosticadores, encargados de suministrar la información meteorológica y alertar a los pilotos de los riesgos de engelamiento en vuelo, basan sus métodos de detección y predicción en el uso de los productos desarrollados por entes internacionales. Estos algoritmos no han sido evaluados por parte de las entidades nacionales ni comparados con casos reales. Además, debido a la falta de mediciones mediante vuelos de investigación y de reportes de pilotos en vuelo (PIREP), hay poca información disponible sobre la distribución de frecuencia, espacial y temporal de la formación de engelamiento.

Al no identificarse esta distribución en el país, se pueden estar malinterpretando algunas herramientas o datos, generando información y pronósticos no acertados que puede causar una mayor probabilidad de que los tripulantes de vuelo ingresen a condiciones no deseadas y favorables para la formación de hielo, con el riesgo de provocar incidentes aéreos, daños en las estructuras de los aviones y hasta la pérdida de vidas.

Teniendo en cuenta los datos disponibles en Colombia, se escoge una versión adaptada del algoritmo CIP-SONDE Bernstein *et al.* (2007) y Bernstein y Le Bot (2009), con el objetivo de inferir POTENG en altura, combinando observaciones METAR en superficie y perfiles verticales de temperatura (T) y humedad relativa (HR) de radiosondeos. Con este algoritmo se desarrolla una climatología en las principales estaciones de radiosondeo en Colombia, donde los datos fueran suficientes para mostrar patrones estacionales y espaciales, en especial la estación de Bogotá. Paralelamente, se aplicó la lógica del CIP-sonde-A a datos de reanálisis utilizando la variable de fracción de cobertura de nube (CC), con el fin de comparar los resultados con las observaciones y así generar mapas de frecuencia de POTENG a nivel nacional de acuerdo a las mediciones obtenidas para 30 años.

También se desarrolla una climatología inferida, mediante las variables de temperatura y contenido específico de agua líquida en la nube (CLWC) calculada por el modelo de reanálisis de ERA-5.

Se propuso el uso de instrumentos de indicación en las aeronaves, así como el uso de los sistemas de registro de datos de vuelo FDR, como un medio más para detectar eventos basándose en la utilización de sistemas de deshielo y de alertas de presencia de hielo en la superficie de aeronaves que vuelan en rutas sobre el territorio colombiano. Lo anterior sumado las aeronotificaciones (AIREP) y reportes de Información meteorológica significativa (SIGMET) registrados en la UAEAC.

Basados en la climatología y los eventos registrados, se analizaron 8 casos de estudio mediante reportes METAR, cartas sinópticas, radiosondeos e imágenes satelitales. Finalmente se usó la configuración del modelo WRF de la FAC en combinación con dos algoritmos que estiman POTENG, para simular casos de estudio basados en los reportes mencionados anteriormente.

Estado del Arte

Después de los primeros vuelos instrumentados en nubes bajo cero, la formación de hielo en las aeronaves fue reconocida como un peligro en vuelo desde la década de 1930, posterior, entre 1940 y 1950 se realizaron vuelos de investigación donde se descubrió la presencia de gotas grandes sobreenfriadas (GGS o SLD en sus siglas en inglés) con diámetros mayores a $50\text{ }\mu\text{m}$ en la nube y desde la década de 1970 se lograron grandes avances para observaciones de partículas de nubes con nuevos instrumentos (McDonough *et al.*, 2007). Después de varios accidentes aéreos de gravedad causados por formación de hielo, en la década de los 1980 hacia adelante, se lograron grandes avances que dimensionaron la afectación del engelamiento y sus características de acuerdo a mediciones más sofisticadas, climatologías y comparación contra eventos reales.

Diferentes entidades internacionales como la Administración Federal de Aviación (FAA) y el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR) de Estados Unidos, han patrocinado el desarrollo de métodos para definir ubicaciones específicas y generales de condiciones de engelamiento y algoritmos que generan pronósticos de corto alcance (Bernstein *et al.*, 2005). Gracias a esto se han desarrollado importantes estudios basados en climatologías estimadas mediante algoritmos de detección con diferentes conjuntos de datos y evaluadas a partir de PIREP u observaciones en superficie.

Como ejemplo de estudio climatológico basado en observaciones de superficie, se encuentra el trabajo de Young *et al.* (2002), donde se adopta un enfoque estadístico en grandes regiones, donde se comparan observaciones de proporción de días con precipitación líquida, proporción de días con nubosidad y proporción de días con paso frío frontal contra PIREPs. Los datos de superficie son de gran importancia en la detección de condiciones de engelamiento; sin bien, en Colombia las condiciones de engelamiento no son afectadas directamente por frentes, ni se presentan lloviznas o lluvias heladas en superficie, los METAR pueden llegar a mostrar una correlación entre cobertura de nubes, tipo de nubes, fenómenos extremos y tipos de precipitación frecuentes en el territorio colombiano.

Por otra parte, en Bernstein *et al.* (2007) se notó la poca cobertura geográfica de las campañas hechas con aviones de investigación y que los PIREPS se concentran en lugares de alto tráfico aéreo. Es por esto que se generó una técnica para inferir la presencia o ausencia de formación de hielo y GGS en altura, utilizando observaciones de precipitación y capa de nubes, junto con perfiles verticales de temperatura y humedad obtenidos con radiosondeos. Posteriormente en el trabajo de Bernstein y Le Bot (2009), se suma el uso del algoritmo denominado Sistema de Identificación Geográfica de Hielo en Meteorología para Aviación (SIGMA), evaluando la posible presencia a escala global de formación de hielo a partir de las variables de temperatura y humedad relativa, obtenidas de los datos de Predicción Meteorológica del reanálisis ERA-40.

En Bernstein *et al.* (2007) se utilizaron los informes meteorológicos de superficie de 14 años para Canadá y la parte continental de Estados Unidos, estos datos fueron examinados utilizando una versión del algoritmo “Potencial Actual de Formación de Hielo” (CIP) llamado CIP-sonde. En Bernstein y Le Bot (2009) fueron utilizados el algoritmo SIGMA y CIP-sonde para analizar Europa, Asia, América del sur y otros sectores del globo, comparando los resultados con PIREPs. En estos estudios, se encontraron zonas y altitudes donde el POTENG representa su mayor frecuencia y estacionalidad. Sin embargo, no se hizo énfasis en el comportamiento del POTENG en la zona ecuatorial de América del sur, esto posiblemente por falta de datos en la zona.

Otro ejemplo de un estudio climatológico, es el realizado en USAF (1986), quienes desarrollaron un atlas climatológico de la frecuencia de POTENG sobre Estados Unidos. Partiendo del problema de no tener suficientes reportes PIREPs en esa época, tal y como sucede en Colombia en estos tiempos, estimando el contenido de agua líquida (CAL o LWC en sus siglas en inglés), utilizando el modelo informático Smith Feedes Liquid Wather Content. Como resultado, se obtuvo el porcentaje de ocurrencia de un umbral de concentración de CAL y un rango de temperatura definidos, generando 117 mapas mensuales y anuales de POTENG en diferentes capas.

En relación a los algoritmos de formación de hielo, se encuentra el estudio de Belo-Pereira (2015), donde se realiza una verificación de PIREPs contra varios de estos algoritmos aplicados a las predicciones del modelo ECMWF, evaluando así el potencial y gravedad del engelamiento pronosticado. La mayoría de los algoritmos revelaron un buen desempeño al discriminar entre condiciones de engelamiento y no engelamiento, pero fueron menos hábiles para pronosticar la intensidad. Los resultados también mostraron que el uso del CAL es esencial para evitar emitir demasiadas advertencias.

Se han desarrollado algoritmos que utilizan varias fuentes de datos, por ejemplo en Bernstein *et al.* (2005) el algoritmo CIP combina las observaciones de satélite, radar, superficie, rayo y PIREPs con la salida del modelo, para crear un diagnóstico detallado tridimensional del potencial de existencia de formación de hielo y GSS. Lo más destacado del análisis de este algoritmo, es el logro de utilizar múltiples tipos de datos y variables importantes, para aumentar o disminuir la probabilidad de presencia de engelamiento, a diferencia de otras técnicas que se basan en una sola fuente de datos. Al comparar el algoritmo con PIREPs, este pudo diagnosticar correctamente el 83.4 % de los PIREPs positivos.

Los aviones de investigación proporcionan la información más confiable sobre la presencia o ausencia de formación de hielo y las únicas observaciones in situ de GGS en altura. Sin embargo, la cobertura geográfica para estos conjuntos de datos es limitada, la muestra es pequeña y puede estar sesgada por el propósito del programa de vuelo. De acuerdo a estudios como Barbara Brown *et al.* (1997) y Kelsch y Wharton (1996), los PIREPs proporcionan

observaciones de formación de hielo, pero tienden a concentrarse en áreas donde el tráfico aéreo es mayor, se hacen con mayor frecuencia durante las horas del día y no reflejan adecuadamente la frecuencia de condiciones sin hielo. Los pilotos también evitan cruzar áreas de convección profunda que a menudo contienen hielo. Por lo tanto, los PIREPs son inapropiados para desarrollar una climatología de formación de hielo como única fuente.

La asociación de fenómenos de escala sinóptica al engelamiento también ha sido relevante, como en Bernstein *et al.* (1997), donde se destacó el uso de patrones meteorológicos a escala sinóptica, mediante gráficos de superficie y altitud, con el fin de comprender las relaciones físicas entre los patrones climáticos, los PIREPS y los fenómenos sinópticos presentados. Se determinaron orígenes de masas de aire, tipos de precipitación y nubosidad de acuerdo a datos de superficie, asociándolos con los PIREPS, los cuales fueron comparados con imágenes satelitales, radar y una red de detección rayos. Dando como resultado cuales fueron los fenómenos y ubicación más predominantes para la formación de hielo en los eventos, mejorando a así la información disponible en la Guía del pronosticador.

Las imágenes satelitales han sido otro método explorado por los investigadores. Por ejemplo Thompson *et al.* (1996), al evidenciar una predicción excesiva espacial del engelamiento en productos de pronóstico basados en la salida de los modelos numéricos, utilizaron un análisis satelital multiespectral basado en datos del Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución de NOAA. Mostraron que el alcance espacial de la producción de un modelo, puede reducirse cuando no hay nubes presentes, por lo tanto, donde la formación de hielo es improbable. Al utilizar los datos de satélite más los productos de modelo en conjunto, se mejoraron sustancialmente los resultados.

Capítulo 1

Climatología Potencial de Englamiento

1.1. Potencial de Englamiento

El englamiento en el área de la aviación, se define como el congelamiento de ALS de las nubes después de impactar sobre estructuras de la aeronave. ALS se encuentra a temperaturas de congelación o inferiores y hasta -40°C aproximadamente. Las gotas sobreenfriadas entran en contacto y se congelan en las áreas desprotegidas, proceso denominado “formación de hielo por impacto” (Gent *et al.*, 2000), afectando así la aeronavegabilidad del avión, lo que causa varios problemas en su funcionamiento.

El hielo adherido a superficies de las aeronaves afecta varios componentes como las hélices, antenas, el borde de ataque, también pueden ingresar dentro de sectores que tienen contacto con el aire exterior como el tubo pitot, carburador, entre otros (Cáceres, 2017). Al presentarse hielo en estas superficies, ocurre una afectación en el flujo incidente del aire, perturbando el flujo laminar y finalmente generando pérdida de la sustentación; asimismo, puede generar daños internos en el funcionamiento de los motores, causar problemas de control y en aviones ligeros aumentar el peso significativamente.

El englamiento se clasifica en intensidades y tipos de hielo. De acuerdo Cáceres (2017), la intensidad del englamiento se clasifica en “Traza”, “Ligero”, “Moderado” y “Severo”, dependiendo de la velocidad de acumulación de hielo, afectación a la aeronave y la necesidad de usar sistemas anti hielo o cambios de altitud. Los tipos de hielo se clasifican en “Claro”, “Opaco” y “Mixto”, los cuales se diferencian por su tiempo de acumulación, densidad y dificultad para desprenderse, donde el hielo claro es clasificado como el más peligroso.

Aunque la intensidad del englamiento y el tipo de formación de hielo es un tema importante, se presentan dos problemas principales para su estudio en el presente proyecto. El primero, es que la intensidad del englamiento puede ser vaga y subjetiva, ya que depende del tipo de aeronave, y por lo tanto, no se sabe cómo la intensidad informada por un avión se relaciona con intensidades en otros aviones más grandes o más pequeños (Jeck, 2001), además, se debe considerar si la cantidad de registros de intensidad que se presenten en los reportes a nivel nacional son suficientes para un análisis estadístico al respecto. Asimismo, los tipos de hielo no suelen reportarse, por lo cual para estudiar más afondo estos aspectos suelen considerarse el uso de vuelos de investigación.

Los conceptos más importantes para entender el sobreenfriamiento de las gotas de agua en las nubes son nucleación homogénea y heterogénea para partículas de hielo en las nubes. La nucleación homogénea para el hielo ocurre cuando se juntan varios átomos y forman un núcleo completamente rodeado de líquido, por el contrario, la nucleación heterogénea ocurre cuando el núcleo se forma sobre defectos, paredes o impurezas en la atmósfera (Houze, 1993).

Si a una masa de aire saturada se le añade vapor de agua o se le disminuye su temperatura por debajo del punto de rocío, el vapor de agua sobrante se condensa, generando tanto gotas de agua líquida sobre núcleos de condensación como cristales de hielo sobre núcleos de congelación, llevando a la formación de nubes. Se desarrollan así, procesos de nucleación heterogénea del agua líquida o hielo, pues el cambio de estado depende en ciertos límites de la existencia y el contacto con partículas extrañas. La baja concentración de núcleos de congelación activos en el rango de temperaturas de 0°C a -20°C , hace posible que existan en las nubes áreas muy extensas de gotas de ALS (Houze, 1993).

En la atmósfera, después de producirse el proceso de nucleación de vapor de agua a líquido, y formación de nubes por núcleos de condensación, las nubes pueden alcanzar temperaturas por debajo de 0°C , causando la existencia de gotas sobreenfriadas que pueden no congelarse, dependiendo de la existencia de partículas extrañas suspendidas llamadas núcleos de congelación. La congelación se facilita sobre superficies cristalinas cuya estructura sea geométricamente semejante a la del hielo. Los glaciógenos para el congelamiento en la atmósfera, actúan como núcleos de contacto, los cuales por colisión con una gotita sobreenfriada producen la congelación (Rogers, 1976). En el caso aeronáutico, las superficies que golpean las gotitas sobreenfriadas actúan como un núcleo por impacto.

Las nubes constituyen un sistema poco común, en el cual la masa de agua está distribuida en un gran número de gotas pequeñas, por lo cual cada una debe experimentar dentro de su propio volumen una nucleación individual. Sin embargo, la atmósfera está caracterizada por una abundancia relativa de núcleos de condensación y una gran escasez de núcleos de congelamiento, cuya cantidad depende en gran medida de la temperatura, como se observa en la Figura 1.1 (Rogers, 1976). Las mediciones extensivas indican que el número promedio de núcleos de hielo por litro de aire disminuye exponencialmente (Houze, 1993).

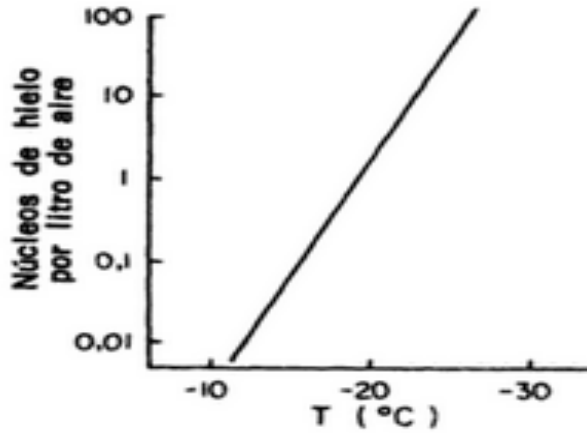


Figura 1.1: Variación típica de la concentración de núcleos de congelación con la temperatura (Rogers, 1976).

En la atmósfera es extremadamente rara la nucleación homogénea, es decir las sobresaturaciones por encima del 100 %, mientras que los sobreenfriamientos son relativamente frecuentes (Rogers, 1976). Por lo anterior, la forma más común de modificar artificialmente las nubes, es introduciéndoles núcleos de condensación o de hielo.

No obstante, hay un límite bajo el cual no se requiere de los núcleos de congelación para que se realice el cambio de estado. De acuerdo a Rogers (1976) al deducir que el valor de la energía libre hielo-líquido es de aproximadamente 20 erg/cm^2 , se llega a la conclusión de que gotas de agua pura menores de 2 micras se congelan espontáneamente a temperaturas de -40°C . En una nube natural es posible tener gotas líquidas sobreenfriadas en el rango de temperatura de 0°C a alrededor de -40°C , sin embargo, donde quiera que la temperatura en la nube sea inferior a -40°C , cualquier gota de líquido que esté presente se congela espontáneamente por nucleación homogénea (Houze, 1993).

Para poder entender mejor el concepto de agua sobreenfriada es necesario hablar de metaestabilidad. De acuerdo a Kalová (2012), los estados líquidos por debajo del punto de congelación normal y por encima del punto de ebullición normal se denominan metaestables. Esto es posible porque hay una barrera de energía contra la nucleación de la fase estable. Las perturbaciones menores en estados metaestables pueden desencadenar una aparición repentina de un núcleo de fases estables lo que se mencionó anteriormente como nucleación heterogénea para el hielo. En cambio, en la nucleación homogénea, se forma una nueva fase cuando alguna fluctuación supera la barrera de la energía libre y forma un núcleo de un tamaño crítico lo que conlleva a los límites de nucleación homogénea. La complejidad de la descripción de los

límites de estabilidad entre las fases fluidas y sólidas hace que los criterios de estabilidad aún no se hayan desarrollado (Zheng *et al.*, 1991). En la Figura 1.2 podemos observar los límites de interés para el agua líquida sobreenfriada.

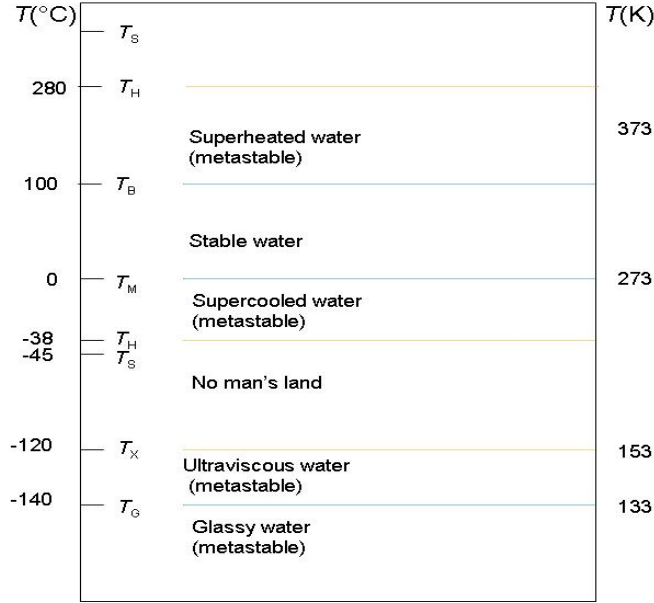


Figura 1.2: Límites termodinámicos y cinéticos entre el líquido y el hielo para agua líquida ordinaria a presión ambiente, T_M es el punto de fusión y T_H es la temperatura cinética spinodal. Por debajo de T_H es imposible evitar la cristalización (Mishima y Stanley, 1998), citado por (Kalová, 2012).

El potencial de englamiento (POTENG) es definido como un diagnóstico de probabilidad de existencia de agua líquida sobreenfriada (ALS) en determinado punto en el espacio (Bernstein *et al.*, 2005), (Bernstein *et al.*, 2007) y (Bernstein y Le Bot, 2009). Su valor es calculado con base en datos de diferentes observaciones, mediante lógicas basadas en los conceptos de física básica y aplicada de la nube en combinación con resultados de la experiencia de vuelo a bordo y programas de campo e investigación.

1.2. Sistemas Asociados a Englamiento

El englamiento básicamente es producido por gotas líquidas sobreenfriadas en la nube, por lo anterior, están asociados al fenómeno todos los sistemas que en diferentes escalas, directa o indirectamente aporten a la generación de nubes con contenido líquida y que lleguen a los rangos de temperaturas entre 0°C y -40°C aproximadamente.

1.2.1. Sistemas locales y de mesoescala asociados a englamiento

La formación de las nubes en un punto, se produce por el ascenso de masas de aire a causa de convección, advección, forzamiento orográfico, el encuentro de masas de aire o producto de ondas de gravedad o de montaña. Estas masas de aire al elevarse se expanden y se enfrían adiabáticamente alcanzando su punto de saturación, se produce condensación y se generan las gotas que forman las nubes sobre aerosoles llamados núcleos de condensación o núcleos higroscópicos. Dependiendo de las características microfísicas, las nubes se pueden clasificar de fase líquida, fase sólida y fase mixta.

Las nubes se clasifican según su altitud y su forma, donde las más relevantes son las de tipo estratiforme y cumuliforme. Las nubes de tipo estratos no suelen contener gran cantidad de CAL, pero si se producen gotas del tamaño de la llovizna, que al estar expuestas a temperaturas bajo 0°C , generan gotas sobreenfriadas. Además, este tipo de nubes puede cubrir extensas zonas en la horizontal y presentarse en diferentes niveles en la vertical.

Por otra parte, las nubes de tipo cúmulos suelen contener mayor CAL. Los sistemas más críticos son las nubes de convección profunda como los cumulonimbos o torrecúmulos, los cuales se caracterizan por abarcar la mayor parte de la tropósfera, cubriendo grandes profundidades verticales dependiendo de su etapa de desarrollo. Estas nubes, contienen grandes cantidades de ALS en la parte posterior, a causa de la concentración de CAL empujada por las corrientes ascendentes. Sin embargo, son fáciles de detectar y siempre se deben evitar por sus múltiples riesgos asociados como el englamiento, granizo, rayos y turbulencias.

Asimismo, los sistemas convectivos de mesoescala son una clasificación que se da a un conjunto de tormentas y lluvias que producen precipitación a escalas de 100 km en la horizontal, son grandes conglomerados convectivos casi estacionarios, que a su vez debido a su gran extensión pueden ser propicios para la formación de hielo en aeronaves. De acuerdo a IDEAM (2018), estos sistemas tienen un ciclo mínimo de vida de 18 a 36 horas, dan lugar a cielos nublados con precipitaciones de variada intensidad y suelen presentarse sobre el Amazonas, la parte oriental del océano Pacífico tropical, durante la estación lluviosa, especialmente entre mayo y junio. Estos sistemas tienen gran responsabilidad en las lluvias extremas que se

registran sobre el país (Cortes, 2012).

Otro tipo de nubosidad a tener en cuenta son las nubes de tipo orográfico, estas normalmente se generan por vientos perpendiculares que producen grandes ascensos de aire húmedo sobre la orografía, el aire tiende a enfriarse, alcanzado la saturación e intensificando las condiciones de engelamiento (Cáceres, 2017). Estas nubes no suelen tener gran desarrollo vertical, pero contienen grandes cantidades de CAL dependiendo de la humedad.

Por último, otros fenómenos locales como la brizas tierra-agua, valle-montaña y las islas de calor, producto de la diferencia de propiedades térmicas en cada ambiente, generan cambios en la dirección del viento y con ello el desplazamiento de las masas nubosas a determinada área de acuerdo a cada caso. Durante el día, la nubosidad tiende a concentrarse en las áreas montañosas y en la noche en la zona del valle, mientras que para la briza tierra-agua, la nubosidad tiende a concentrarse en la superficie durante el día y en la zona de agua durante la noche. Las islas de calor son las áreas urbanas, ya que el ladrillo, el concreto y otros materiales característicos de las ciudades, producen mayor calentamiento durante el día que el área rural, donde dependiendo de la humedad produce mayor concentración nubosa en la ciudad durante el día y para el área rural en la noche.

1.2.2. Sistemas sinóticos y de macroescala asociados a engelamiento en Colombia

Colombia se ubica en la zona Ecuatorial, allí se encuentra la mayor influencia y absorción de energía solar en la Tierra, además se presentan los vientos provenientes del noreste y del sureste, denominados vientos alisios, consecuencia del efecto Coriolis generado por la rotación terrestre y altas presiones en el Pacífico Sur, Pacífico Norte, Atlántico Norte y Atlántico sur. El encuentro de estos vientos cerca al Ecuador genera convergencia y obligan al aire cálido ecuatorial a elevarse formándose los patrones ascendentes de la Celda de Hadley (IDEAM, 2018). El movimiento ascendente de las masas de aire húmedas genera enfriamiento y condensación, lo cual favorece desarrollo de un cinturón los sistemas nubosos y precipitaciones denominado la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT). Esta, varía en su posición latitudinalmente dependiendo del ángulo de incidencia del sol a la tierra durante el ciclo anual, entre los 5° de latitud sur a inicio de año y los 4° norte en los meses de julio y agosto, para moverse de nuevo hacia el sur (Jaramillo y Chaves, 2000).

Entre mayo a noviembre también es frecuente la llegada de perturbaciones de tipo ondulatorio que provienen del este tropical. Estas, pueden afectar a Colombia cuando tienen contacto con determinada zona, causando incremento de nubosidad a medida que se aproxima el eje de la onda, suelen tener espesores de 6 a 8 kilómetros, unos 2.000 km de longitud y se des-

plazan a velocidades de 15 a 30 kmph (IDEAM, 2018). Las ondas del este se pueden detectar mediante cartas de viento, como ondulaciones con movimientos de rotación ciclónica y en las imágenes satelitales se observan concentraciones nubosas en forma de “V” invertida (UCAR, 2007) o sistemas convectivos adelante o atrás del eje la onda según su inclinación. Finalmente, al intensificarse, pueden afectar el caribe colombiano en forma de depresión tropical, tormenta tropical o huracán.

Por otra parte, un sistema nuboso que afecta al litoral colombiano es la baja anclada de Panamá. Es un sistema ciclónico estacional bastante intenso, que puede extenderse hasta la Cordillera Oriental y modificar significativamente el tiempo de la región Andina, este sistema cuenta con poca movilidad dentro del ciclo anual (Zea, 2003).

Mas indirectamente, las zonas frontales frías también afectan las condiciones de nubosidad en el país entre mayo y noviembre, particularmente a mediados de año se desplazan en áreas cercanas a los 20° de latitud, mientras que en Sudamérica las masas frías con frecuencia se mueven entre los 5° de latitud, atravesando en algunas ocasiones el Ecuador. Al incursionar en zonas tropicales este aire se inestabiliza y forma líneas de inestabilidad, las cuales dan lugar a convección organizada en la Amazonía colombiana y eventualmente, si estos sistemas son intensos pueden llegar a modificar el estado del tiempo a lo largo de la Cordillera Oriental y en parte de la Orinoquía colombiana (IDEAM, 2018).

Un sistema que incide sobre la circulación atmosférica del sureste del país, corresponde al sistema de baja presión en niveles bajos de la cuenca amazónica, conocida con el nombre de baja amazónica. Este sistema semipermanente se desplaza desde el norte de Bolivia en enero hasta el extremo sureste de Colombia en julio (IDEAM, 2018).

La Alta de Bolivia es otro fenómeno que afecta el sur del país, es un anticiclón con núcleo caliente que se ubica en la troposfera media y alta, transportando humedad desde el Amazonas y favoreciendo la formación de nubes. Asimismo, La Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS) es una zona donde convergen las masas de aire tropicales y las masas de aire subtropicales, se forma generalmente cuando los frentes fríos se debilitan y estacionan al sudeste del Brasil y se localiza frecuentemente en verano sobre el norte y noreste del continente sur americano, afectando parte del suroccidente del país. Muchas veces cuando se asocia a la Alta de Bolivia, generan grandes núcleos de mal tiempo (Guzmán *et al.*, 2014).

Las corrientes en chorro en Colombia también afectan significativamente, principalmente en dos zonas específicas. La primera es la corriente en chorro de niveles bajos en el Caribe, el cual se produce por la influencia de la circulación subtropical en niveles altos que genera un arrastre de los vientos Alisios en superficie con velocidades entre los 20 y 30 kt, se localiza aproximadamente a unos 10° a 15° norte de latitud y al contener humedad en las capas bajas, facilita la formación de nubes (Guzmán *et al.*, 2014). La segunda es la corriente en chorro del choco, esta tiene dirección oeste-este con un ciclo anual muy fuerte, es responsable por la fuerte

advección de humedad desde el Océano Pacífico hacia el interior de Colombia y más fuertes en los meses de septiembre-noviembre y más débiles durante los meses de febrero-marzo.

La vaguada tropical de alta troposfera (TUTT), es una vaguada de niveles altos que separa la dorsal subtropical de la dorsal ecuatorial en el Pacífico norte o en el Atlántico norte, se localiza desde el noroccidente de la costa de África hasta el extremo suroccidental del Caribe y en ocasiones alcanza el oriente del Pacífico ecuatorial, presentándose aproximadamente entre junio y noviembre. Este sistema puede generar grandes núcleos nubosos dependiendo del calor y la humedad presente en las dorsales (Zea *et al.*, 2000).

Los sistemas mencionados anteriormente, ayudarán a gran medida, para el análisis de algunos patrones climáticos y casos específicos estudiados.

1.3. Datos y Metodología

1.3.1. Datos

Para la realización de la primera parte de la climatología se utilizaron datos de las estaciones de radiosondeo en Colombia, donde los datos fueran suficientes para detectar patrones temporales del fenómeno. Se seleccionó como fuente principal la estación de Bogotá (código: 80222) con 12 años de datos. Para el análisis en otros sectores de Colombia se seleccionaron estaciones que contaron con menor cantidad de años de datos, 9 años para la estación de Leticia (código: 80398), 8 años para la estación de Tres Esquinas Caquetá (código: 80371), 8 años para la estación de Riohacha (código: 80035) y 3 años para la estación de Cali (código: 80259). Los datos necesarios para la aplicación de los algoritmos se encuentran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Variables de radiosondeo requeridas

Variable	Unidad
Temperatura (T)	°C
Temperatura de punto de rocío (T_d)	°C
Humedad Relativa (HR)	%
Presión (P)	hPa
Altura Geopotencial (h)	m

Las estaciones de Barranquilla (código: 80028), Marandúa (código: 80140) y Bucaramanga (código: 80094), solo contaban con 1 año de datos, por lo cual no fueron utilizadas para la comparación de observaciones en la climatología. Sin embargo, los resultados de datos faltantes y la climatología de estas estaciones con observaciones y reanálisis, se pueden encontrar en los Anexos A y C.

Se obtuvieron los datos diarios de las 12:00 UTC en UW (2018), desde la página de la Universidad de Wyoming. Asimismo, se realizó filtro y conversión de los datos a los formatos adecuados para facilidad en el manejo de los mismos.

Para la climatología también se utilizaron el conjunto de datos de reanálisis ERA-5, con las características y variables que se observan en las Tablas 1.2 y 1.3.

Tabla 1.2: Características datos de reanálisis ERA-5 utilizados para climatología

ERA-5	
Parámetro	Descripción
Niveles	1000 - 50 hPa (cada 50 hPa)
Años	1989-2018
Mases	Todos
Horas	intervalo de 6 horas (00, 06, 12, 18) UTC
Resolución espacial	0.25°
Formato	Netcdf

Tabla 1.3: Variables requeridas de ERA-5

Variable	Unidad
Temperatura (T)	°C
Humedad Relativa (HR)	%
Contenido específico de agua líquida en la nube (CLWC)	$kg*kg^{-1}$
Fracción de nubosidad (CC)	0 - 1

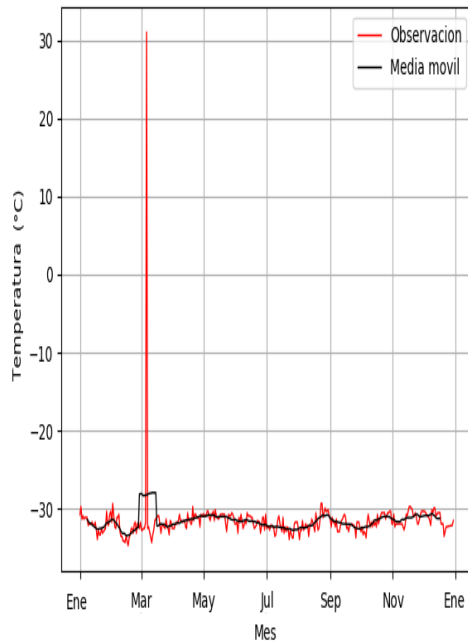
Para el control de calidad de datos de radiosonda, se realizó una revisión mediante un análisis exploratorio adicional a los procedimientos cotidianos que realizan el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la FAC para cada estación. Se incluyeron a la climatología solo aquellos radiosondeos que reportaban humedad relativa al menos hasta los niveles que registran -35°C y que fueran lo suficientemente profundos para alcanzar la temperatura de -40°C , donde las nubes en la fase de hielo podían dominar y con al menos 25 niveles registrados (Bernstein *et al.*, 2007).

Se realiza otro proceso de calidad de datos, detectando datos atípicos para cada una de las variables que afectan el resultado para el cálculo del POTENG. Se detectaron datos atípicos como temperaturas con signos errados, temperaturas con cambios abruptos en la vertical, datos que no tenían ninguna lógica e inconsistencias entre niveles de presión y altitud; por ejemplo, que la altitud del nivel de 300 hPa fuera mayor que la de 200 hPa. Finalmente, se chequeó la ausencia de humedades relativas negativas de acuerdo a Wang y Rossow (1995).

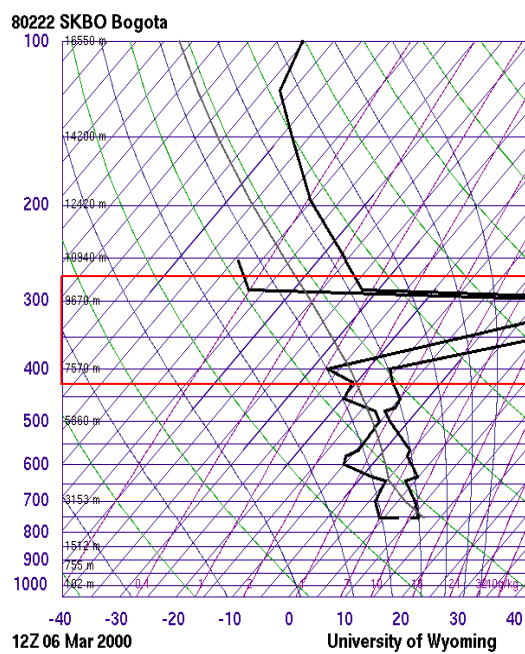
En la Figura 1.3 se puede observar un ejemplo de datos erróneos que fueron corregidos con el procedimiento. En este caso se detectó temperatura atípica en la isobara de 300 hPa, se verificó el diagrama Skew-T y la lista de datos observando que los niveles de 300, 309 y 350 hPa contenían un cambio de temperatura de -32°C a 31°C , eliminando finalmente los niveles errados. En el caso de que los errores afectaran demasiados niveles, los documentos de radiosonda se eliminaron en su totalidad. En la Tabla 1.4 se observa cada una de las estaciones

y la cantidad de días eliminados por datos erróneos.

(a) Dato atípico de Temperatura en el nivel de 300 hPa



(b) Skew-t de Wyoming



(c) Comprobación de datos en la fuente

80222 SKBO Bogota Observations at 12Z 06 Mar 2000

PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	DRCT deg	SKNT knot	THTA K	THTE K	THTV K
1000.0	102									
925.0	755									
850.0	1512									
753.0	2546	10.0	7.6	85	8.77	70	5	307.1	333.9	308.7
751.0	2568	11.2	4.2	62	6.93	72	5	308.6	330.1	309.9
735.4	2743	10.2	3.2	62	6.61	85	7	309.4	330.1	310.6
700.0	3153	8.0	1.0	61	5.91	95	8	311.3	330.0	312.4
683.1	3353	6.7	0.7	65	5.91	90	12	312.0	330.8	313.1
658.2	3658	4.7	0.1	72	5.90	115	16	313.1	331.9	314.2
643.0	3850	3.4	-0.2	77	5.90	101	15	313.7	332.6	314.9
631.0	4003	4.8	-3.2	56	4.81	90	14	317.0	332.7	317.9
610.8	4267	3.0	-7.5	46	3.60	70	12	318.0	329.9	318.7
599.0	4426	2.0	-10.0	41	3.00	70	12	318.5	328.6	319.1
588.2	4572	1.0	-10.5	42	2.93	70	12	319.0	328.9	319.6
578.0	4713	0.0	-11.0	43	2.87	56	13	319.5	329.2	320.0
566.3	4877	-0.4	-9.8	49	3.24	40	14	320.9	331.8	321.5
564.0	4909	-0.5	-9.5	51	3.32	43	14	321.1	332.3	321.8
524.3	5486	-5.2	-9.9	70	3.47	90	17	322.2	333.9	322.9
500.0	5860	-8.3	-10.1	87	3.57	90	21	322.9	334.9	323.6
485.0	6096	-9.9	-11.7	87	3.25	85	17	323.7	334.8	324.3
478.0	6208	-10.7	-12.4	87	3.10	98	19	324.1	334.7	324.7
472.0	6305	-9.3	-14.3	67	2.69	109	21	327.0	336.4	327.5
466.2	6401	-9.5	-16.0	59	2.37	120	23	327.9	336.3	328.4
453.0	6623	-9.9	-19.9	44	1.75	116	24	330.1	336.4	330.4
430.6	7010	-12.7	-20.5	52	1.75	110	26	331.3	337.7	331.7
423.0	7147	-13.7	-20.7	56	1.75	114	25	331.8	338.1	332.1
400.0	7570	-16.1	-27.1	38	1.04	125	22	334.0	337.9	334.2
397.3	7620	-15.0	-26.1	38	1.15	110	17	336.1	340.4	336.3
350.5	8534	5.5	-8.2	36	5.91	145	31	376.0	399.6	377.3
309.2	9449	26.0	9.7	36	25.17	145	37	418.4	533.4	424.6
300.0	9670	31.0	14.0	36	35.04	150	47	429.0	599.4	437.9
286.0	10042	-32.9	-52.9	12	0.10	150	49	343.6	344.0	343.6
272.6	10363	-35.7	-55.3	12	0.08	150	51	344.2	344.6	344.2

Figura 1.3: Ejemplo de detección y corrección de datos atípicos.

Tabla 1.4: Ubicación estaciones y datos faltantes posterior realización de calidad de datos.

Estación	Código	Coordenadas	Periodo disponible para estudio (fecha inicial/ fecha final)	Días faltantes sin calidad de datos	Días faltantes con calidad de datos
Bogotá	80222	Lat 4.70 Lon -74.15	01-01-2007/ 31-12-2018	655	653
Leticia	80398	Lat -4.55 Lon -69.53	01-01-2009/ 31-12-2018	1292	1286
Tres Esquinas	80371	Lat 0.75 Lon-75.23	01-01-2009/ 31-12-2018	1917	1913
Cali	80259	Lat 3.54 Lon -76.39	01-01-2016/ 31-12-2018	391	391
Riohacha	80035	Lat 11.53 Lon -72.93	01-01-2009/ 31-12-2016	1806	1803
Barranquilla	80028	Lat 10.53 Lon -74.46	01-01-2018/ 31-12-2018	208	208
Bucaramanga	80094	Lat 7.06 Lon -73.12	01-02-2018/ 31-12-2018	162	161
Marandúa	80140	Lat 5.53 Lon -68.69	23-05-2017/ 31-12-2018	575	575

En cuanto a los datos de radiosondeo faltantes, en la Figura 1.4, se observa que los años más relevantes para Bogotá son 2008 y 2007, con ausencia de datos del 80 y 30 % respectivamente. Asimismo, Leticia reporta faltantes por debajo del 40 %, a excepción de los años 2011, 2012 y 2013, los cuales registran ausencias entre el 50 % y 60 %. Para Tres esquinas hay una tendencia de datos faltantes del 60 %, salvo 2016 y 2018 que alcanzan un 80 %. La estación de Cali muestra en 2016 una ausencia de datos de 50 % y en 2018 de 35 %, finalmente, Riohacha registra los faltantes más relevantes en los años de 2011, 2012 y 2015, con valores entre 70 % y 90 %, 2013, 2014 y 2016 se acercan al 60 %, mientras que 2009 y 2010 se encuentran por debajo de 40 %.

En la Figura 1.5 se observa que para Bogotá, durante agosto, septiembre y octubre existe un aproximado del 40 % de datos faltantes, los meses restantes se encuentran por debajo del 35 %. Para Leticia se observa que entre enero de julio existe una variación entre el 35 % y 40 % de datos faltantes, mientras que entre agosto y diciembre varía entre los 25 % y 30 %. Para Cali, de enero a mayo los datos faltantes se encuentran entre el 40 % y 70 %, de junio a julio se mantiene por debajo de 20 % y de octubre a diciembre aumenta aproximadamente hasta un 30 %. Para Tres Esquinas se observa que el mes más crítico es enero, donde los datos faltantes

llegan a un 75 %, en el resto del año varían en un rango cercano entre el 50 % y 60 %, por último, para Riohacha de diciembre a abril se observan faltantes entre 50 % y 60 % y para los meses restantes varía entre 50 % y 70 %.

Conjuntamente con los datos de radiosondeo, se usaron reportes METAR de las 12:00 UTC, provenientes de las bases de datos de IDEAM y FAC, correspondientes a las mismas estaciones y períodos de tiempo de los radiosondeos. Para estos reportes solo se utilizaron las variables de cobertura y techo de nubes.

En cuanto a los datos METAR faltantes por año, de acuerdo a la Figura 1.6, se evidencia que Bogotá no sobrepasa el 5 %, a excepción del año 2017 con 25 %, por otra parte Riohacha entre 2012 y 2016 muestra porcentajes de datos faltantes entre 40 % y 60 % a excepción de 2015 donde no se encontraron reportes disponibles. Con respecto a los faltantes mensuales, en la Figura 1.7, Bogotá muestra ausencias en febrero con un 20 %, marzo con 15 % y julio, agosto, octubre y noviembre con 10 %, el resto de meses no supera el 5 %, mientras tanto para Riohacha para la gran mayoría de los meses registra ausencias entre el 30 % y 50 %, a excepción de septiembre donde sobrepasa el 60 %. Para Cali, Leticia y Tres Esquinas los datos faltantes mensuales no superan el 5 %.

Los reportes METAR no presentan faltantes significativos, a excepción de la estación de Riohacha, sin embargo, los datos de radiosondeo y en especial de Tres Esquinas y Riohacha, muestran datos faltantes mayores a 50 %, no obstante, se desarrollará el análisis basado en la frecuencia total de eventos de los datos disponibles. Cabe aclarar que los datos faltantes anteriormente descritos, pueden generar posibles patrones erróneos en las climatologías y deben ser tenidos en cuenta a la hora del análisis.

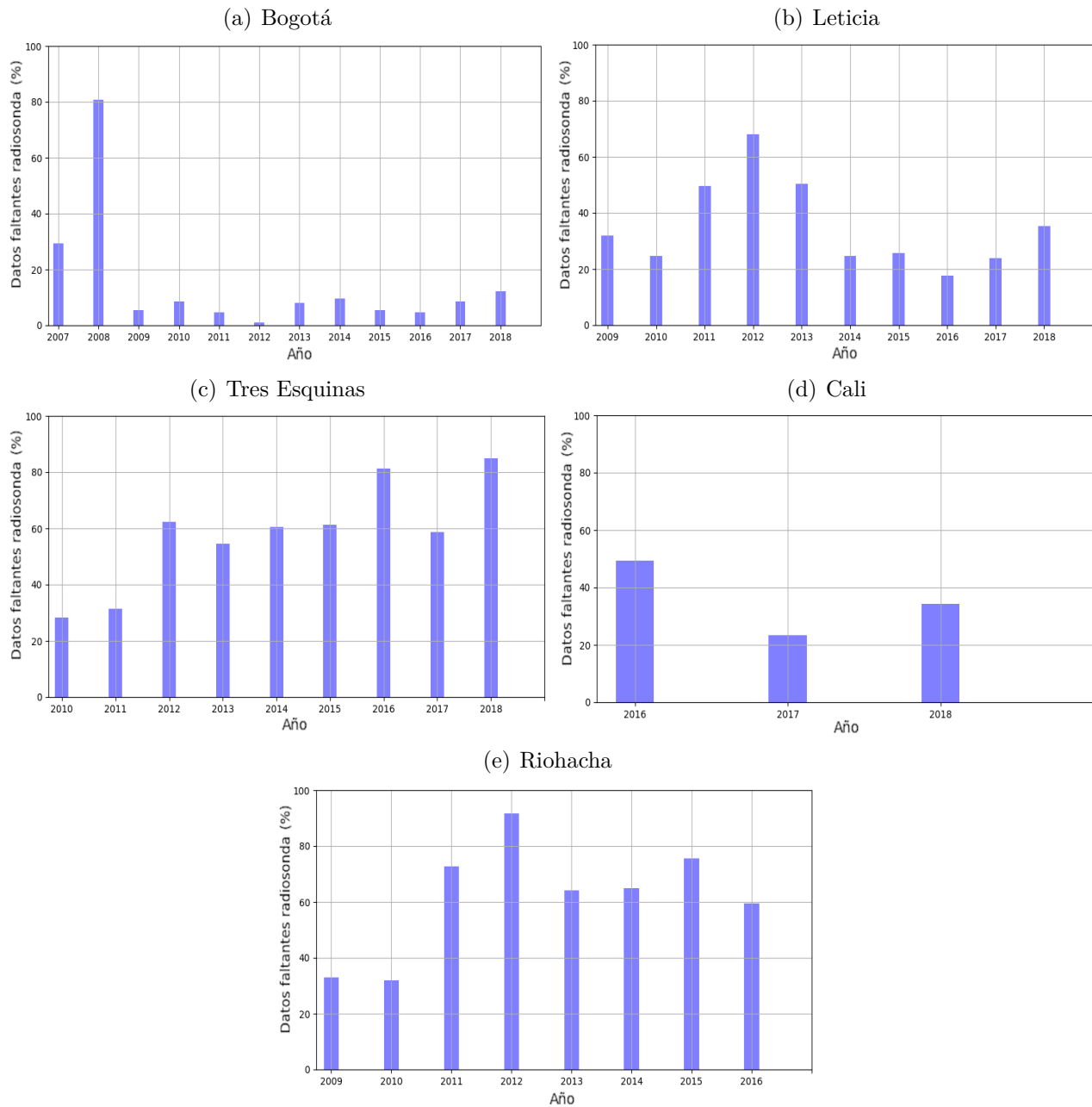


Figura 1.4: Datos faltantes de radiosondeos anual, (a) Bogotá de 2007 a 2018, (b) Leticia de 2009 a 2018, (c) Tres Esquinas de 2010 a 2018, (d) Cali de 2016 a 2018 y (e) Riohacha de 2009 a 2016.

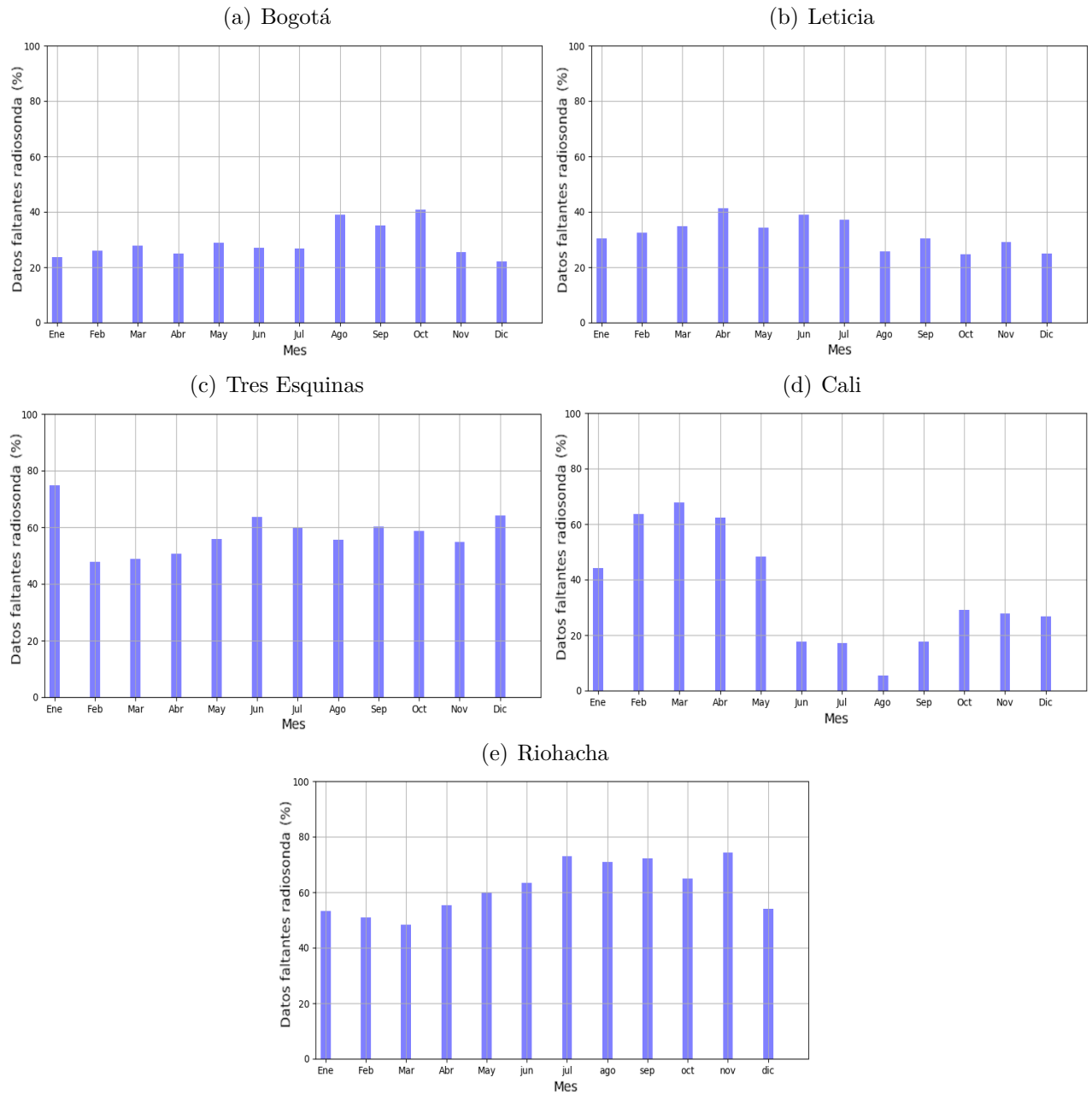


Figura 1.5: Datos faltantes de radiosondeos mensual, (a) Bogotá de 2007 a 2018, (b) Leticia de 2009 a 2018, (c) Tres Esquinas de 2010 a 2018, (d) Cali de 2016 a 2018 y (e) Riohacha de 2009 a 2016.

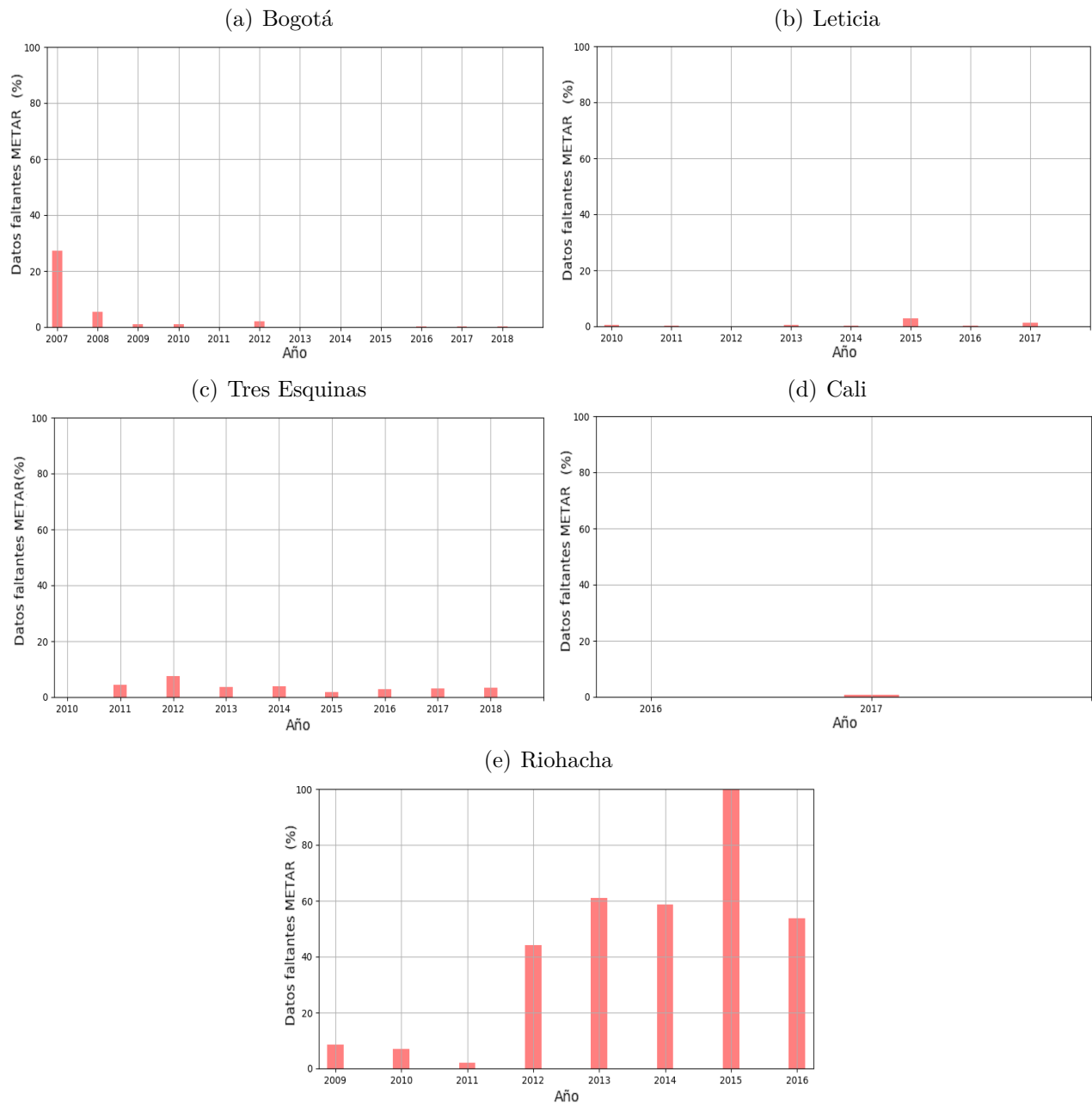


Figura 1.6: Datos faltantes de reportes METAR por año, (a) Bogotá de 2007 a 2018, (b) Leticia de 2009 a 2018, (c) Tres Esquinas de 2010 a 2018, (d) Cali de 2016 a 2018 y (e) Riohacha de 2009 a 2016.

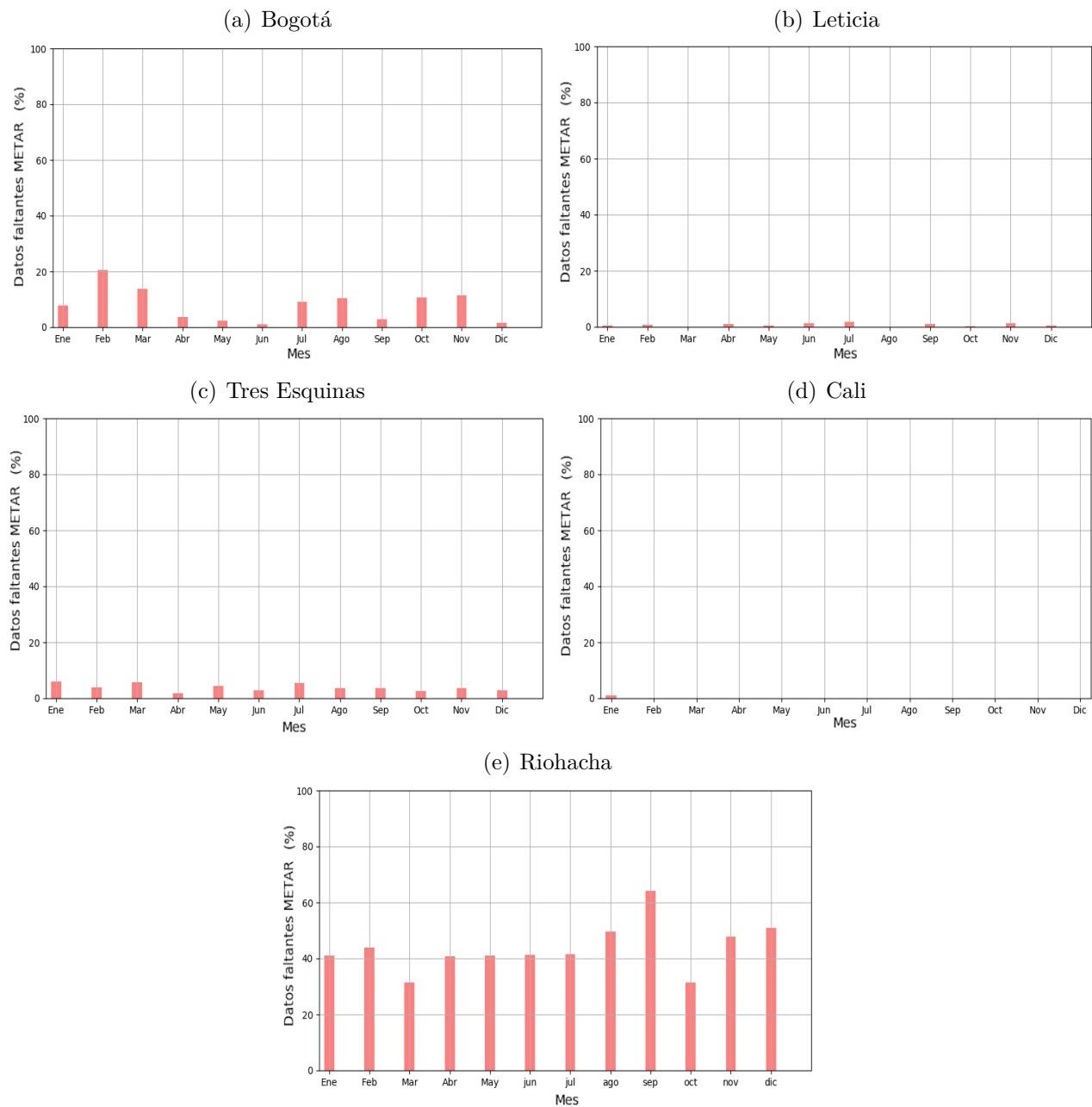


Figura 1.7: Datos faltantes METAR por mes, (a) Bogotá de 2007 a 2018, (b) Leticia de 2009 a 2018, (c) Tres Esquinas de 2010 a 2018, (d) Cali de 2016 a 2018 y (e) Riohacha de 2009 a 2016.

1.3.2. Selección y análisis de algoritmos de potencial de englamiento

Para la elaboración de la climatología, se requiere determinar los criterios para limitar y cuantificar el concepto de POTENG. Para lo anterior se consultan algoritmos que en primera instancia logren estimar el POTENG teniendo como datos de entrada las variables obtenidas por medio de radiosondeos.

Los criterios tomados en cuenta fueron:

- 1) El algoritmo debe basarse en los límites de variables lógicas a la teoría de producción de agua líquida sobreenfriada en la atmósfera.
- 2) El algoritmo debe inferir la formación de nubes mediante metodologías prácticas y sustentables, además que permita de manera funcional el trabajo con datos de radiosondeos.
- 3) El algoritmo debe ser replicable preferiblemente documentado o con facilidad de acceso a su lógica y con los permisos requeridos por los creadores para el uso en el presente documento.

Se tuvieron en cuenta dos fuentes principales para elegir el algoritmo a utilizar:

1.3.3. Algoritmos RAOB

El primer programa analizado fue The Universal Rawinsonde Observation program (RAOB), un software de sondeo que decodifica automáticamente datos de diferentes formatos y los grafica en diagramas como skew-T, hodografías, secciones transversales y produce visualizaciones de más de 200 parámetros atmosféricos entre los que incluye formación de hielo (RAOB, 2018).

La formación de hielo se calcula en RAOB con tres metodologías diferentes: Smith-Feddes, Air Force Global Weather Central AFGWC y United States Air Force (USAF), que se pueden elegir en la interfaz durante la configuración del software. Estos algoritmos están descritos brevemente en el manual de usuario RAOB y los documentos de origen proporcionados por la compañía, como se muestra a continuación.

El algoritmo de Smith-Feddes ((Smith, 1974) y (Feddes, 1974)) se basa en los valores iniciales máximos de CAL en la nube para cada nivel. Estos valores se ajustan para la altura relativa dentro de la nube y se infiere en función de la temperatura, el tipo de nube, la presencia de precipitación y el porcentaje de cobertura del cielo. Las nubes y la precipitación pueden ingresarse manualmente o determinarse automáticamente usando la Tabla de la capa de nubes de RAOB (Shewchuk, 2018).

El algoritmo AFGWC desarrollado por Air Force Global Weather, se describe en Cornell *et al.* (1995). Este método es el predeterminado para RAOB; tiene tres categorías con valores de depresión de punto de rocío y la tasa de decrecimiento de la temperatura entre cada nivel, para determinar las condiciones de congelación como dependencias de estabilidad diseñadas para distinguir individualmente todos los tipos y severidades de la formación de hielo.

El algoritmo de la United States Air Force (USAF) se basa en los estudios del Servicio Meteorológico (AWS, 1980). En lugar de utilizar las capas de nubes como un requisito para la formación de hielo como el método de Smith Feddes, el método de la USAF determina la humedad suficiente utilizando un valor mínimo de humedad relativa como umbral de formación de hielo definible por el usuario durante la configuración del programa. Este método depende de la existencia de sistemas frontales. RAOB determina automáticamente la presencia frontal a través de inversiones frontales, este software también permite al usuario anular la detección frontal (Shewchuk, 2018).

Los algoritmos de RAOB no fueron replicados ni usados para hacer la climatología, pues al ser un software comercial, los códigos y la información detallada para su réplica no están disponibles para el público. Sin embargo, los resultados de RAOB fueron utilizados para realizar comparaciones con el algoritmo seleccionado.

1.3.4. Algoritmo CIP-sonde

La segunda fuente considerada fue el algoritmo CIP-SONDE, esta es una versión especial del algoritmo CIP (Bernstein *et al.*, 2005). CIP-SONDE cuenta con dos módulos, el primero calcula potencial de engelamiento (ICEPOT en sus siglas en inglés, en este documento POTENG) y el segundo calcula potencial de gotas grandes sobreenfriadas (SLDPOT en sus siglas en inglés, POTGGS en este documento). Los dos módulos tienen como datos de entrada reportes METAR y datos de radiosondeos. Este algoritmo cuenta con una documentación útil para su implementación, en el presente proyecto se cuenta con la asesoría y los permisos del National Center For Atmospheric Research (NCAR) y el señor Ben Bernstein uno de los autores del algoritmo. Los pasos que desarrolla el algoritmo, se presentan en el diagrama de flujo en la Figura 1.8. En el presente documento no presentan todos los detalles del algoritmo debido al compromiso de confidencialidad de la información hecho con la NCAR, dueños del mismo.

En el presente trabajo se realiza una adaptación del algoritmo CIP-Sonde a lo datos disponibles y condiciones del país, denominada CIP-sonde-A. El diagrama de flujo para este algoritmo, se observa en la Figura 1.9.

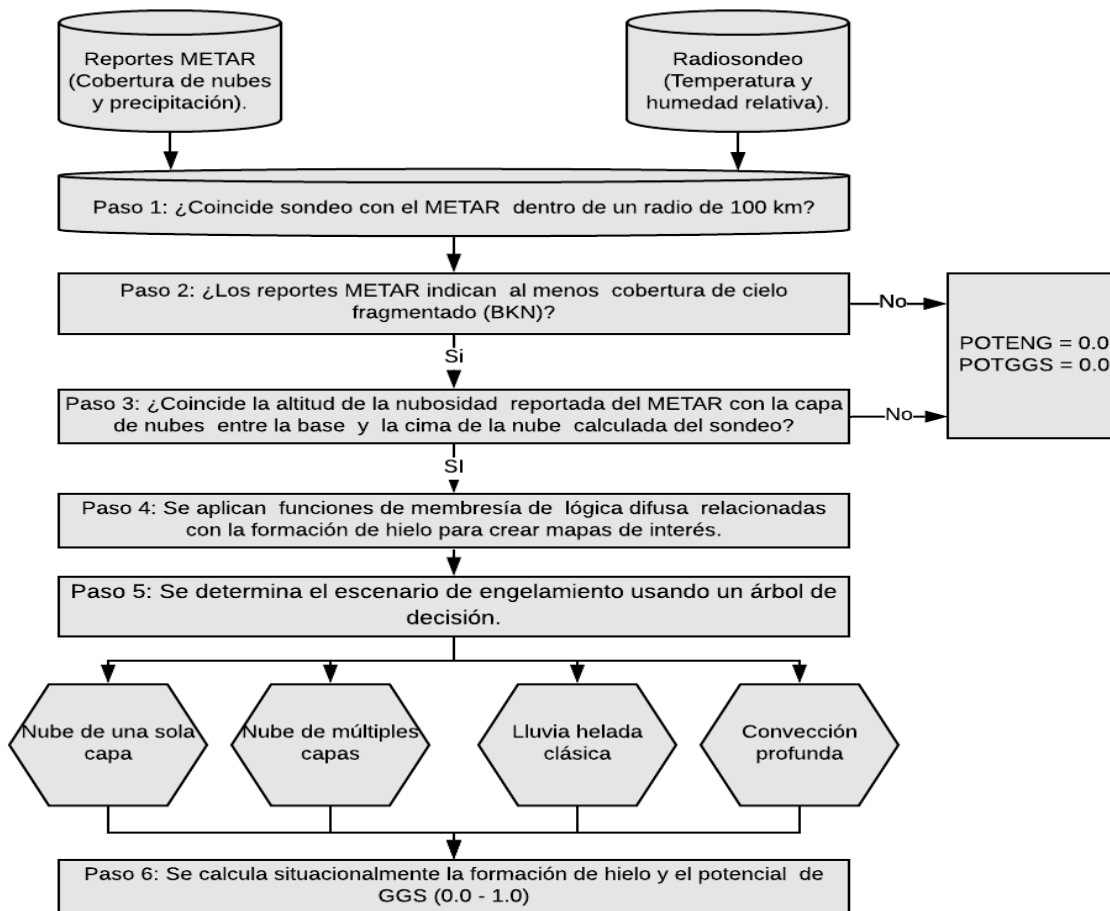


Figura 1.8: Diagrama de flujo del algoritmo CIP-sonde (Bernstein *et al.*, 2007)

Para CIP-sonde-A en el desarrollo de los pasos 1, 2 y 3, se implementó un filtro que compara el reporte METAR de las 12:00 UTC con el radiosondeo del día, en este proceso el reporte METAR más cercano debe reportar una capa de nubes de cielo fragmentado (BKN) o cubierto (OVC) para que se pueda calcular POTENG, además debe coincidir con el techo de nubes reportado en la capa, de no cumplirse las anteriores condiciones POTENG es igual a 0.0.

El algoritmo original infiere la presencia de nubosidad y con ella POTENG a una escala de 100 km, es decir que toma los datos de reportes METAR a 100 km a la redonda con respecto a una estación radiosondeo. Sin embargo, para la implementación de CIP-sonde-A solo se utiliza el METAR más cercano a la estación de radiosondeo, esto debido a la lejanía entre las estaciones que cuentan con reportes METAR en el país, las pocas estaciones en algunas zonas y la complejidad en la orografía que genera grandes variaciones en el comportamiento

del tiempo en distancias tan grandes. Por lo anterior, la escala horizontal para el valor de POTENG en este trabajo, es igual a la distancia de observación que tienen los observadores del aeródromo donde se reporta el METAR.

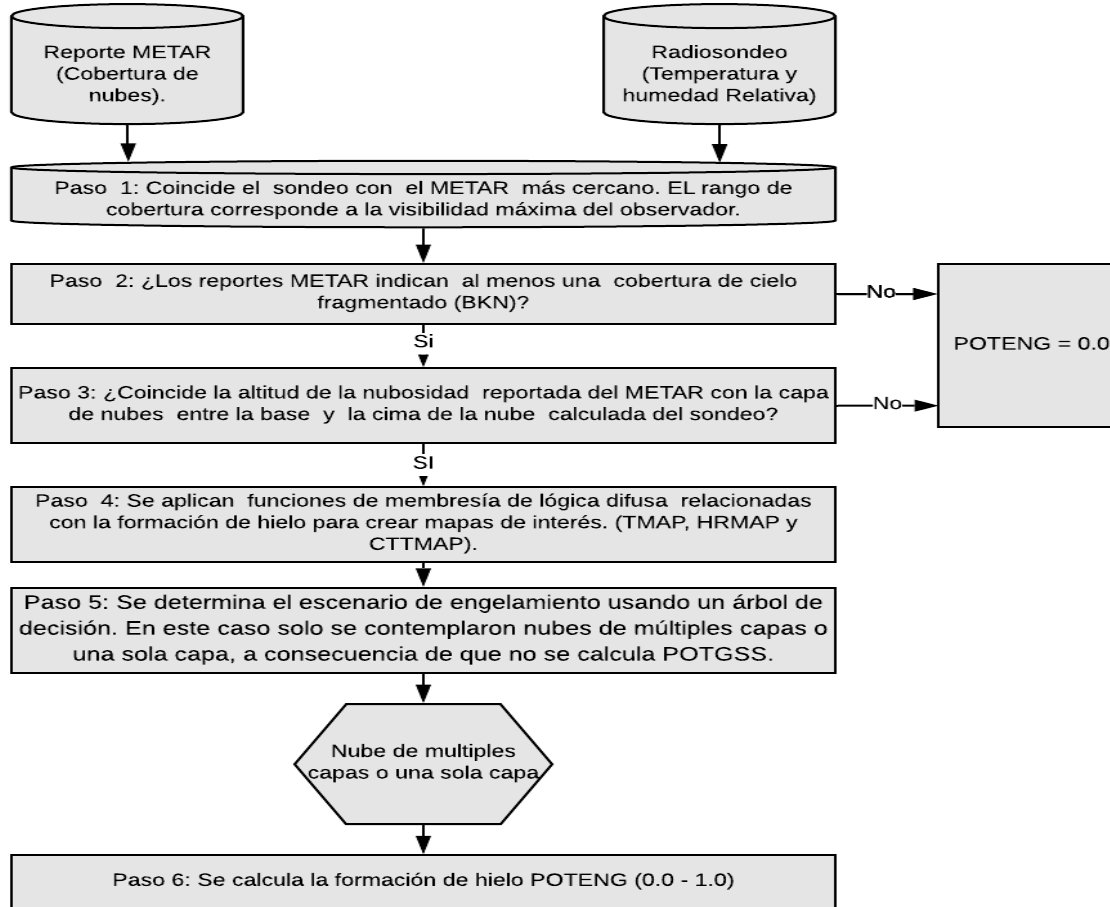


Figura 1.9: Diagrama de flujo del algoritmo CIP-sonde-A.

Para inferir las capas de nubes en la vertical, el algoritmo se basa en la metodología descrita por Bernstein *et al.* (2007) y Wang y Rossow (1995), en el cual se utiliza tanto el cálculo de la humedad relativa con respecto al hielo (HR_i) en cada nivel, como cambios de humedad en el perfil de los radiosondeos. HR_i se calcula mediante la Ecuación 1.1 (Dzambo y Turner, 2016), donde e_i es la presión de vapor con respecto al hielo y e_{si} es la presión de vapor de saturación con respecto al hielo, calculadas con base en la temperatura mediante aproximación de la ecuación de Clausius-Clapeyron (UA, 2018).

$$HR_i = 100 * \left(\frac{e_i}{e_{si}} \right) \quad (1.1)$$

El esquema de capa de nubes identifica al tope de la nube como el primer nivel en la dirección de arriba hacia abajo, siempre que HR_i o la humedad relativa con respecto al agua (HR_w) superan el 87 %; de lo contrario el tope de la nube se localiza en el primer nivel donde HR_i o HR_w excedan el 84 %, y el nivel superior tenga HR_i o HR_w un 3 % mínimo de diferencia; la capa húmeda continua hasta que la humedad relativa sea inferior a 84 %, infiriendo así la presencia de una posible capa nubosa.

Para los pasos 4 y 5 se debe tener en cuenta que CIP-sonde además de calcular POTENG, calcula POTGGS, definido como el potencial de ambientes favorables para la presencia de gotas grandes sobreenfriadas con un diámetro mayor a $50\mu\text{m}$. El cálculo de POTGGS no fue tenido en cuenta en este proyecto, debido a que la metodología para su cálculo tiene como fuente principal la observación de precipitación helada en superficie y en Colombia no se tiene registro de este tipo de precipitación. Por lo tanto, el algoritmo CIP-sonde-A solo fue implementado solo para hallar POTENG y no realiza discriminación por tipo de nubosidad.

Para el paso 4 después de estimar las capas de nubes, el algoritmo calcula en cada nivel tres índices de probabilidad de existencia de ALS mediante un proceso de lógica difusa, el primero en función del valor de la temperatura denominado Temperature Interest map (Tmap), otro en función de la humedad relativa denominado Relative Humidity Interest map (HRmap) y un último en función de la temperatura del tope de la nube denominado Cloud Top Temperature Interest map (CTTmap). Estas variables son utilizadas finalmente en el paso 6 para calcular POTENG en un rango de 0 a 1 en cada nivel y están basadas en observaciones de vuelo de investigación, conceptos básicos de física de nubes, pruebas y resultados estadísticos con PIREPS, que se pueden observar con mayor detalle en Bernstein *et al.* (2005).

Tmap tiene valores entre 0 y 1 dependiendo de la temperatura, siendo $Tmap = 1$ en el rango de -4°C a -8°C . Tmap disminuye a medida que se acerque a la máxima o mínima temperatura, en este caso 0°C y -25°C respectivamente, su comportamiento se puede observar en la Figura 1.10.

Entre más fría esté una nube líquida por debajo de 0°C mayor es el número núcleos de congelación y por lo tanto la probabilidad de existencia de ALS es menor. Los rangos de temperatura para esta variable se establecieron en Bernstein *et al.* (2005). Puesto que el ALS es más común cerca al punto de congelación, es menos frecuente al disminuir la temperatura y es relativamente rara en temperaturas inferiores a -25°C , excepto si está relacionada con sistemas de convección profunda. La formación de cristales de hielo a temperaturas muy cercanas a 0°C es muy improbable, sin embargo, aparecen con mayor frecuencia cuando la temperatura está por encima de -10°C (Korolev *et al.*, 2003).

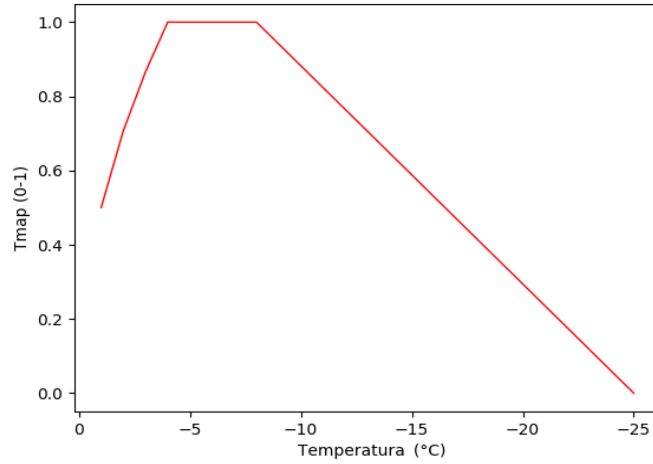


Figura 1.10: Comportamiento de Tmap en función de la Temperatura.

Las aeronaves tienden a evitar áreas de convección profunda debido a que implican gran cantidad de amenazas, por lo tanto, al igual que en Bernstein *et al.* (2007) no se tiene en cuenta estos sistemas para el presente proyecto. En la climatología, debido a que no se establecieron rangos de temperatura más bajas para las nubes de convección profunda, se ocasiona una disminución en las frecuencias en la altura del POTENG, debido a que los fuertes movimientos ascendentes asociados con la convección profunda permiten que exista ALS a temperaturas relativamente más frías.

HRmap proporciona un valor de 0 a 1 dependiendo del valor de la humedad relativa. Para valores mayores a 95 %, HRmap es igual a 1 y disminuye sucesivamente conforme la humedad relativa decrece, lo anterior debido a que hay una menor probabilidad de condensación. En Bernstein *et al.* (2005) se obtiene este rango de humedad relativa mediante pruebas con PIREPS, donde el 74.9 % de estos eventos ocurrieron con humedad relativa mayor al 70 %, manteniéndose este valor para CIP-SONDE en Bernstein *et al.* (2007) como se observa en la Figura 1.11. Cabe aclarar que para que exista POTENG, el nivel de altitud analizado debe ser parte de una capa húmeda detectada.

Por su parte, CTTmap presenta un valor de 0 a 1 dependiendo del valor de la temperatura del tope de la nube; si esta se encuentra entre 20°C y -12°C CTTmap equivale a 1, como se puede observar en la Figura 1.12. Esta variable disminuye a medida que la temperatura del tope de la nube es menor, pues existe mayor probabilidad de que esta la nube contenga en la parte superior partículas de hielo; por lo tanto, los topes de nube más cálidos tienden a relacionarse con nubes de mayor composición líquida (Rauber *et al.*, 2000). Los valores de CTTmap nunca llegan a 0; pues si bien, las nubes frías contienen mayor cantidad de cristales

de hielo, aún pueden contener ALS (Bernstein *et al.*, 2005).

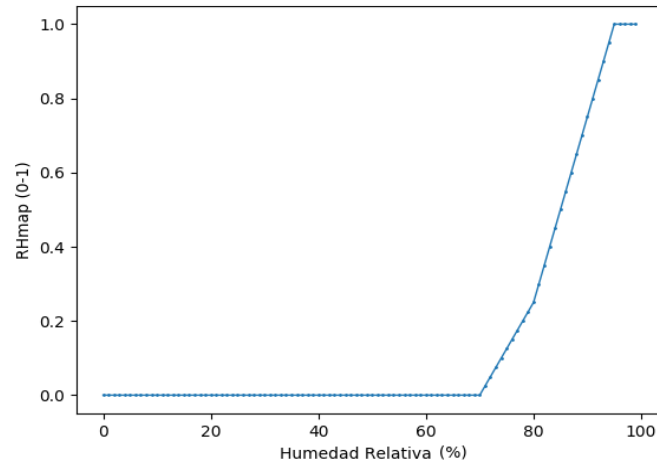


Figura 1.11: Comportamiento de HRmap en función de la humedad relativa, de acuerdo a (Bernstein *et al.*, 2007).

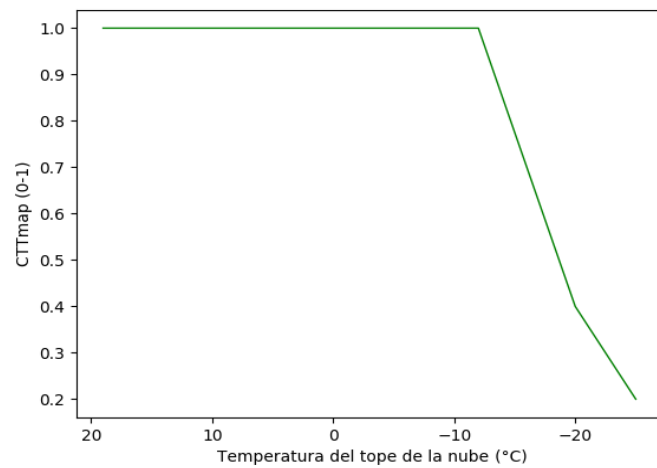


Figura 1.12: Comportamiento de CTTmap en función de la Temperatura de tope de la nube

Finalmente, en el paso 6 se calcula el valor de POTENG de acuerdo con la Ecuación 1.2 para cada nivel.

$$POTENG = CTTmap * Tmap * HRmap \quad (1.2)$$

1.3.5. Algoritmo SLWS

El Supercooled Liquid Water Simulation (SLWS) es un algoritmo elaborado por el Dr. Jhon Mejía investigador del Desert Research Institute (DRI). Este algoritmo define un enfoque simple para examinar la probabilidad de encontrar gotas de ALS en la atmósfera de acuerdo a simulaciones hechas con modelos físicos globales o regionales tales como los modelos ECMWF, GFS y WRF; de estas simulaciones de las cuales se extraen las variables temperatura del aire y CAL. Para el cálculo de CAL, en el caso del modelo WRF se utiliza la suma de la relación de mezcla de agua de nube (Q_{cloud}) con la relación de mezcla de agua de lluvia (Q_{rain}).

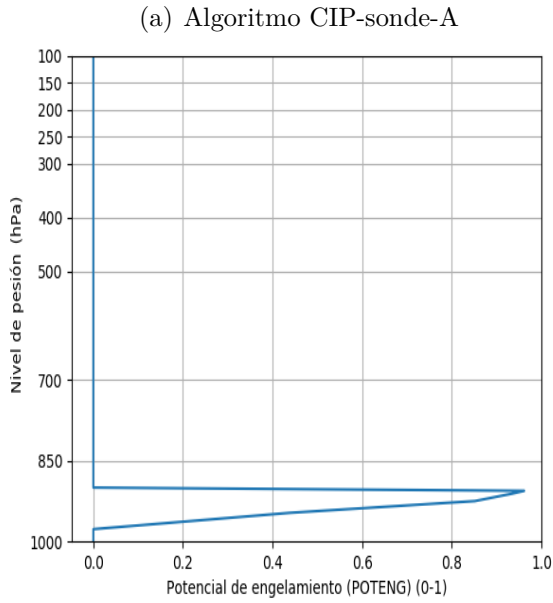
Para SLWS, si $-2^{\circ}\text{C} < T(t,x,y,p) < -25^{\circ}\text{C}$ y $CAL \geq 0.001 \text{ g/kg}$ entonces el potencial de agua líquida sobreenfriada o $POTENG = 1$, si no $POTENG=0$.

Este algoritmo es usado para encontrar condiciones eficientes para el sembrado de nubes. El rango de temperatura del aire puede cambiar dependiendo de la necesidad.

1.3.6. Comparación de resultados entre algoritmos

Con el fin de comprobar la calidad de la implementación del algoritmo CIP-sonde-A, se compararon los resultados de POTENG en aeródromos de Estados Unidos contra la versión de CIP-Sonde original utilizada en Bernstein *et al.* (2007). Estas comparaciones se pueden observar en las Figuras 1.13 a 1.16.

Al comparar el cálculo de POTENG se observó una buena adaptación del algoritmo, obteniendo resultados muy similares a los de Bernstein *et al.* (2007); la única excepción fue la comparación con los resultados del aeródromo con código OACI KTOP de la Figura 1.15, debido a que CIP-sonde original calcula POTGGS, graficado como líneas negras punteadas en la Figura 1.15 (b) y POTENG toma el valor de POTGGS si este último es mayor.



(b) CIP-sonde (Bernstein *et al.*, 2007) aeródromo KINL

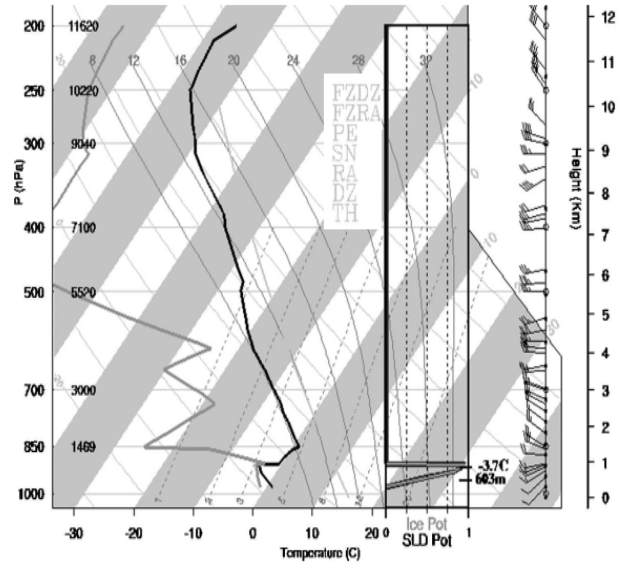
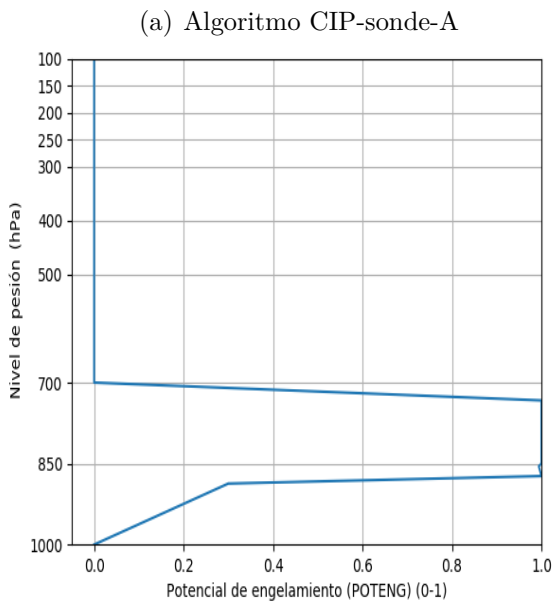


Figura 1.13: Comparación del potencial de engelamiento en el aeródromo KINL 2005-02-02 estimado con: a) CIP-sonde-A y b) CIP-sonde (Bernstein *et al.*, 2007)



(b) CIP-sonde (Bernstein *et al.*, 2007) aeródromo KAMA

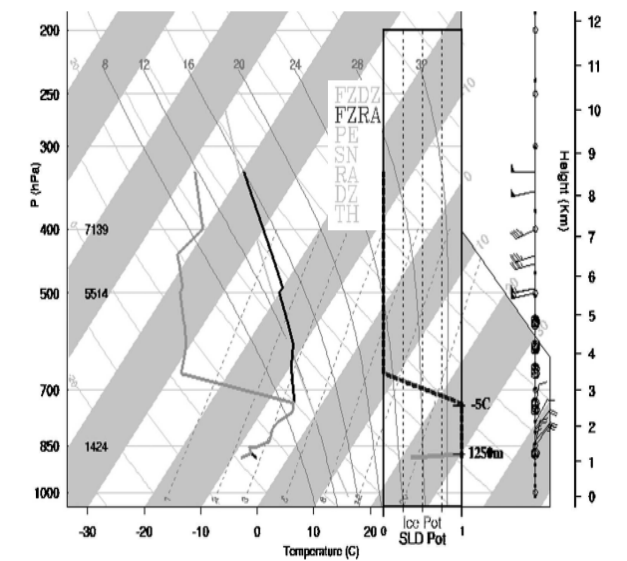
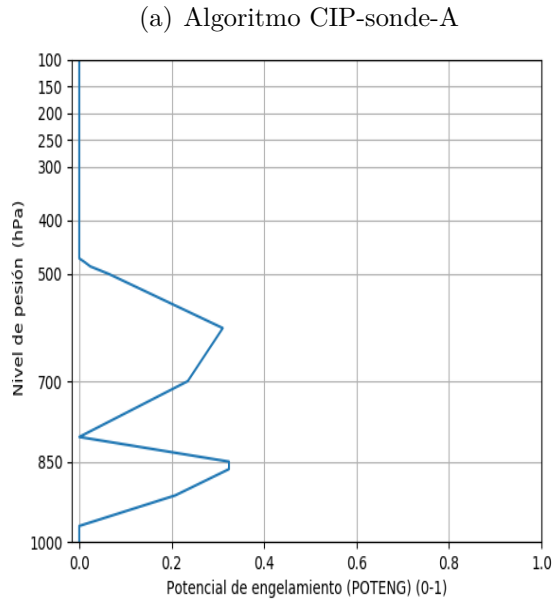


Figura 1.14: Comparación del potencial de engelamiento en el aeródromo KAMA 1980-01-26 estimado con: a) CIP-sonde-A y b) CIP-sonde (Bernstein *et al.*, 2007)



(b) CIP-sonde (Bernstein *et al.*, 2007) aeródromo KTOP

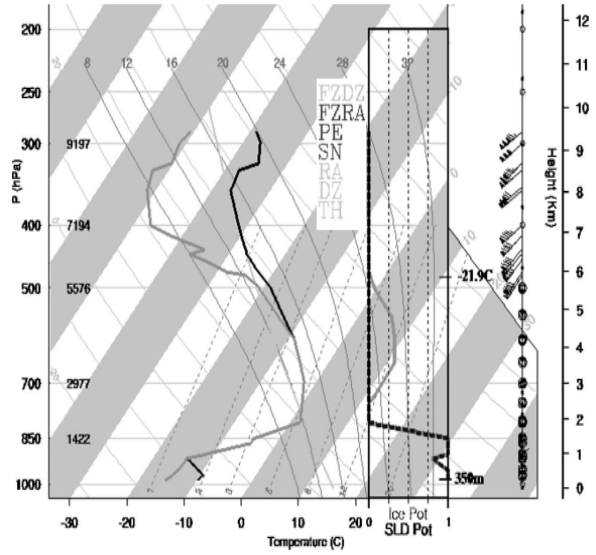
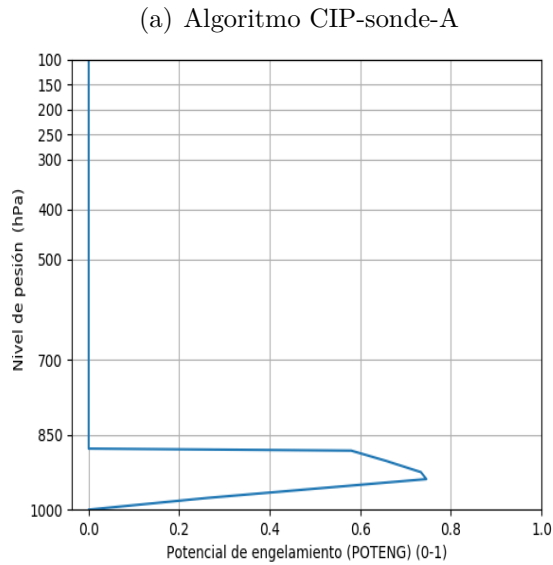


Figura 1.15: Comparación del potencial de engelamiento en el aeródromo KTOP 1978-12-07 estimado con: a) CIP-sonde-A y b) CIP-sonde (Bernstein *et al.*, 2007)



(b) CIP-sonde (Bernstein *et al.*, 2007) aeródromo PACD

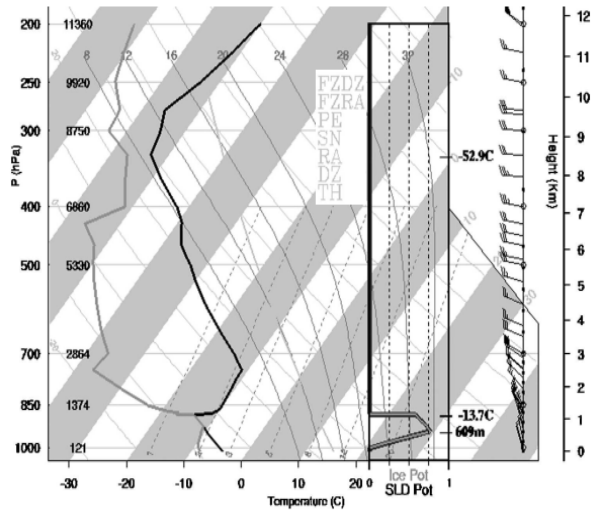


Figura 1.16: Comparación del potencial de engelamiento en el aeródromo PACD 2005-02-02 estimado con: a) CIP-sonde-A y b) CIP-sonde (Bernstein *et al.*, 2007)

Después de calcular el potencial de engelamiento con CIP-sonde-A y los 3 algoritmos de RAOB (Smith-feedes, USAF 84 % y AFGWC), se realizaron comparaciones en días al azar, que se pueden observar en las Figuras 1.17, 1.18 y 1.19.

Cuando los algoritmos de RAOB dieron como resultado un potencial de engelamiento de 0, el algoritmo CIP-sonde-A también mostró el mismo resultado como se detalla en la Figura 1.19. Así mismo, se evidencia consistencia en la indicación de POTENG en los diferentes niveles de presión. Por ejemplo, en la Figura 1.17 se observa potencial de engelamiento en los niveles de 600, 500, 520 y 400 hPa, coincidiendo con los algoritmos Smith feedes y AFGWC. En el algoritmo USAF se observa POTENG también a 250 hPa aunque no se observa a los 520 hPa.

Aunque existen pequeñas diferencias entre los algoritmos, en la mayoría de los días se evidencia buena correspondencia en cuanto a niveles de presión. Sin embargo, en la intensidad se observan variaciones importantes debido a los diferentes criterios que cada algoritmo usa para inferir el POTENG, como se describió en la sección 1.3.

Este análisis fue de utilidad para tener una comparación con otras metodologías y así dar más confiabilidad al algoritmo CIP-sonde-A. Para más comparaciones de los resultados con CIP-sonde-A y con los algoritmos RAOB, se pueden observar las figuras en los Anexos A.1 a A.13.

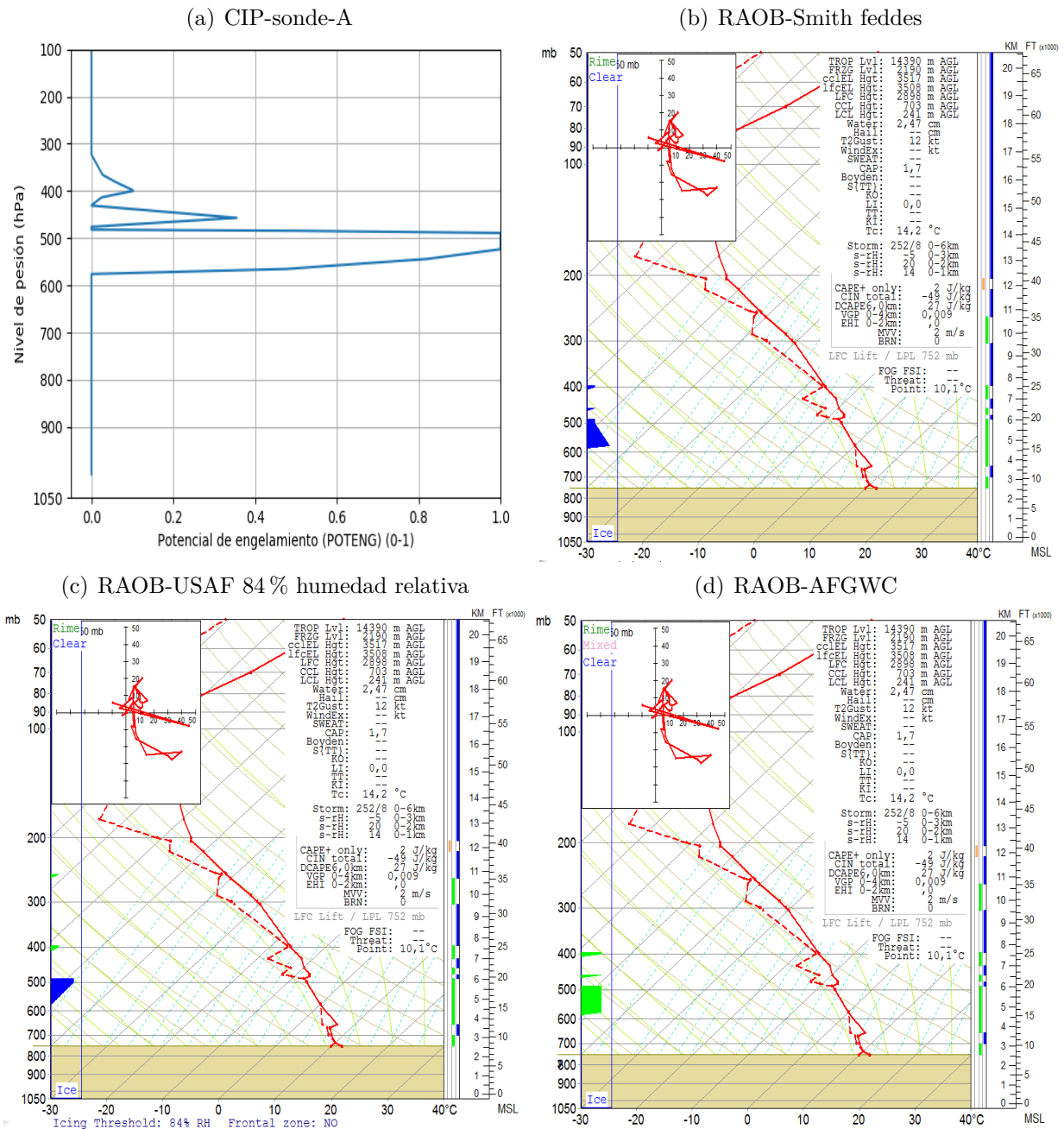


Figura 1.17: Comparación potencial de engelamiento estimado por: Algoritmo CIP-sonde-A y resultados de RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84%HR y AFGWC estación de Bogotá 01-04-2018.

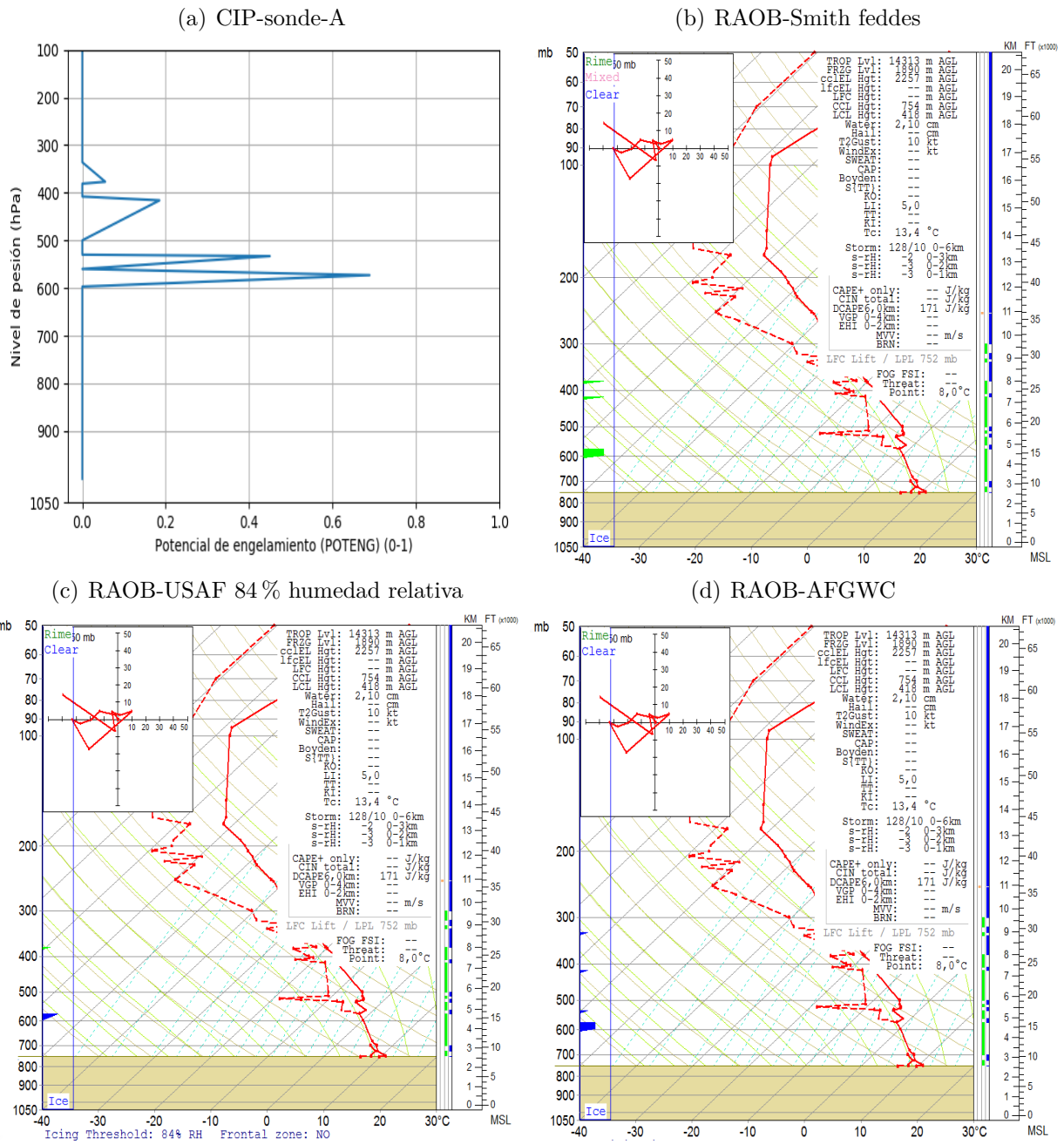


Figura 1.18: Comparación potencial de engelamiento estimado por: Algoritmo CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84%HR y AFGWC estación de Bogotá 01-07-2018.

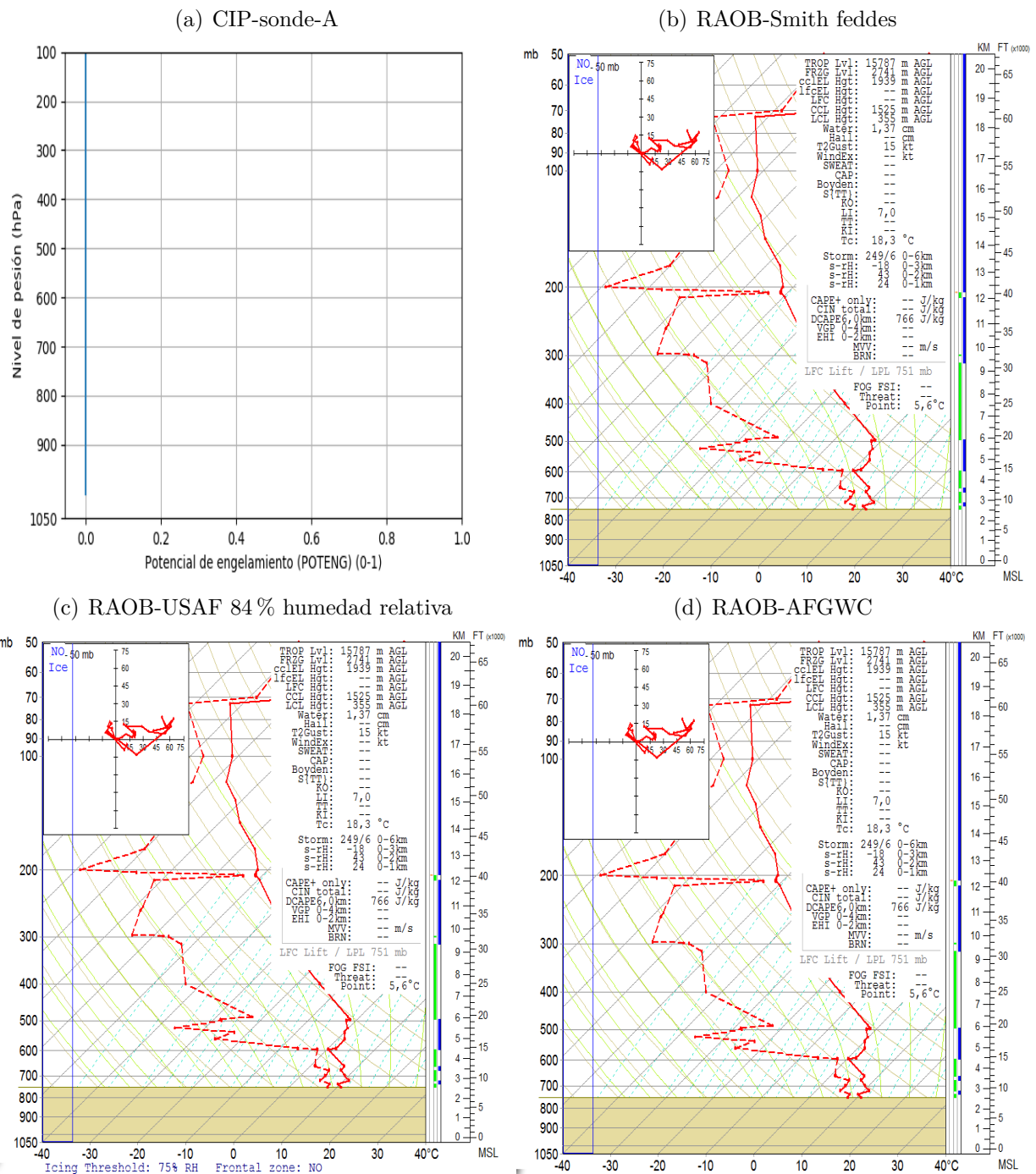


Figura 1.19: Comparación potencial de engelamiento estimado por: Algoritmo basado en CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes USAF84 %HR y AFGWC, estación de Bogotá 01-02-2018

1.3.7. Metodología para elaboración de la climatología

Se desarrolla la climatología con base en la metodología utilizada en Bernstein *et al.* (2007) y Bernstein y Le Bot (2009).

En Bernstein *et al.* (2007) mediante pruebas con reportes PIREP, CIP-sonde identificó correctamente la presencia de formación de hielo en el 87.3 % de 5619 PIREP de engelamiento positivo y la ausencia de engelamiento en el 75 % de 2802 PIREP de engelamiento negativo utilizando un umbral de POTENG mayor a 0.01. Sin embargo, con un POTENG mayor a 0.15 se obtuvo mayor eficiencia entre eventos de engelamiento y de no engelamiento. Independientemente de la elección del umbral; los patrones geográficos, las distribuciones de POTENG y de POTGGS fueron similares (Bernstein y Le Bot, 2009). Entre mayores son los valores a partir de los cuales se definen los rangos de POTENG más específicos son los resultados para una probabilidad de engelamiento más exacta.

Para el desarrollo de la climatología se aplicó el algoritmo CIP-sonde-A a las observaciones conjuntas de radiosondeo y reportes METAR, además se generaron análisis de frecuencia mensual y por niveles de presión de eventos con POTENG mayor 0.01 y a 0.15 en los periodos descritos anteriormente para cada estación en la Tabla 1.4 de la sección 1.3.

Así mismo se aplicó el algoritmo CIP-sonde-A a los datos de reanálisis ERA-5 y se generaron mapas a nivel nacional con el fin de estimar áreas, niveles y tiempos más frecuentes con POTENG. Estos mapas se generaron en base a la frecuencia de ocurrencia de POTENG en la totalidad de los eventos registrados.

Como en los datos de reanálisis no se cuenta con suficiente cobertura de observaciones METAR para todo el país, se utilizó la variable CC, la cual indica la proporción de cielo cubierto por nubes, con valores entre cero y uno.

Así mismo se aplicó el algoritmo SLWS a los datos de ERA-5 usando la variable CLWC, que se refiere a la masa de gotas de agua líquida en la nube por kilogramo de masa total de aire húmedo; siendo este último en los datos de ERA-5 la suma del aire seco, el vapor de agua, el líquido de la nube, el hielo de la nube, la lluvia y la nieve que cae. Los resultados de los algoritmos CIP-sonde-A y SLWS fueron comparados y se evaluó cuál de los dos se aproxima más a las observaciones.

1.4. Discusión y Resultados

1.4.1. Distribuciones tiempo-altitud de potencial de englamiento

1.4.1.1. Observaciones

Con el fin de tener una visión del comportamiento del POTENG, se realizó un análisis para observar los cambios estacionarios que puede presentar en las observaciones según la altitud, el mes y el año, en las estaciones de radiosondeo y periodos mencionadas en la Tabla 1.4. Las gráficas de frecuencia por altitud y tiempo muestran cambios estacionales. Estas frecuencias representan el porcentaje relativo de eventos con respecto al total de eventos disponibles en un rango de altitud dado variando cada 1000 m y posteriormente en niveles de presión cada 50 hPa durante cada mes o año.

Los resultados por altitud y mes del año para las observaciones se pueden observar de la Figura 1.20 a la 1.24 para las estaciones de Bogotá, Leticia, Tres Esquinas, Cali y Riohacha, siendo estas las que cuentan con mayor cantidad de datos. Las figuras para las demás estaciones se encuentran en el Anexo C.

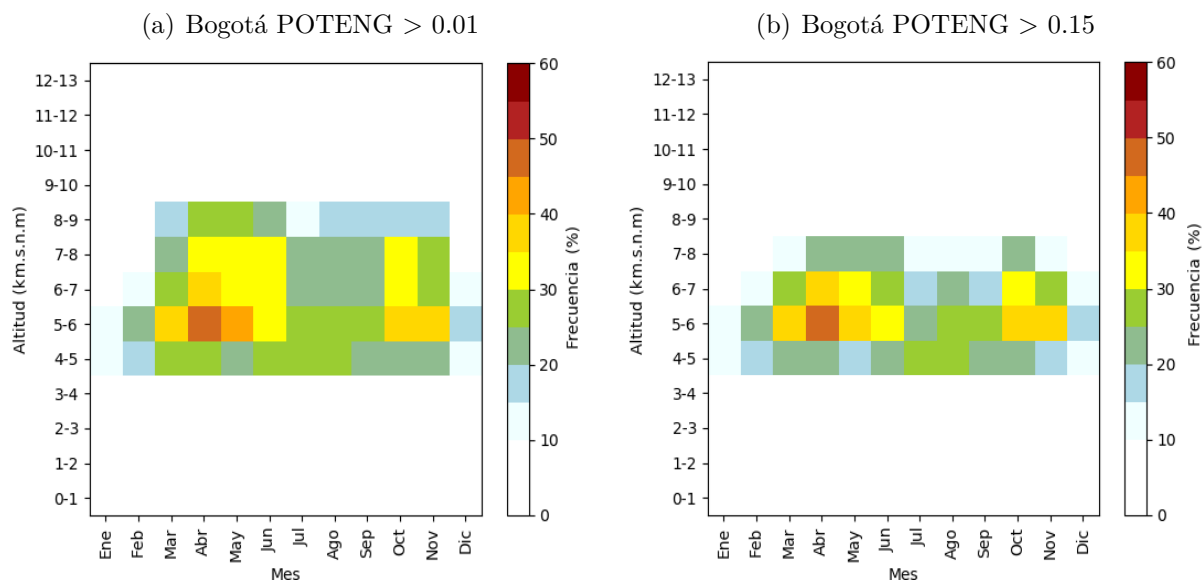


Figura 1.20: Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y la altitud en Bogotá de 2007 a 2018 a las 12:00 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de a) 0.01 y b) 0.15 y de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a observaciones de radiosondeos y reportes METAR.

Para Bogotá se cuenta con la mayor cantidad de datos de radiosondeo, observándose una relación entre las épocas con mayor frecuencia de POTENG y las épocas climatológicas de mayor precipitación, como se puede observar en las Figura 1.20.

De acuerdo a los resultados de marzo, abril y mayo, correspondiente a la primera temporada de lluvias de Bogotá, suele ser más favorable para las condiciones de engelamiento, siendo más extensa tanto temporalmente como en altura. No obstante, este resultado puede estar influenciado por el número de datos faltantes para los meses de agosto, septiembre y octubre, mayor en aproximadamente un 10 % con respecto a los demás meses. Esta primera temporada también cuenta con los niveles de mayor frecuencia de POTENG, pues en el mes de abril para el nivel de 5 a 6 km se presenta frecuencias de hasta un 50 % y se extienden hasta los 8 km con valores entre el 30 % y 40 %. En octubre y noviembre entre 5 y 6 km, se observan frecuencias altas entre 35 y 40 % extendiéndose hasta los 8 km con valores entre 25 % y 40 %. Los meses de enero y febrero son los de menor frecuencia de POTENG con valores que varían entre 5 % y 20 %, siendo estos los meses más secos en Bogotá.

Se observa tanto en Bogotá como en las demás estaciones, que el cambio de rango de POTENG de 0.01 a 0.15 no genera cambios significativos en los patrones estacionales (Figuras 1.20 a 1.24). Como se esperaba a mayor valor inicial en el rango de POTENG, las frecuencias disminuyen. También, en los niveles más altos, aquellos con menor probabilidad de engelamiento, como en Bogotá entre 8 y 9 km, las frecuencias tienden a disminuir hasta 0 %.

Se debe considerar que al no tener en cuenta la convección profunda, las frecuencias en altura tienden a subestimar POTENG. Sin embargo, de acuerdo a los registros METAR para Bogotá a las 12:00 UTC solo registran tres eventos convectivos con presencia de tormentas, cumulonimbus y torrecumulos en el periodo para el presente estudio.

De acuerdo a la Figura 1.21, en Leticia se observa un patrón monomodal y que las frecuencias de POTENG son más altas que en Bogotá. En los meses entre enero a mayo se evidencian frecuencias entre 45 % y 60 % entre 5 y 6 km de altitud, también frecuencias mayores al 30 % arriba de los 6 km y en el mes de abril se observa una extensión vertical fuerte hasta los 8 km. De octubre a diciembre se observan frecuencias intermedias que van desde 30 % a 40 %, mientras que, de junio a septiembre se observan los valores más bajos siendo este último el mes con menor frecuencia de POTENG.

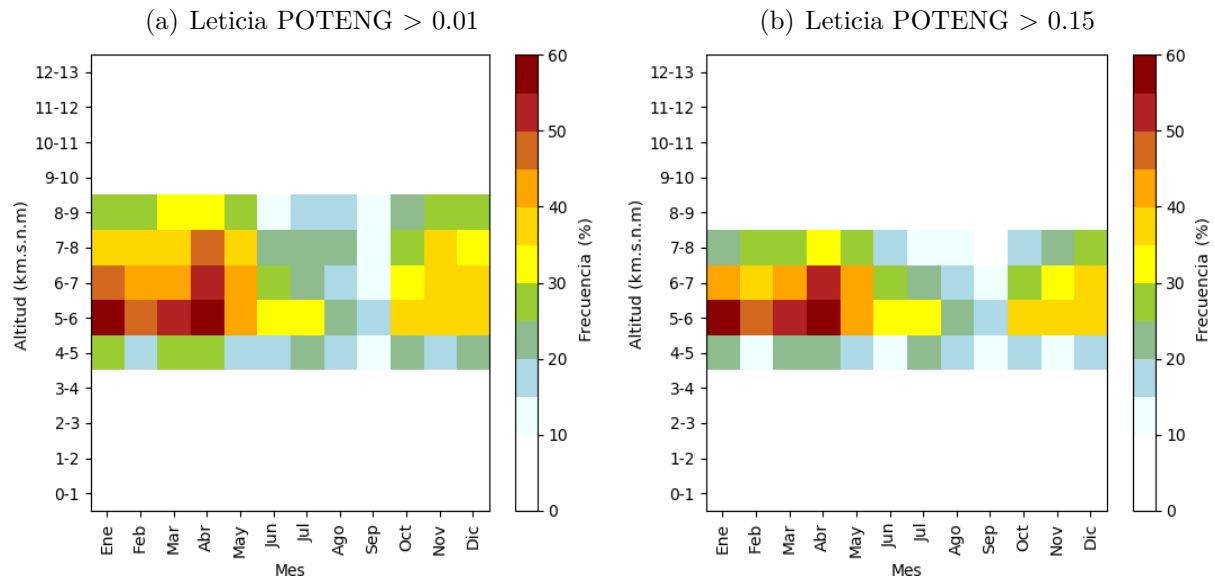


Figura 1.21: Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y la altitud en Leticia de 2009 a 2018 a las 12:00 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de a) 0.01 y b) 0.15 y de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a observaciones de radiosondeos y reportes METAR.

Como se observa en la Figura 1.22 Tres Esquinas presenta una tendencia monomodal. Entre 5 y 6 km, las frecuencias aumentan progresivamente desde febrero hasta junio y alcanzan valores máximos entre el 45 % y 60 % en los meses de abril, mayo, junio y julio, disminuyendo significativamente en agosto y septiembre. Los meses con mayor frecuencia de POTENG en altitudes mayores a 6 km son marzo, abril y mayo con valores entre el 30 % y el 45 %. Las frecuencias más bajas se observan entre septiembre y enero con un leve aumento en los meses de noviembre y diciembre.

Acorde a la Figura 1.23 en Cali se observa una tendencia bimodal similar a la estación de Bogotá, donde las frecuencias más altas se observan en las dos temporadas de lluvias. En la primera temporada de marzo a mayo, la frecuencia más alta con 60 %, se observa en mayo desde los 5 a 8 km en los niveles de 500 a 350 hPa. En la segunda época de lluvias, se observa un aumento de frecuencias en septiembre, con un aumento significativo en octubre y noviembre entre los 5 y 9 km. Las frecuencias más bajas se observan de junio a agosto.

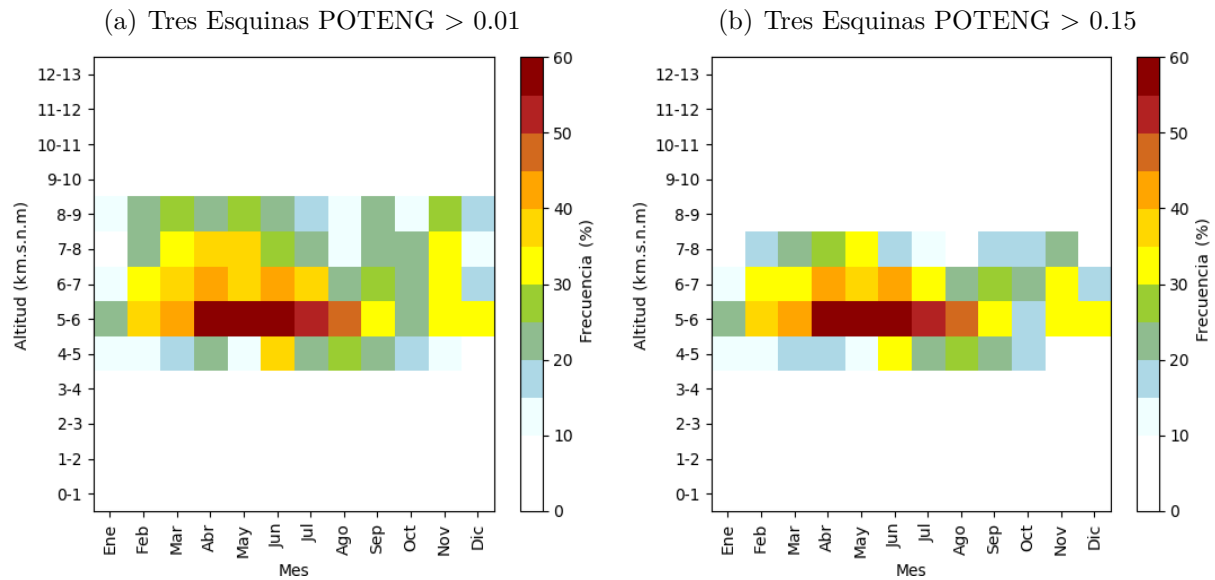


Figura 1.22: Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y la altitud en Tres Esquinas de 2010 a 2018 a las 12:00 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de a) 0.01 y b) 0.15 y de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a observaciones de radiosondeos y reportes METAR.

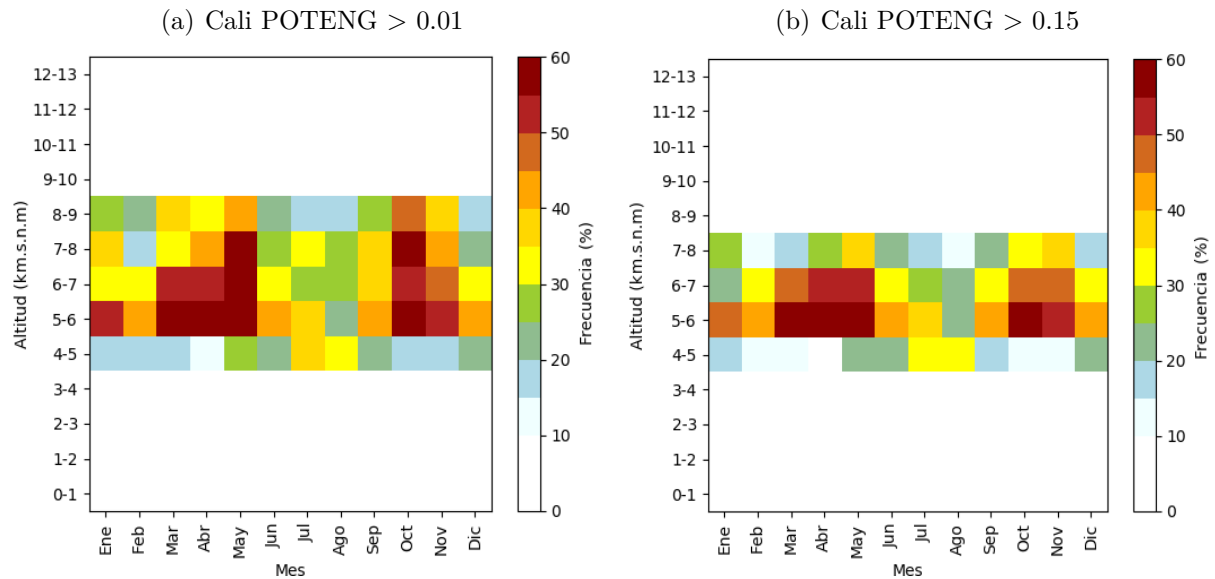


Figura 1.23: Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y la altitud en Cali de 2016 a 2018 a las 12:00 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de a) 0.01 y b) 0.15 y de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a observaciones de radiosondeos y reportes METAR.

En la Figura 1.24 para Riohacha se observa un patrón bimodal coincidente con las tendencias de precipitación en ese sector y que las frecuencias no sobrepasan el 30 %, lo que significa que es un área de poca ocurrencia de engelamiento. Los meses de diciembre a abril son los meses de menor frecuencia con valores entre 0 a 10 %; mayo presenta valores de hasta 20 % entre 5 y 6 km, en junio y julio disminuye la ocurrencia hasta que en agosto se presentan las frecuencias más bajas de la temporada, con valores no mayores a 13 %. El registro más alto se observa de septiembre a noviembre con frecuencias dominantes entre 20 y 30 % hasta los 9 km aproximadamente.

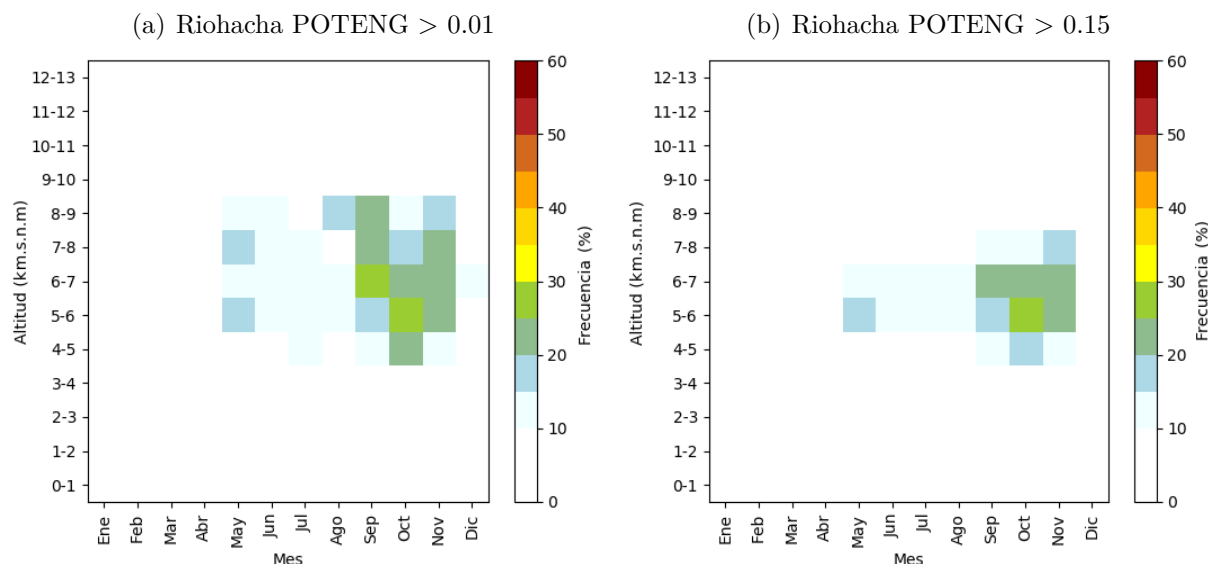


Figura 1.24: Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y la altitud en Riohacha de 2009 a 2016 a las 12:00 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de a) 0.01 y b) 0.15 y de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a observaciones de radiosondeos y reportes METAR.

En la Figura 1.25 se observan los mismos resultados descritos previamente para todas las estaciones con POTENG mayor a 0.01, discriminado por niveles de presión, ya que en las siguientes secciones se trabajará solo con estos niveles de referencia estableciéndose como referente para la comparación.

Los resultados de frecuencias de POTENG anuales y por niveles de presión se observan en la Figura 1.26 para cada periodo de tiempo por estación. Para Bogotá de acuerdo con la Figura 1.26 (a) las mayores frecuencias se encuentran incrementando progresivamente de 2007 al 2009 con valores no mayores al 45 %, siendo 2009 el más alto y más profundo entre 600 a 400 hPa, también se puede apreciar otro leve incremento en 2018 con frecuencias que llegan hasta un 35 %. El rango menos frecuente se observa en el rango de 2011 a 2016.

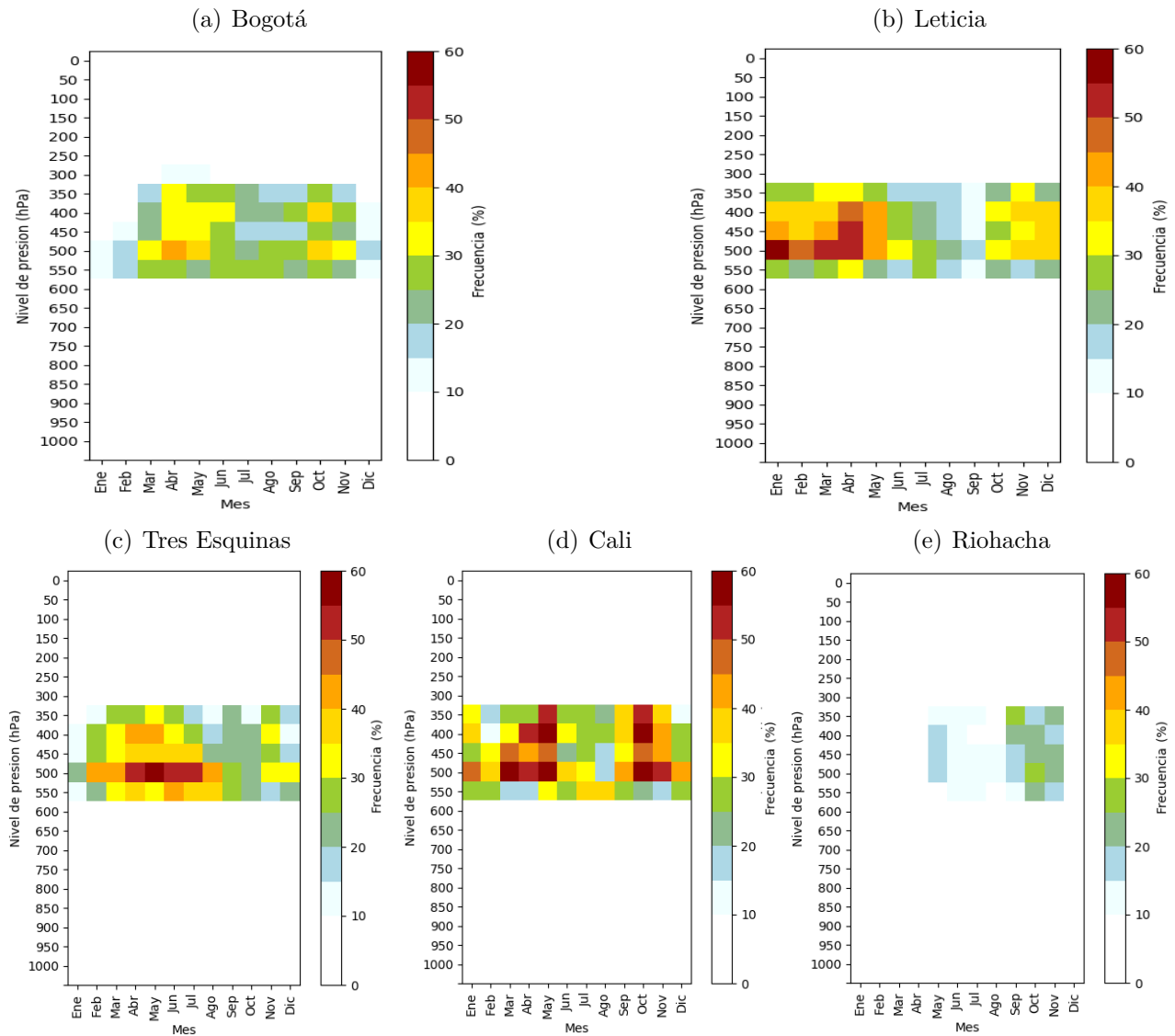


Figura 1.25: Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y nivel de presión en Bogotá, Leticia, Tres Esquinas, Cali y Riohacha a las 12 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de 0.01 de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a observaciones de radiosondeos y reportes METAR y para periodos de tiempos iguales a los tiempos de observación en cada estación señalados en la Tabla 1.4.

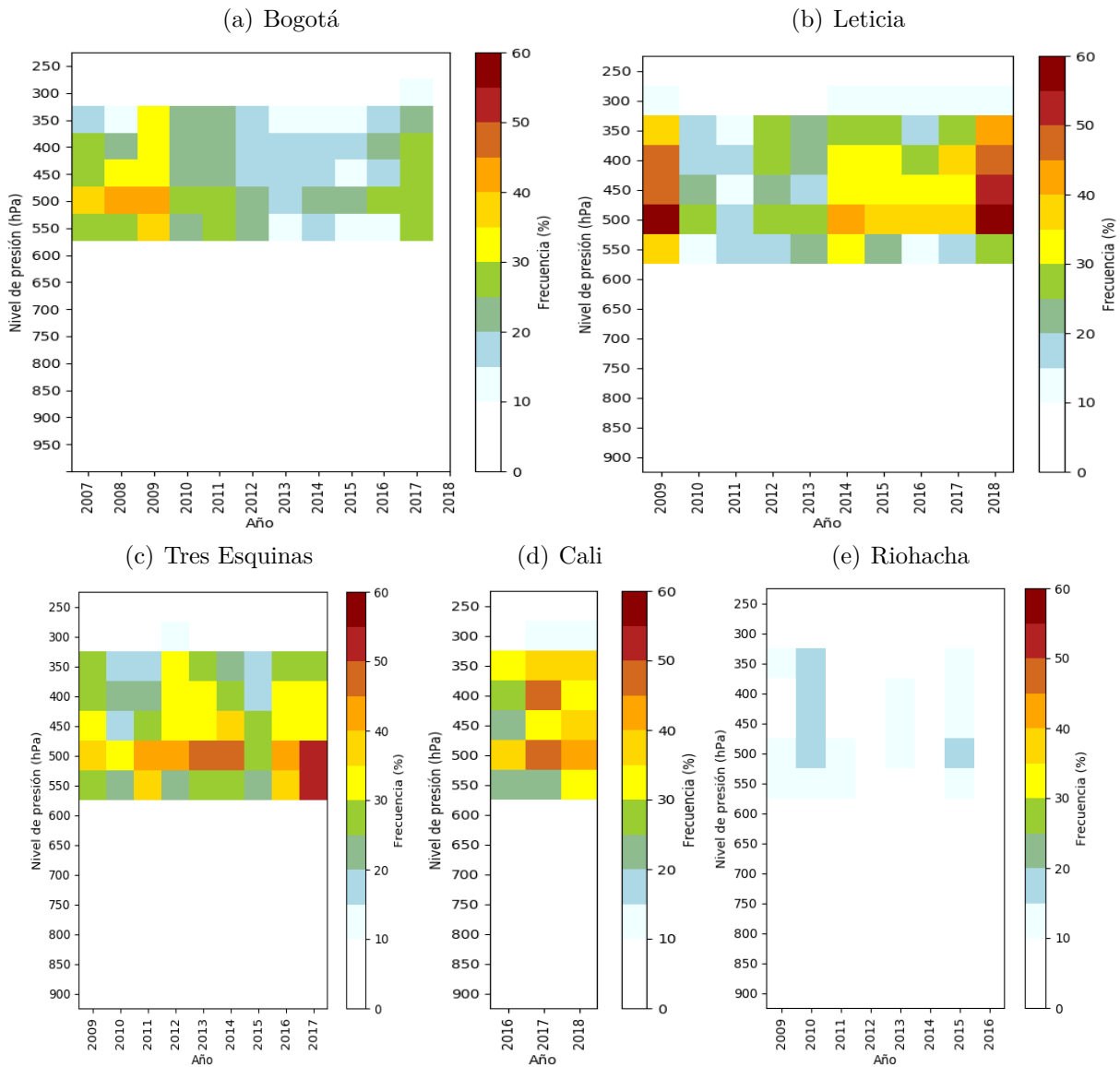


Figura 1.26: Frecuencia promedio (%) de POTENG según el año y nivel de presión en Bogotá, Leticia, Tres Esquinas, Cali y Riohacha a las 12 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de 0.01 de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a observaciones de radiosondeos y reportes METAR y para periodos de tiempos iguales a los tiempos de observación en cada estación señalados en la Tabla 1.4.

En Leticia de acuerdo con la Figura 1.26 (b) también se evidencian frecuencias altas en 2009 que oscilan entre 35 y 60 %, mientras que, de 2010 a 2013 disminuyen a un rango entre 15 y 30 %. Durante 2014 a 2018 las frecuencias aumentan considerablemente siendo 2018 el

año de mayor ocurrencia observada.

Como se observa en la Figura 1.26 (c) en Tres Esquinas las frecuencias de POTENG más altas se presentan de 2013 a 2015 y de 2017 a 2018. Estas varían entre 30 y 55 % en 2018, año con los valores más altos entre los niveles 600 y 550 hPa. Por su parte, Cali tiene solo 3 años de estudio por lo cual resulta difícil encontrar patrones especiales; sin embargo, en 2017 y 2018 encuentran las frecuencias más altas con valores entre 30 % y 50 %. Por último, de acuerdo a la Figura 1.26 (e) Riohacha muestra frecuencias muy bajas de POTENG, con valores que no sobrepasan el 20 %, donde las frecuencias más altas se presentan en 2008, 2010 y 2015.

Cabe aclarar que estos resultados solo muestran las condiciones presentes a las 12:00 UTC y están sujetos a cambios en el transcurrir del día. Sin embargo, otorgan una base para analizar el comportamiento a escalas mayores a un año.

Para entender mejor los resultados anteriormente descritos, se realiza un análisis de factores influyentes, uno de ellos es la posición de las isotermas en altitud. En la Figura 1.27 se observa la serie de tiempo de las isotermas 0°C, 25°C y -40°C a las 12:00 UTC en Bogotá desde el año 2000 a 2018 según los radiosondeos; encontrándose que no existe gran variación en los niveles de las isotermas en altura, como si sucede en latitudes medias y altas. Por ejemplo, la isoterma 0°C tiende a mantenerse en un rango aproximado de 4200 a 5500 m, a excepción de pocos casos aislados donde pueden llegar a tener un rango de 4000 a 6000 m como se observa en la Figura 1.28.

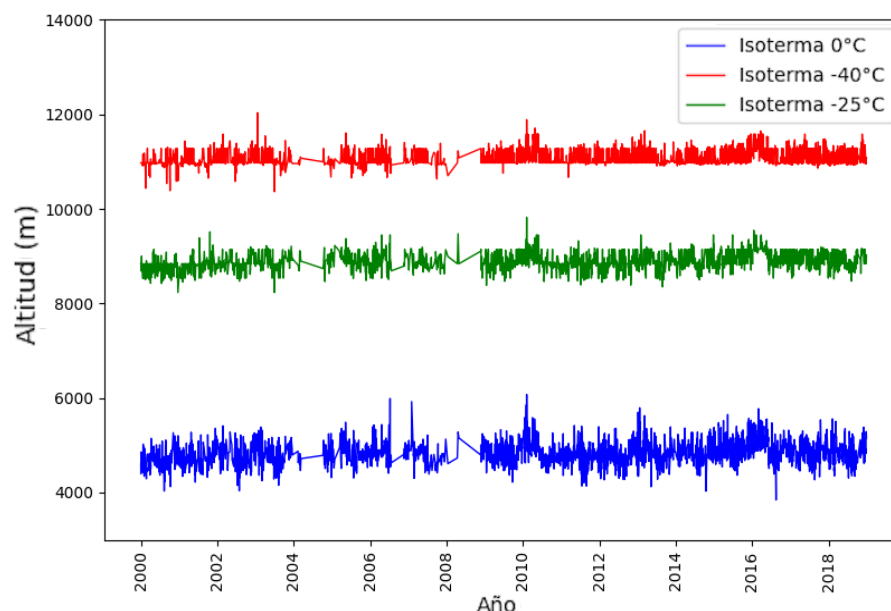


Figura 1.27: Serie de tiempo Isotermas 0°C, -25°C y -40°C Bogotá 12:00 UTC de 2000 a 2018

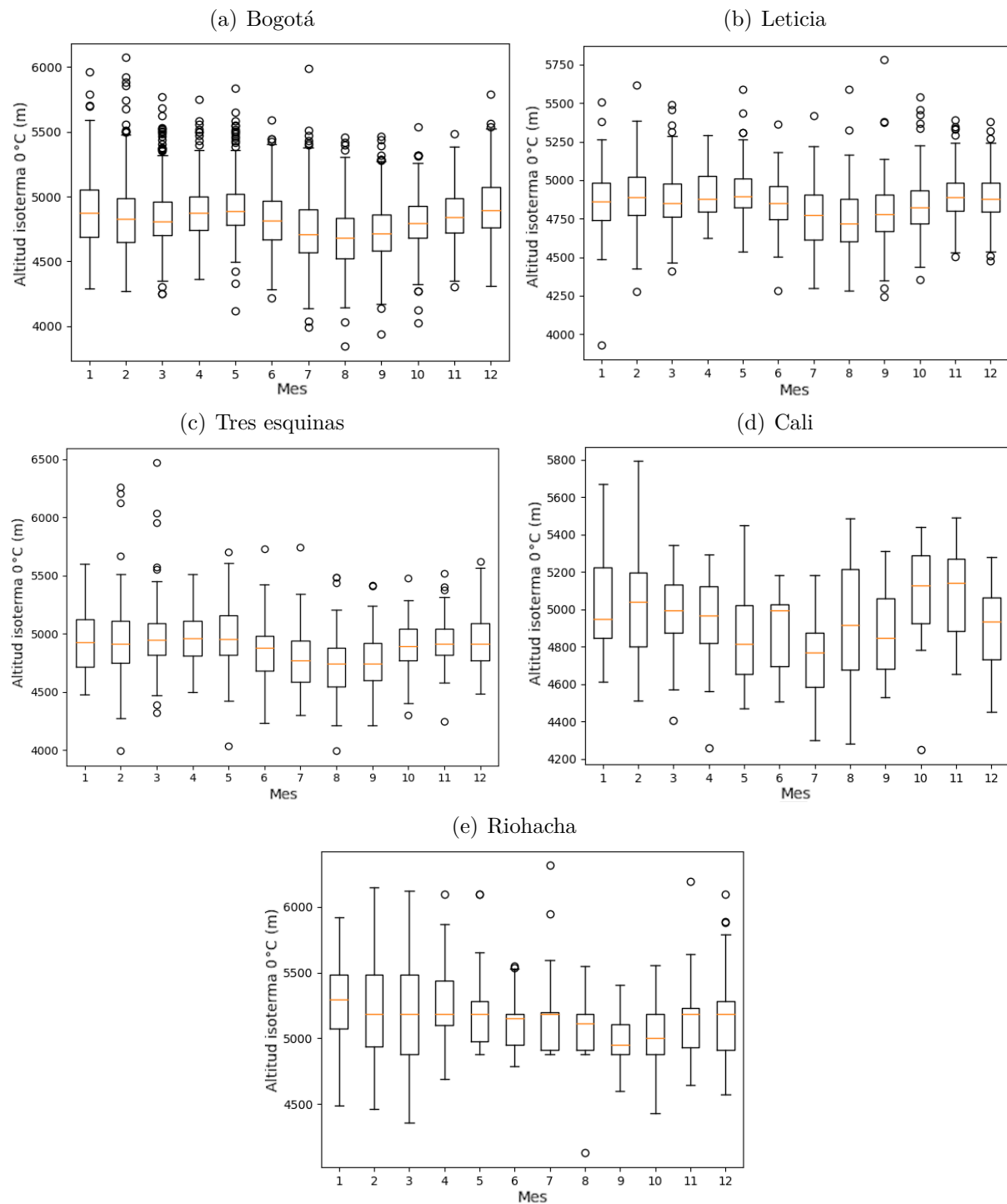


Figura 1.28: Diagramas de caja por mes del año para la altura de la isoterma 0°C a las 12 :00 UTC, para a) Bogotá de 2007 a 2018, b) Leticia de 2009 a 2018, c) Tres Esquinas de 2010 a 2018, d) Cali de 2016 a 2018 y e) Riohacha de 2009 a 2016.

CIP-sonde-A registra potencial de englamiento para temperaturas en el rango de -25 a 0°C, por esta razón valores de frecuencia de POTENG se encuentran en un rango de altura de 4 a 9 km en todo el país. Por otra parte, en las figuras de frecuencias promedio de POTENG en Bernstein *et al.* (2007), se observa este puede llegar a la superficie en las épocas de invierno en los Estados Unidos, asociado a los fuertes cambios estacionales que se presentan en latitudes medias y altas, donde la isoterma de 0°C alcanza la superficie.

Otro factor importante para este análisis es la humedad relativa en altura. En Colombia varía estacionalmente de acuerdo a las temporadas de lluvia y temporadas secas. En la Figura 1.29 se observa la distribución de humedad relativa durante el año. Si se analiza detalladamente cada una de las gráficas, se pueden hallar patrones directamente relacionados con los resultados de POTENG para cada una de las estaciones analizadas, encontrándose que en los meses con rangos más altos de humedad relativa muestran un mayor POTENG. Por ejemplo, para Bogotá en marzo, abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre se observan las concentraciones de valores de humedad relativa más altos; mientras que los meses con humedad relativa más variable son los meses más secos y con menor POTENG.

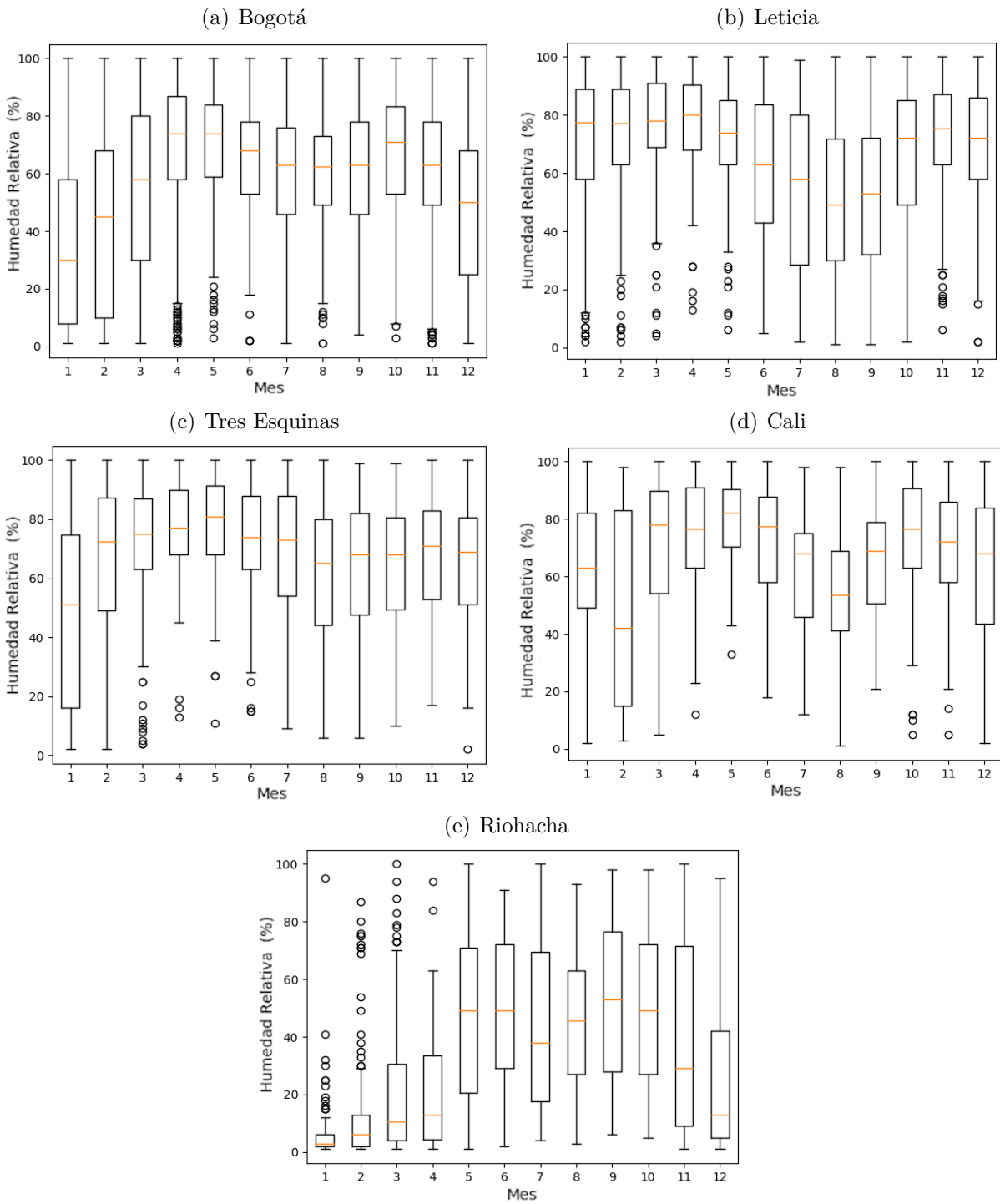


Figura 1.29: Diagramas de caja por mes del año para valores de humedad relativa en altura a las 12 :00 UTC a 500 hPa, a) Bogotá de 2007 a 2018, b) Leticia de 2009 a 2018, c) Tres esquinas de 2010 a 2018, d) Cali de 2016 a 2018 y e) Riohacha de 2009 a 2016.

1.4.1.2. Algoritmo CIP-sonde-A mediante datos de ERA-5

Posterior al análisis de los datos observados, se realiza el mismo procedimiento con datos de reanálisis ERA-5 utilizando el algoritmo CIP-sonde-A. Como fue mencionado anteriormente, se utilizó la variable CC para determinar presencia de nubosidad, a razón de la poca cobertura espacial de los reportes METAR. Adicionalmente, se realizaron las respectivas pruebas, obteniendo resultados similares a las observaciones, como se muestra en la Figura 1.30.

En la Figura 1.30, se observan los resultados de CIP-sonde-A con datos de reanálisis ERA-5 en los periodos correspondientes a cada estación de acuerdo con las observaciones METAR y radiosondeo disponibles, que al ser comparados con los datos mostrados en la Figura 1.25, permiten determinar que existe una buena relación respecto a la estacionalidad. Cabe mencionar que los datos de reanálisis se encuentran completos, caso contrario de observaciones de radiosondeo y METAR, lo que influye considerablemente en un aumento de frecuencias en los resultados de reanálisis.

Con el fin de obtener una aproximación climática, se realiza el análisis para 30 años con los datos de ERA-5 para las mismas estaciones, Figura 1.31. Allí se observa que los patrones mensuales y de altitud son similares a los obtenidos a partir de las observaciones, con la diferencia de que los datos de ERA-5 muestran frecuencias más fuertes en el nivel de 550 hPa.

Adicionalmente, se analiza el comportamiento de POTENG anualmente en un lapso de 30 años para cada estación, Figura 1.32. Los resultados fueron comparados con las observaciones de la Figura 1.26, enmarcando en rojo el rango de años con existencia de observaciones.

Para Bogotá, Figura 1.32 (a), se observan resultados favorables para años con altas frecuencias de POTENG, con respecto a las observaciones. Concuerdan los años 2016, 2017 y 2018 como aquellos de mayor frecuencia de POTENG, sin embargo, los datos de ERA-5 muestran alta ocurrencia en 2010 y 2011, discordante con las observaciones realizadas.

En la Figura 1.32 (b), se halla que en Leticia el 2009 concuerda como un año de alto POTENG, sin embargo, los patrones no son totalmente similares ya que no se evidencia alto POTENG entre el 2014 y el 2018 que si se muestra en las observaciones.

En Tres Esquinas, Figura 1.32 (c), no se observan patrones similares claros de las observaciones con respecto a los datos de reanálisis. De acuerdo a la Figura 1.32 (d), en Cali debido al corto periodo de estudio, no se observan patrones importantes para tener en cuenta. Finalmente, para Riohacha, Figura 1.32 (e), concuerda que 2010 es el año con mayor POTENG en esa zona. Otro resultado importante es que los valores de frecuencia de Riohacha tienden a ser mucho más bajos que los otras 4 estaciones. Por último, se resalta la importancia que pueden tener los datos faltantes de radiosondeo mostrados previamente.

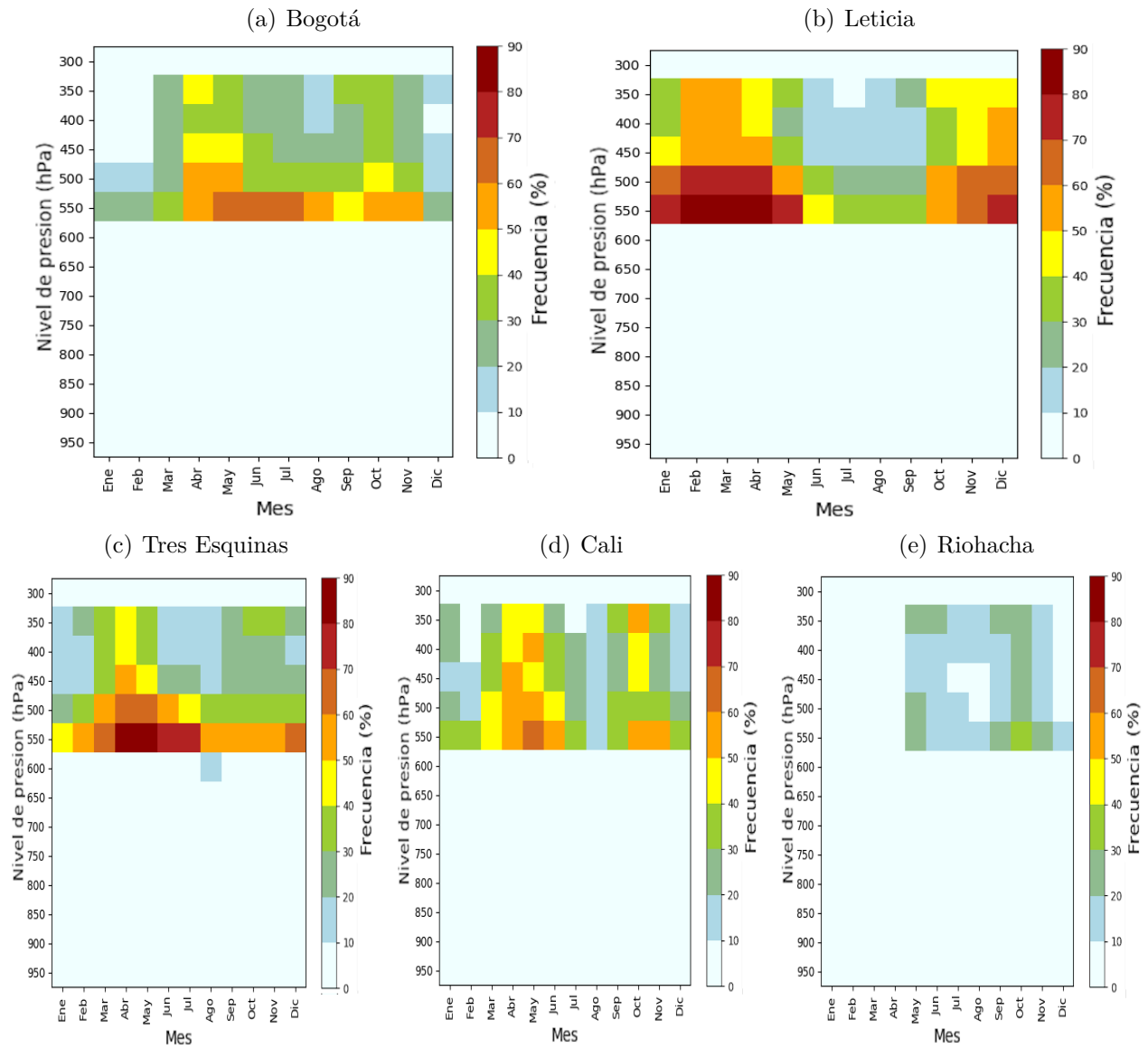


Figura 1.30: Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y nivel de presión en Bogotá, Leticia, Tres Esquinas, Cali y Riohacha a las 12 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de 0.01 de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a la reanálisis ERA-5 y para periodos de tiempos iguales a los tiempos de observación en cada estación señalados en la Tabla 1.4.

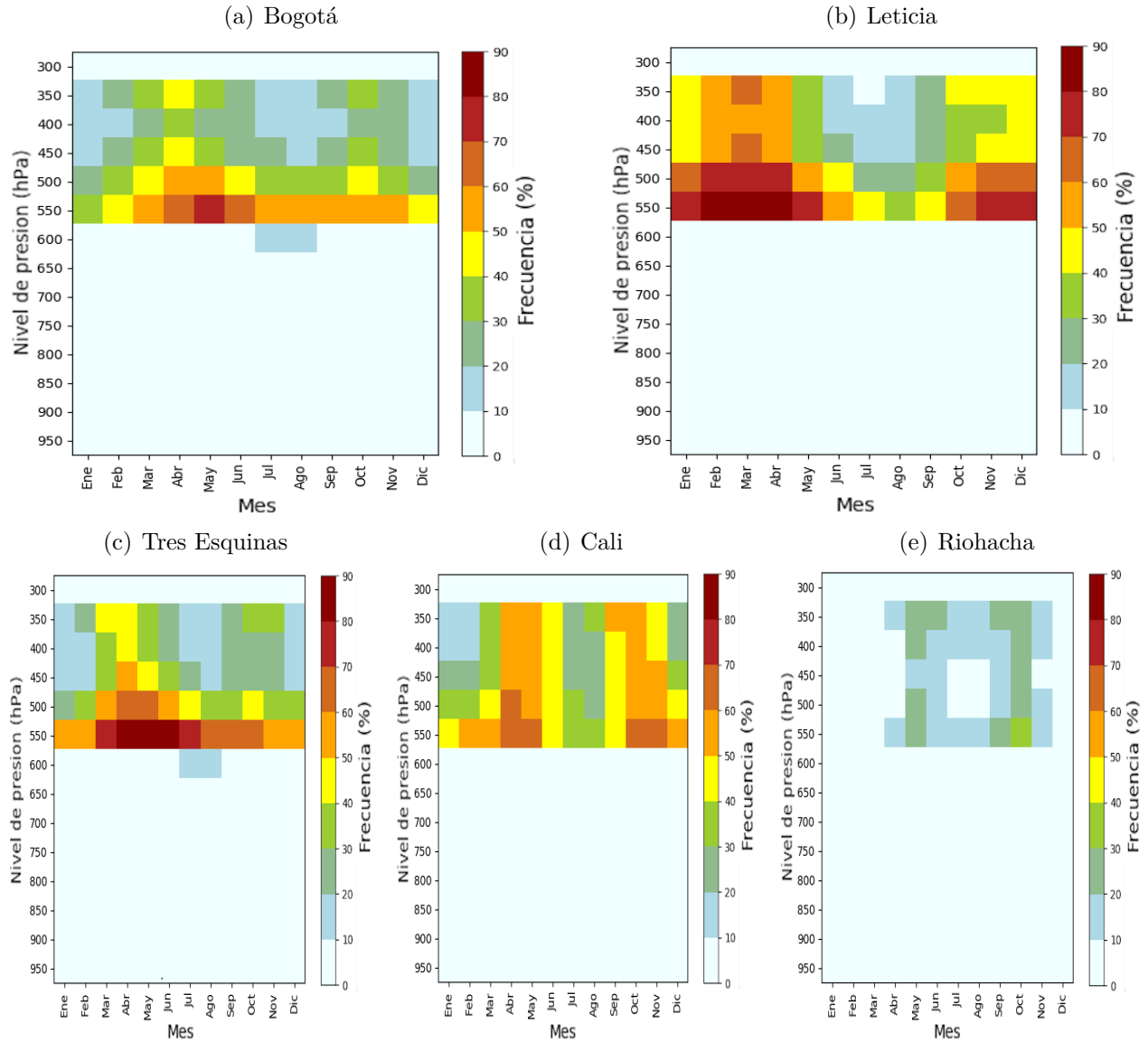


Figura 1.31: Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y nivel de presión en Bogotá, Leticia, Tres Esquinas, Cali y Riohacha a las 12 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de 0.01 de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado al reanálisis ERA-5 y para el periodo de 30 años comprendidos entre 1989 y 2018.

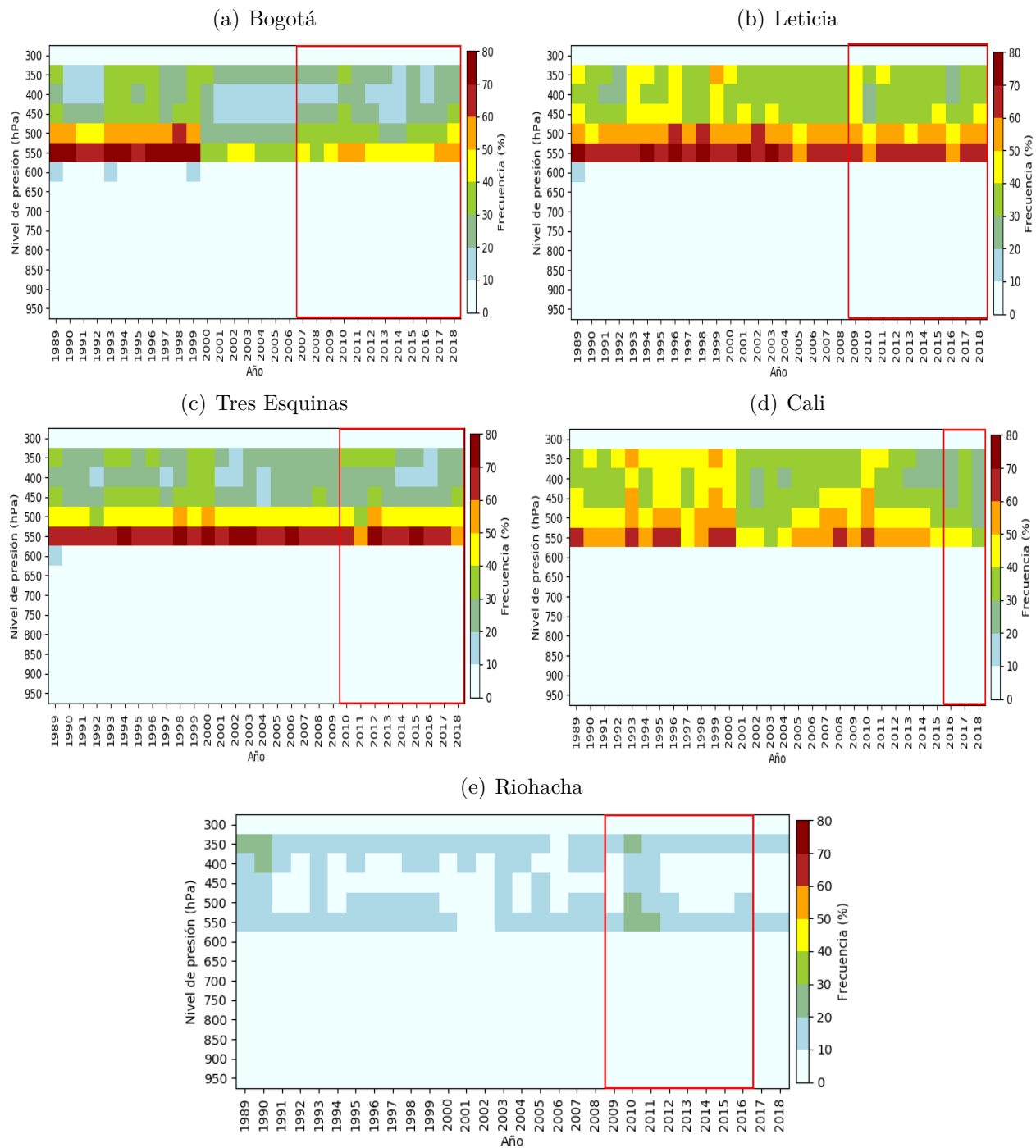


Figura 1.32: Frecuencia promedio (%) de POTENG según el año y nivel de presión en Bogotá, Leticia, Tres Esquinas, Cali y Riohacha a las 12 UTC de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado al reanálisis ERA-5 para el periodo comprendido entre 1989 y 2018 , el cuadro rojo representa el periodo comparativo con observaciones.

1.4.1.3. Algoritmo SLWS mediante datos de ERA-5

Se realiza el mismo procedimiento de las secciones anteriores para comparar los resultados del algoritmo SLWS con los de las observaciones. A diferencia de CIP-sonde-A, el algoritmo SLWS para ERA-5 no muestra patrones mensuales similares a las observaciones en cada periodo de tiempo. La Figura 1.33 muestra que las mayores frecuencias de presencia de CAL se encuentran a 500 hPa, también se puede apreciar que en el caso de Bogotá, Leticia y Tres Esquinas, las mayores frecuencias se concentran entre junio a septiembre, mientras que para Cali ocurre entre diciembre y abril, lo cual no corresponde a las características climáticas de precipitación y humedad relativa de cada estación, difiriendo de manera considerable de los resultados observados.

En el caso de Riohacha, de acuerdo a la Figura 1.33 (e) y tal como se observó en los resultados de CIP-sonde-A, se evidencia que esta estación es donde se presentan menores frecuencias de POTENG, con respecto a las demás estaciones.

Para la climatología a 30 años, Figura 1.34, los resultados difieren a CIP-sonde-A y a las observaciones climatológicas de cada estación. Tampoco se observaron patrones similares anualmente, como se observa en la Figura 1.35.

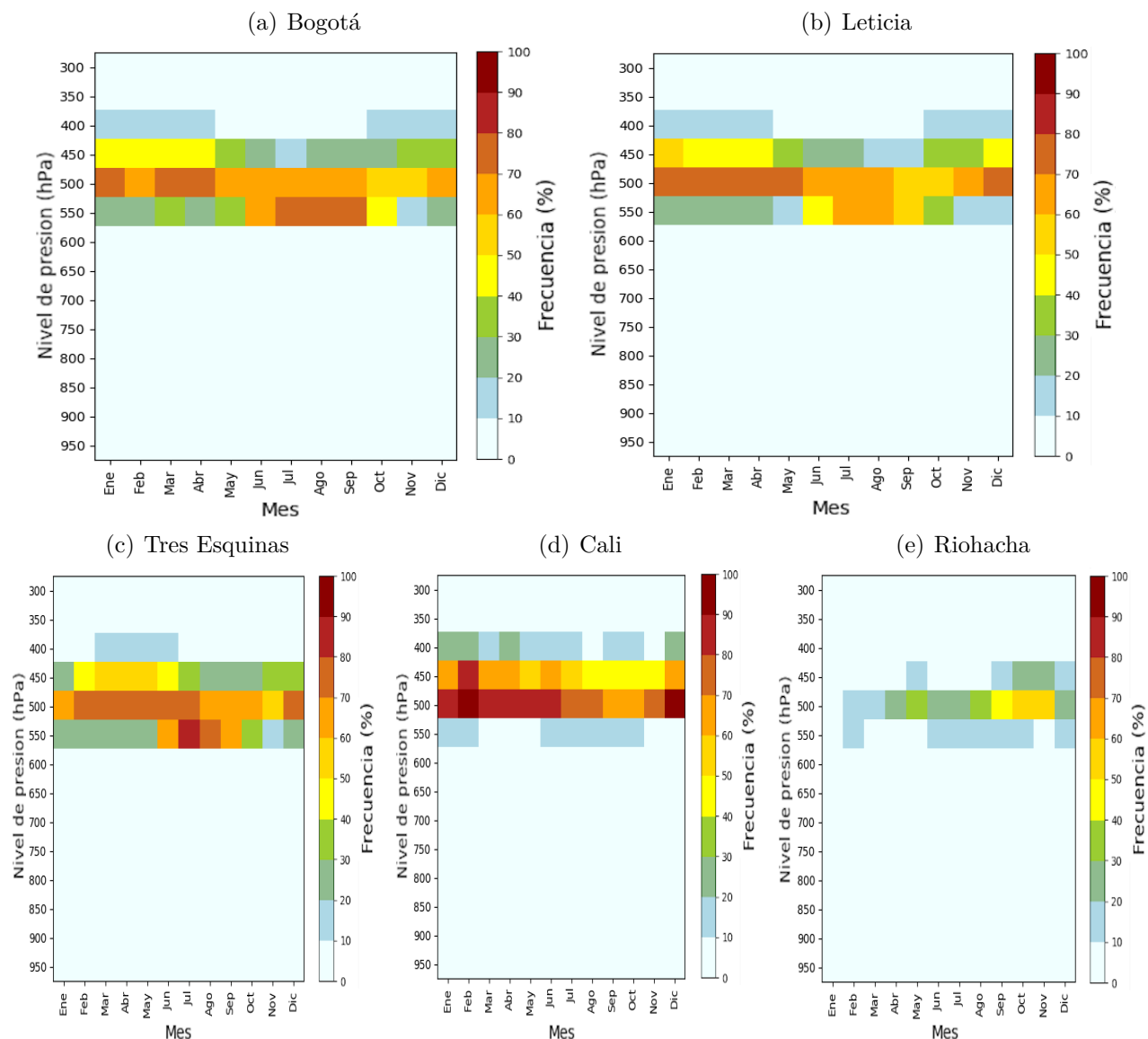


Figura 1.33: Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y nivel de presión en Bogotá, Leticia, Tres Esquinas, Cali y Riohacha a las 12 UTC de acuerdo al algoritmo SLWS aplicado al reanálisis ERA-5 y para periodos de tiempos iguales a los tiempos de observación en cada estación señalados en la Tabla 1.4.

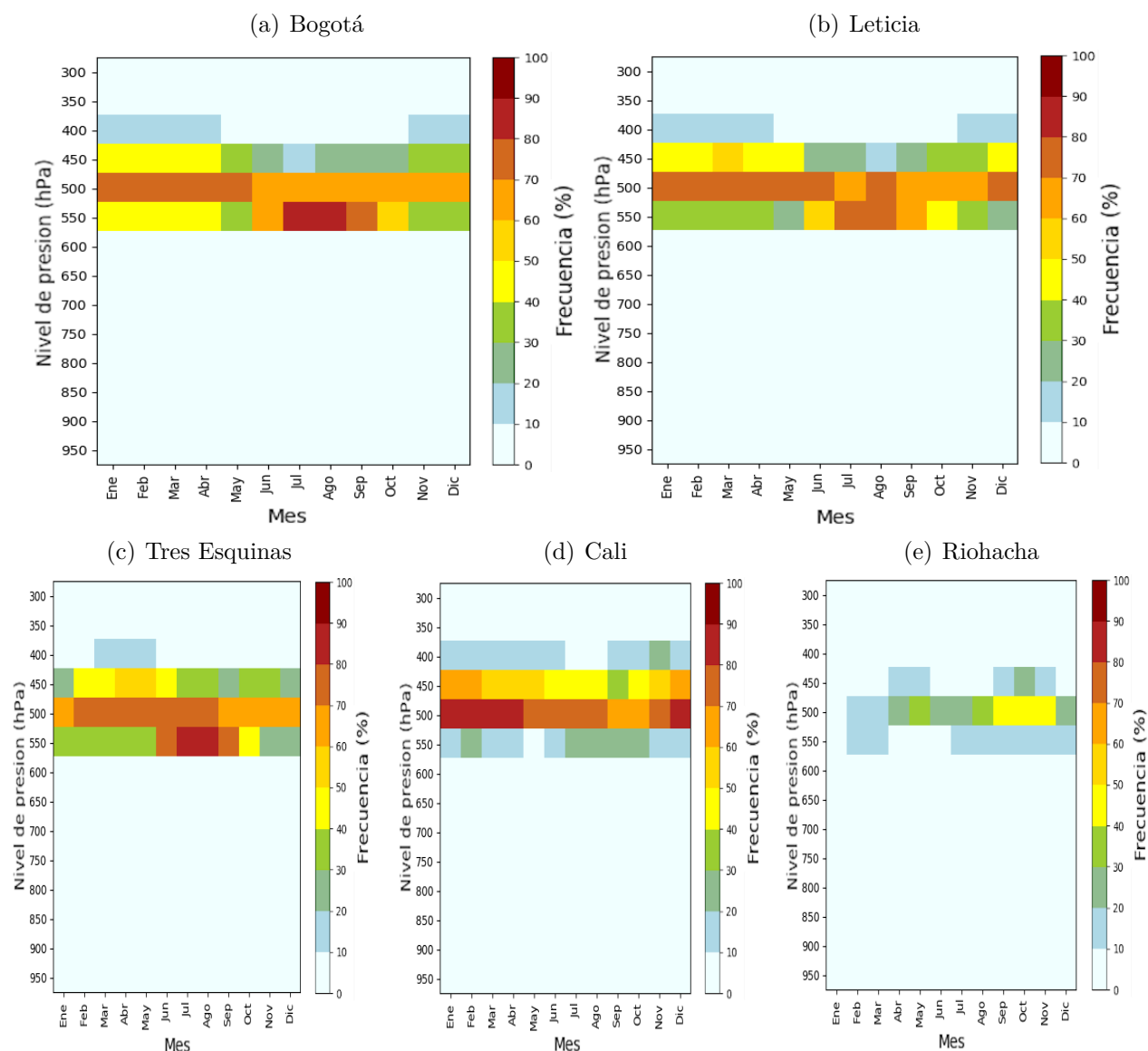


Figura 1.34: Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y nivel de presión en Bogotá, Leticia, Tres Esquinas, Cali y Riohacha a las 12 UTC de acuerdo al algoritmo SLWS aplicado al reanálisis ERA-5 y para el periodo de 30 años comprendido entre 1989 y 2018.

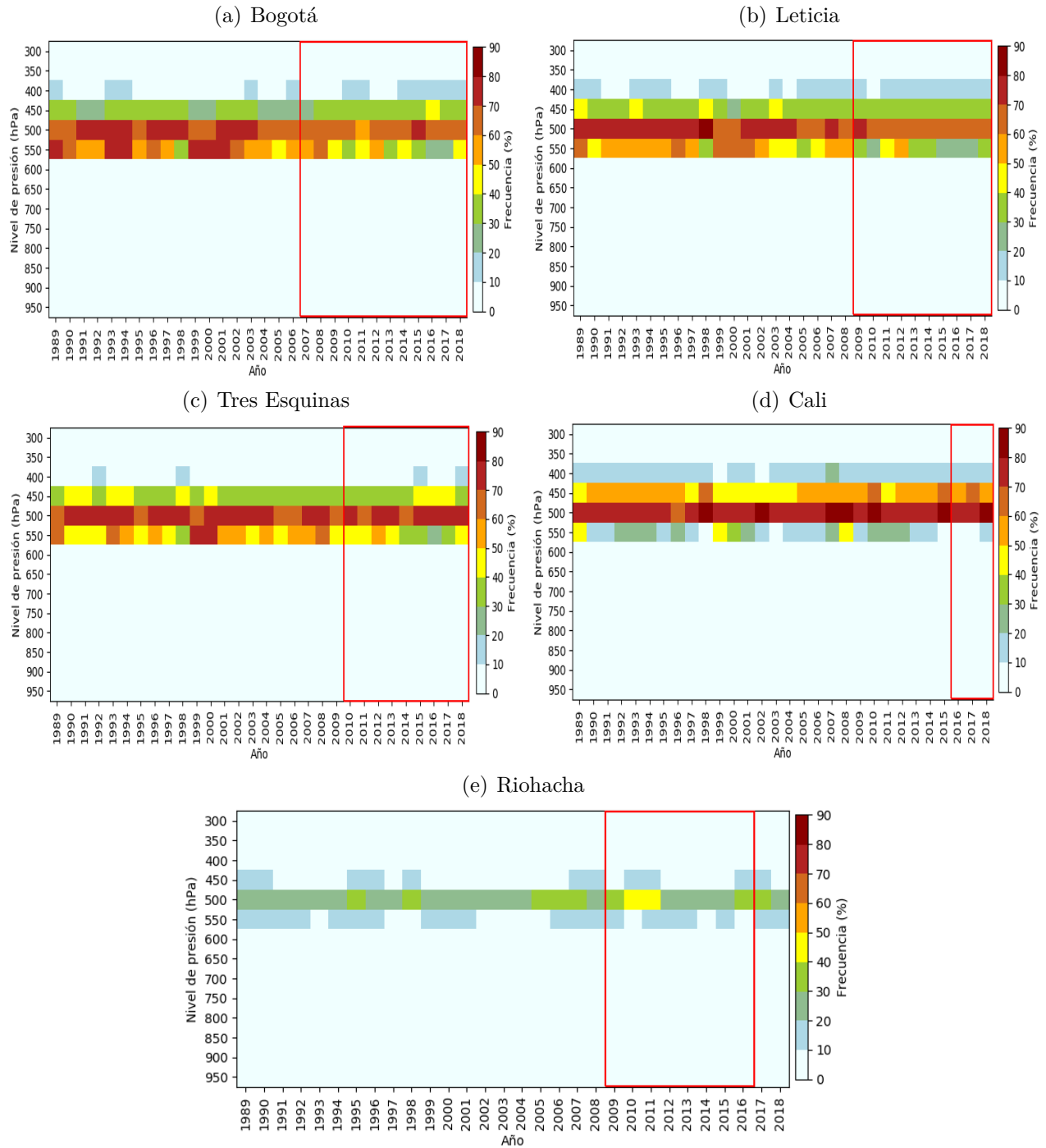


Figura 1.35: Frecuencia promedio (%) de POTENG según el año y nivel de presión en Bogotá, Leticia, Tres Esquinas, Cali y Riohacha a las 12 UTC de acuerdo al algoritmo SLWS aplicado al reanálisis ERA-5 y para el periodo de 30 años comprendido entre 1989 y 2018.

1.4.2. Distribución geográfica de POTENG

En la sección anterior, se observó que los patrones de frecuencia de POTENG obtenidos con el algoritmo CIP-sonde-A para reanálisis ERA-5, son similares a los patrones obtenidos con CIP-sonde-A para los datos observados. Con base en lo anterior, se generaron mapas de frecuencia de POTENG obtenidos con CIP-sonde-A para ERA-5, como se observa en la Figura 1.36. Se evidencia que a nivel general existe influencia de las zonas más altas de la cordillera y gran afectación en la costa pacífica y el sur de la región Amazónica.

En gran parte de la región Pacífica y del occidente de la región Andina se observan frecuencias de al menos 35 %, siendo las zonas de mayor frecuencia: Chocó, Valle del Cauca, Risaralda, Caldas, Quindío, Tolima, norte de Huila, sur de Cundinamarca y el sector entre Santander y Norte de Santander, cercano al nevado del Cocuy. Lo anterior, se relaciona a la nubosidad de tipo orográfica, ya que las zonas generales de mayor elevación en el país o cerca a estas, se ven afectadas con elevadas frecuencias. También, se atribuye a los fenómenos que afectan los departamentos de la región pacífica, como la baja anclada de Panamá, el desplazamiento de la ZCIT, reforzamiento por ondas del este, el jet de bajo nivel del chocó y masas de aire húmedo provenientes del océano pacífico, que se encuentra con los la barrera orográfica de la Cordillera Occidental.

Igualmente, otra zona con frecuencias significativas es la región del Amazonas, más específicamente al sur, donde se observan valores del 30 al 35 %. La zona norte de esta región, es fuertemente afectada en ciertos periodos del año por complejos convectivos, producto de el paso de la ZCIT, ondas del este y la humedad proveniente del este que se acumula en la cordillera oriental. Las altas frecuencias al sur de la Amazonía, pueden atribuirse a el paso de la ZCIT, la baja de la Amazonía, la afectación del alta de Bolivia, la ZCAS y la influencia por los frentes fríos provenientes del hemisferio sur (Guzmán *et al.*, 2014).

Por el contrario, las frecuencias más bajas se encuentran hacia el norte de la región Caribe, con valores entre 5 % y 20 %, donde el jet de bajo nivel del caribe inhibe en gran medida la formación de nubosidad; sin embargo, en el departamento del Magdalena, donde está ubicada la Sierra Nevada de Santa Marta, se pueden encontrar zonas de altas frecuencias con valores entre 20 % y 25 %, asociado a la nubosidad de tipo orográfica que produce dicha elevación, más la presencia de complejos convectivos y el posicionamiento de la ZCIT al norte a mitad de año.

En la Figura 1.37, se muestran mapas de frecuencia total de POTENG mensual multianual en Colombia, donde se evidencia el patrón del paso de la ZCIT durante el año, principal factor que aporta a la producción de nubes y por consiguiente la producción de POTENG en la zona ecuatorial.

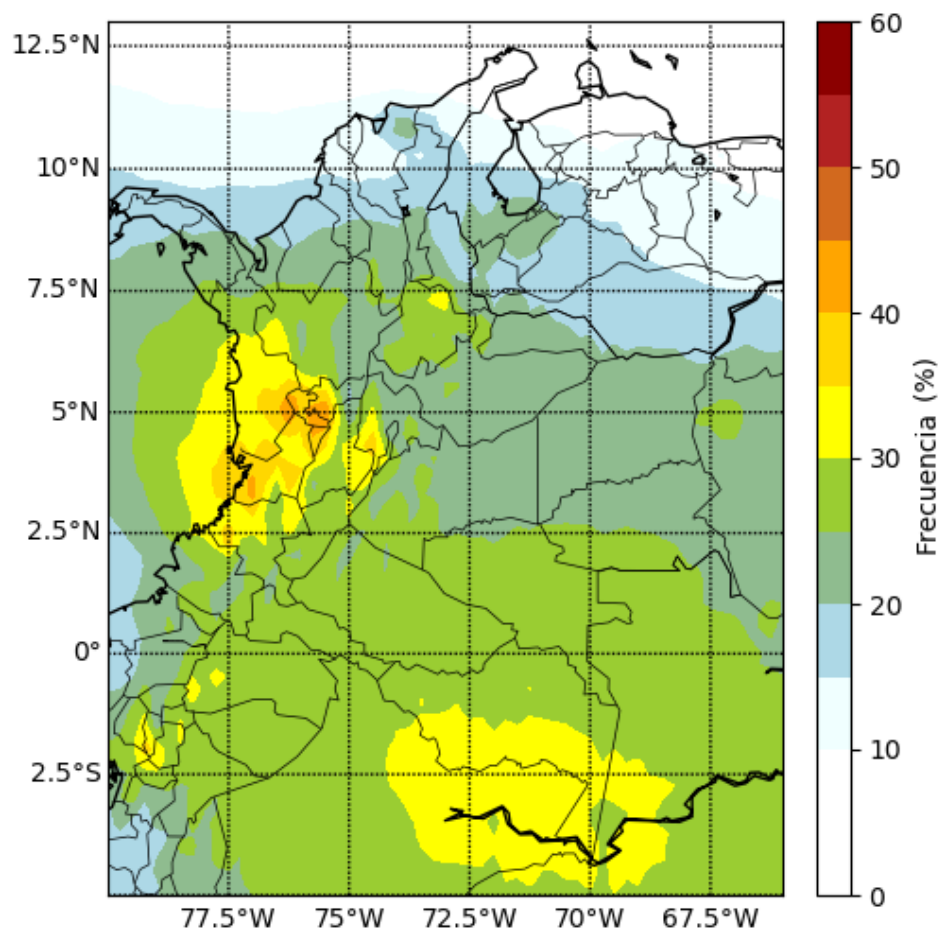


Figura 1.36: Frecuencia relativa de POTENG para la columna entre los niveles isobáricos de 600 a 300 hPa sobre Colombia, calculada con el algoritmo CIP-sonde-A a partir del reanálisis ERA-5 para el periodo de 30 años de 1989 a 2018.

En enero, en gran parte del país no se presentan frecuencias relevantes, a excepción de la región Amazónica, con un máximo del 35 % y el centro-sur de la región Pacífica, con frecuencias hasta del 30 %. En febrero hay un patrón similar, sin embargo, se observa un incremento y avance de las frecuencias hacia al norte.

En marzo, en el sur de la región Amazónica aumenta la frecuencia hasta 50 %, en la región

Pacífica 40 %, mientras que en el centro del país se presentan frecuencias entre el 15 % y el 35 %, continuando con un incremento de frecuencias hacia el norte, asociado con el ascenso progresivo de la ZCIT.

En abril, se registra un aumento de frecuencias importante en el centro de la región Pacífica, centro y el oeste de la región Andina con frecuencias entre 40 % y 55 %; también se incrementan en la región Amazónica, con valores que van del 40 % al 45 %. Hacia el sur de la región Caribe también se evidencian aumentos importantes. El ascenso progresivo de la ZCIT, empieza a fortalecer la afectación de la baja anclada de Panamá y el aumento de humedad en el Pacífico.

En mayo, se da la primera temporada lluviosa en gran parte del país. Las frecuencias disminuyen al sur de la Amazonía, pero aumentan al norte de la misma. Adicionalmente, se observa que las frecuencias aumentan significativamente, llegando a valores cercanos al 60 %, como en el centro de la región Pacífica y el centro-oeste de la región Andina; específicamente, en el departamento de Santander se encuentran frecuencias de hasta un 45 %, así como en el sur-este de la región Orinoquía. En este mes, normalmente se inicia la afectación de las ondas del este en el país, lo cual explica el aumento de frecuencias relevante en gran parte del mismo, resaltando la afectación en la Región Orinoquía y norte de la Amazonía. Por su parte, en la región Caribe aumenta la extensión espacial de valores con frecuencias entre 15 % y 45 %, Finalmente, presentándose mayores valores al sur y al norte del departamento de Magdalena.

En los meses de junio y julio, hay una disminución general de los valores de frecuencia en todas las regiones del país. En la región Amazonía, los valores disminuyen entre un 15 % a 30 %, producto de marcado ascenso de la ZCIT. En las regiones Andina y Pacífica las frecuencias disminuyen considerablemente, sin embargo, siguen existiendo frecuencias de hasta 55 % en ciertas áreas de estas regiones. Las frecuencias siguen disminuyendo en el mes de agosto en todo el territorio, a excepción de la región Caribe, en donde aumentan levemente. En septiembre y octubre se observa un fuerte aumento de los valores al oeste del país, es decir en la región Pacífica y Andina, este aumento, está relacionado a la época de mayor intensidad del jet de bajo nivel del Chocó, el cual transporta grandes cantidades de humedad desde el Océano Pacífico hacia el interior del país, interactuando con la topografía de los Andes occidentales y con los vientos alisios del este, favoreciendo la convección (Guzmán *et al.*, 2014). También, se evidencia un aumento leve de las frecuencias en gran parte del oeste de la Amazonía.

En noviembre se observa una disminución de frecuencias en todas las regiones, coincidente con el final de la afectación de las ondas del este. Al sur de la Amazonía se presenta un aumento significativo de frecuencias.

En diciembre se puede notar que la ZCIT se encuentra muy al sur, por lo cual las frecuencias son muy pequeñas en la mayor parte del territorio nacional, exceptuando el centro de la región Pacífica y el sur de la Amazonía. El patrón de diciembre es semejante a los patrones de enero y febrero.

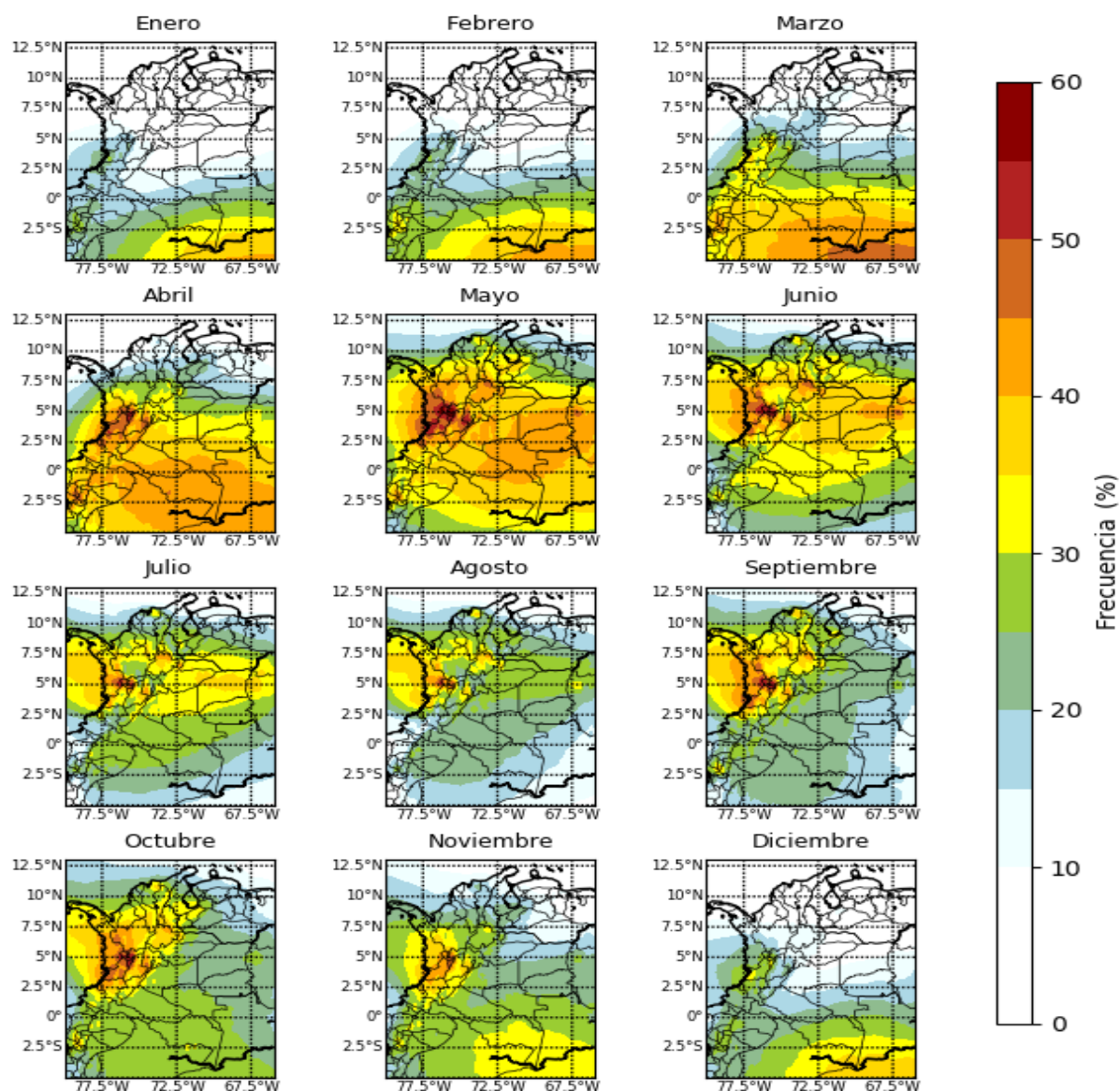


Figura 1.37: Frecuencia relativa total de POTENG mensual multianual para la columna entre los niveles isobáricos de 600 a 300 hPa sobre Colombia calculada con el algoritmo CIP-sonde-A a partir del reanálisis ERA-5 para de periodo de 30 años de 1989 a 2018.

Adicionalmente, se generó el mapa de frecuencias con el algoritmo SLWS infiriendo el POTENG con base en la variable CLWC de ERA-5 en el rango de temperaturas de -25 a -2 °C.

Como se observa en la Figura 1.38, los valores de frecuencia calculados con el algoritmo SLWS muestran resultados similares en la distribución geográfica a los de CIP-sonde-A. Aunque en SLWS se encuentran frecuencias más bajas en las regiones Pacífica y Andina, sin embargo, existe un patrón similar de mayores frecuencias en las regiones más altas de la cordillera y en zonas particulares como: Risaralda, Caldas, parte oriental del Tolima, sur de Cundinamarca, el norte del Magdalena y un sector entre Santander y Norte de Santander. Cabe resaltar que SLWS muestra mayor cobertura de POTENG al sur de la Amazonía que CIP-sonde-A.

La Figura 1.39, presenta mapas de frecuencia relativa del POTENG mensual multianual en Colombia, calculado mediante el algoritmo SLWS. Estos mapas muestran valores grandes de frecuencia en las zonas coincidentes con la cordillera para todos los meses, similares a los resultados de la Figura 1.38. Se observa variabilidad mes a mes, sin embargo, no es consistente con el paso de la ZCIT.

En enero y febrero se observa desplazamiento de la frecuencia de POTENG hacia el norte, posiblemente por el ascenso de la ZCIT, así como el aumento de frecuencias en el Pacífico, la Amazonía y sur de la Orinoquía. Cabe destacar que POTENG se marca muy fuerte sobre la zona de cordillera.

En marzo y abril ocurre un incremento general de las frecuencias, especialmente al oriente de la cordillera oriental y el área de incidencia de la ZCIT alcanza su máxima extensión sobre el territorio en el mes de mayo, cubriendo casi la totalidad de las zonas donde aumentan las frecuencias en las distintas regiones.

Durante junio se mantienen condiciones similares, aunque se evidencia un aumento importante de frecuencias en el nor-oeste de la Amazonía, que se extiende hacia el norte y toda la región de la Orinoquía para el mes de julio. En el mes de agosto se observa una leve disminución de frecuencias en todo el centro y sur del país a excepción de la región Caribe, puntualmente al norte del departamento del Magdalena. En septiembre y octubre continua la disminución de frecuencias en todo el territorio, con mayor cambio en el norte de la región Amazónica y en la Orinoquía, sin embargo, se concentran altas frecuencias al sur del departamento del Amazonas.

Durante los meses de octubre y noviembre se observa una diferencia entre CIP-sonde-A y SLWS, ya que el primero muestra un aumento de los valores de frecuencia en la región Pacífica y Andina, aumento no registrado en los valores calculado con SLWS. Este incremento del POTENG se relaciona con el fortalecimiento del jet de bajo nivel del Chocó y la segunda

temporada lluviosa en la región Andina durante octubre y noviembre.

Finalmente, en noviembre y diciembre coinciden los patrones con CIP-sonde-A, ya que se muestran una disminución progresiva de las frecuencias de POTENG influenciado por el desplazamiento de la ZCIT hacia el sur.

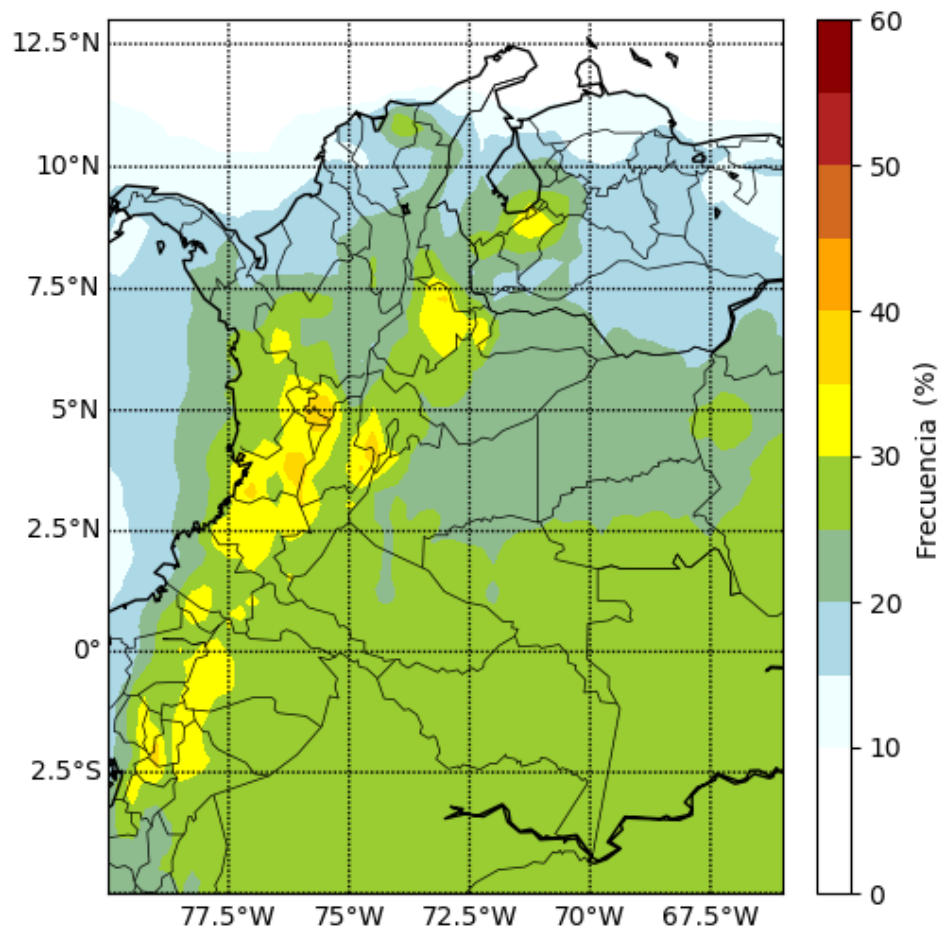


Figura 1.38: Frecuencia relativa de POTENG para la columna entre los niveles isobáricos de 600 a 300 hPa sobre Colombia, calculada con el algoritmo SLWS a partir del reanálisis ERA-5 para el periodo de 30 años de 1989 a 2018.

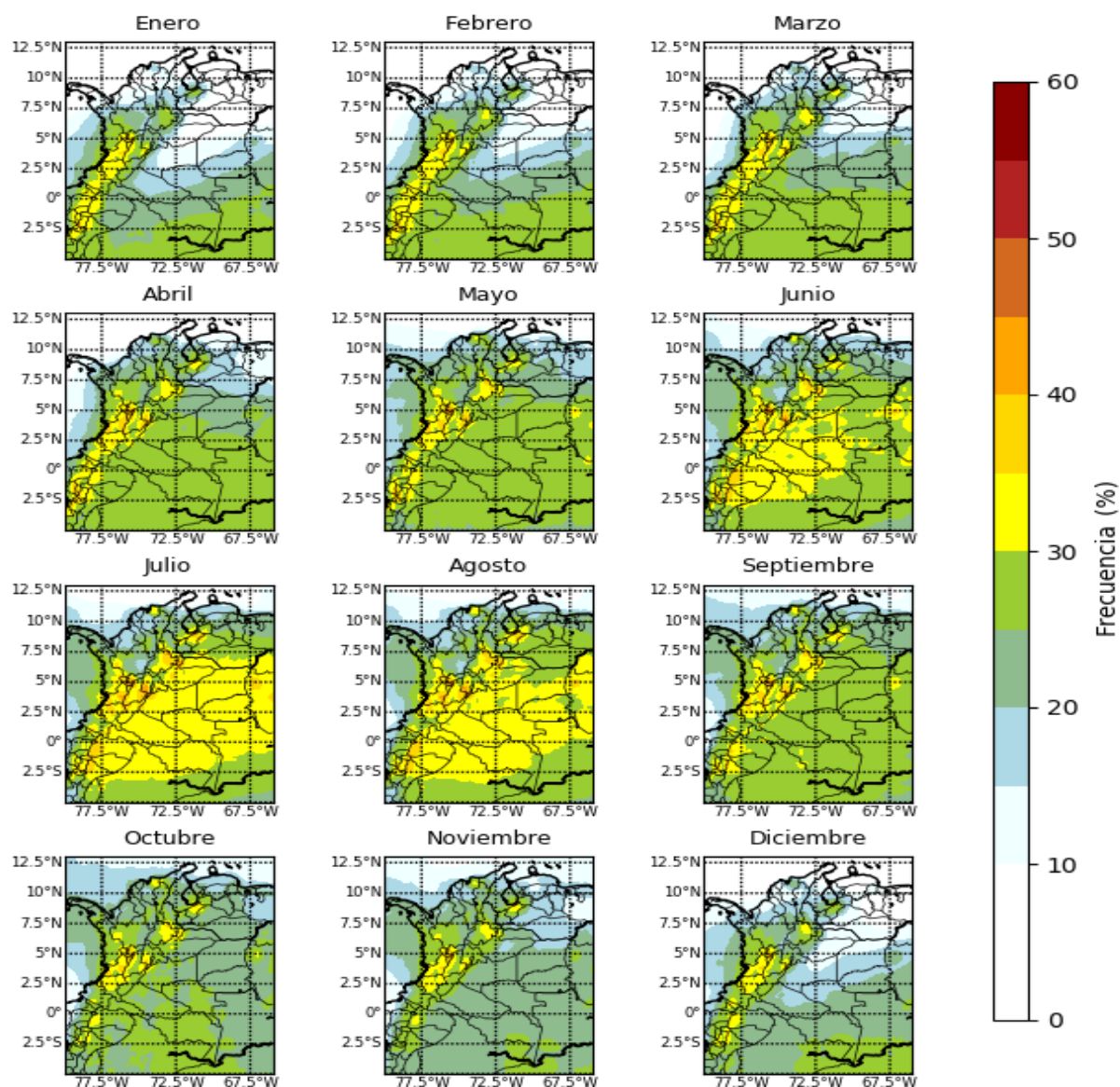


Figura 1.39: Frecuencia relativa total de POTENG mensual multianual para la columna entre los niveles isobáricos de 600 a 300 hPa sobre Colombia, calculada con el algoritmo SLWS a partir del reanálisis ERA-5 para de periodo de 30 años de 1989 a 2018.

Mediante un diagrama de dispersión, se comparan los valores de frecuencia total de POTENG para cada celda de rejilla de reanálisis obtenidos con los algoritmos CIP-sonde y SLWS, Figura 1.40. Se observa que a mayor frecuencia de POTENG, mayor es la diferencia entre los dos algoritmos, sin embargo, en general se observa gran similitud en la distribución de frecuencias entre los dos mapas.

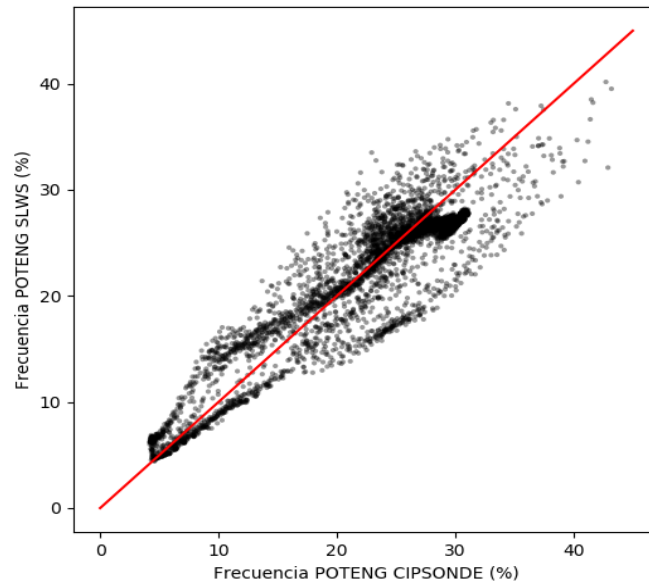


Figura 1.40: Diagrama de dispersión para valores de frecuencia de POTENG para ERA-5 para periodo 1989 a 2018, los valores son la frecuencia en cada coordenada de los mapas de las Figuras 1.36 y 1.38 obtenidos con los algoritmos CIP-sonde-A y SLWS respectivamente.

En la Figura 1.41 se encuentra la comparación de frecuencias para cada mes del año, que a diferencia de la frecuencia total, algunos meses muestran distribuciones que difieren considerablemente, alejándose de la línea diagonal de referencia. En el periodo entre mayo y septiembre, una gran cantidad de parejas de valores de frecuencia de POTENG muestran saturación, es decir, se muestra un rango pequeño de valores de frecuencias calculadas con SLWS, aproximadamente entre 24 % a 32 %, para un rango relativamente grande de valores calculados con CIP-sonde-A. Este rango de CIP-SONDE también indica un corrimiento hacia valores más pequeños pasando de valores entre 27 % y 42 % para mayo, a valores entre 12 % y 25 % para septiembre. Este corrimiento tiene efecto de pasar, respecto a CIP-sonde-A, de subestimaciones de SLWS en mayores sobreestimaciones en septiembre.

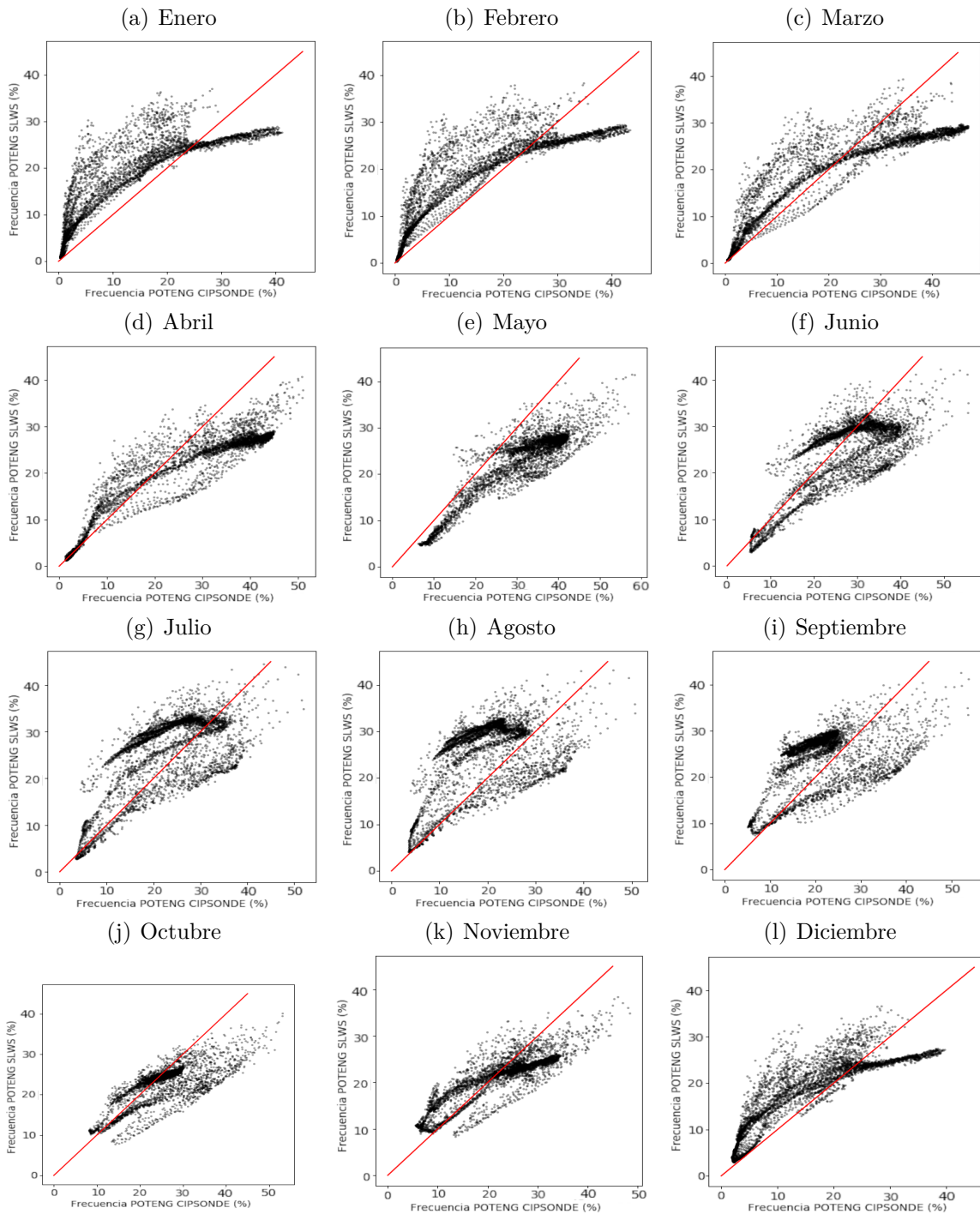


Figura 1.41: Diagrama de dispersión para valores de frecuencia de POTENG mediante ERA-5 para el periodo de 1989 a 2018, los valores son la frecuencia en cada coordenada de los mapas mensuales multianuales de las Figuras 1.37 y 1.39 obtenidos con los algoritmos CIP-sonde-A y SLWS respectivamente.

En los meses de noviembre a marzo hay un valor de frecuencia entre 20 % y 28 %, que divide las parejas de datos en dos grupos. Un primer grupo corresponde a parejas con frecuencias bajas por debajo de la frecuencia particular, para las cuales los valores conseguidos con SLWS son mayores a los obtenidos con CIP-sonde-A. El segundo corresponde a parejas con frecuencias altas, por encima de la frecuencia particular, para las cuales los valores obtenidos con CIP-sonde-A son mayores a los conseguidos con SLWS.

En la Figura 1.42 se realiza un análisis de la frecuencia de POTENG en las horas de estudio 00:00, 06:00, 12:00 Y 18 UTC. Allí se puede distinguir que la hora de mayor POTENG es a las 06:00 UTC (01:00 HLC), representativo para horas de la media noche y primeras horas de la madrugada, con los valores de frecuencia de POTENG más altos para los departamentos del Valle del Cauca, Risaralda, Caldas, Tolima y en general el centro de la región Pacífica, oeste de la región Andina y gran parte de la Amazonía.

A las 12:00UTC (07:00 HLC) representativa para horas de la madrugada, el patrón es similar, sin embargo, las frecuencias se reducen considerablemente para el noroeste de la Amazonía y el norte de la región Andina, específicamente entre Antioquia y Santander. En el resto del país los patrones se reducen en cobertura geográfica.

A las 18:00 UTC (13:00 HLC), representativa para horas del mediodía, se observan las frecuencias más bajas de las 4 horas consideradas. Si bien las frecuencias sobre la Amazonía no superan el 45 %, hay una reducción importante hacia el norte la región Pacífica y en las zonas de mayor frecuencia sobre el Valle del Cauca.

A las 00:00UTC (19:00 HLC) representativa para las horas de la tarde-noche, se observan condiciones similares a las encontradas a las 12:00 UTC, como son un incremento en las frecuencias con respecto al medio día, en especial en gran parte de la región Orinoquia, centro y norte de la región Pacífica y oeste de la región Andina, como también un aumento importante sobre la cordillera oriental.

Los patrones hallados en este análisis, coinciden con el ciclo de precipitación diurno que se observa en el atlas climatológico en IDEAM (2019a), para gran parte de las estaciones; por ejemplo, en estaciones como Quibdó, Medellín, Barrancabermeja entre otras, es posible percibir que la precipitación es mayor en horas de la tarde-noche, noche y madrugada, teniendo en cuenta que no en todas las estaciones se tienen los mismos patrones.

De acuerdo a Poveda (2004), el período comprendido entre las 8:00 y las 11:00 HLC es el lapso con menor probabilidad de lluvia en los Andes de Colombia y en estaciones localizadas sobre la vertiente oriental de la Cordillera Central, presentando un ciclo diurno unimodal con precipitaciones en la madrugada. Sin embargo, el ciclo diurno en Colombia es altamente variable, tanto en el espacio como en los distintos meses del año, con una influencia muy fuerte de factores locales. Por lo anterior este aspecto se debe analizar más a fondo en futuros

estudios, dado que en Colombia no se cuenta con suficientes observaciones de sondeo para explorar los perfiles verticales a otra hora distinta a las 12:00 UTC.

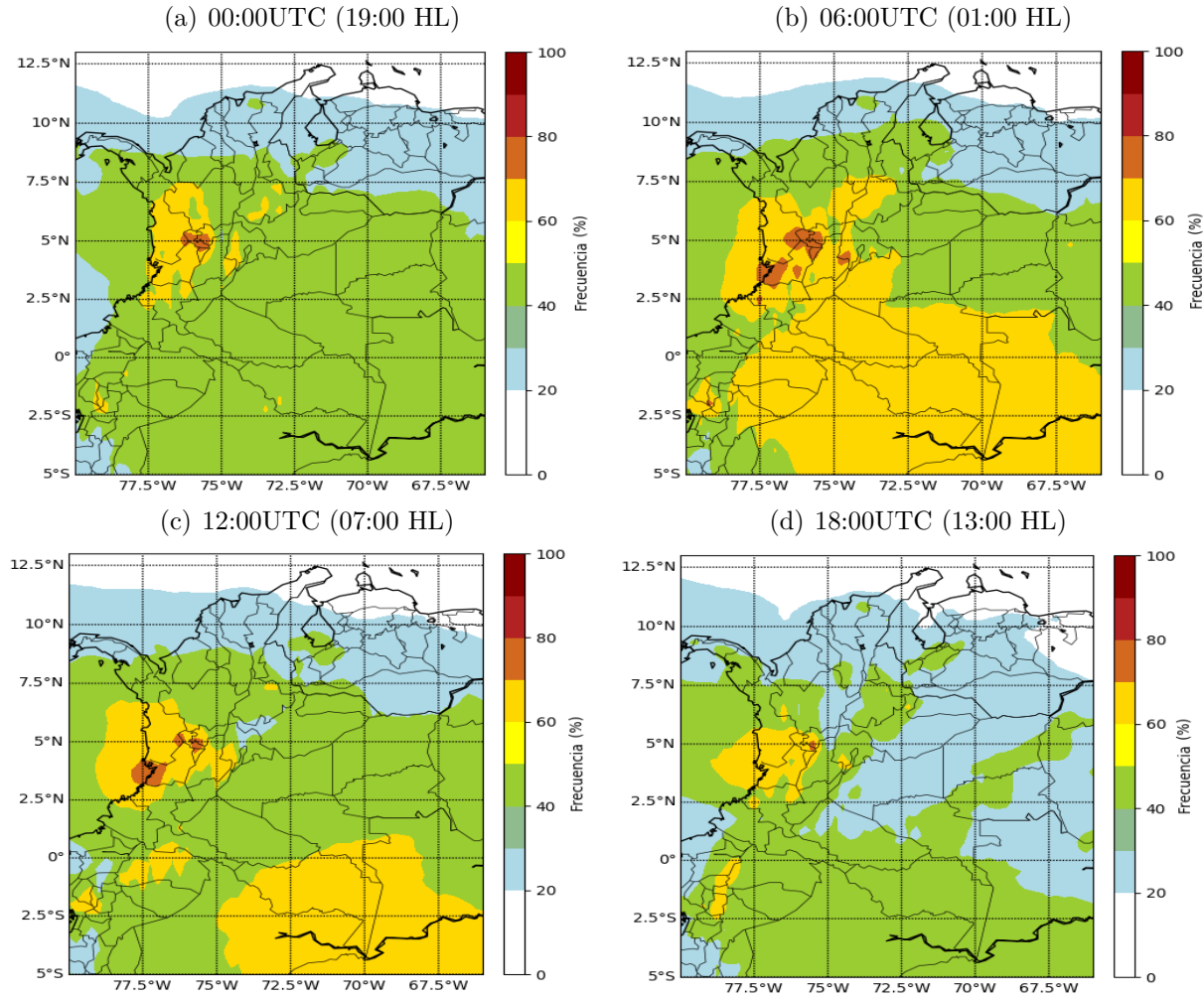


Figura 1.42: Frecuencia relativa de POTENG para las 12 UTC, 18 UTC, 00 UTC y 06 UTC, en Colombia para la columna entre los niveles isobáricos de 600 a 300 hPa, calculadas con el algoritmo CIP-sonde-A para el reanálisis ERA-5 para el periodo de 30 años de 1989 a 2018.

Para SLWS, los resultados muestran que la hora con mayor POTENG es a las 18:00 UTC (13:00 HLC), siendo discordante con las climatologías de precipitación de IDEAM (2019a), ya que las horas del medio día son las de menor detección de precipitación en la gran mayoría de estaciones del país. Las figuras representativas para SLWS se pueden observar en el Anexo C en la Figura C.14.

Los mecanismos físicos que pueden explicar el comportamiento variable del ciclo diurno, se

relacionan con los procesos de interacción suelo-atmósfera, la insolación, la dinámica diurna de los sistemas convectivos de Meso-Escala y la circulación de vientos de escala local y sinóptica, dentro y sobre los valles y las vertientes Andinas (Poveda, 2004).

1.5. Conclusiones y Recomendaciones

El algoritmo CIP-sonde-A muestra los mejores resultados, ya que sus patrones mensuales tanto en estaciones específicas como en mapas recreados a partir de datos de reanálisis de ERA-5, están acordes a las observaciones de reportes METAR, radiosondeos, patrones de comportamiento de las isobaras en altura, humedad en altura, patrones climatológicos de precipitación en cada estación y fenómenos a escala sinóptica de cada región. Con el algoritmo SLWS no se evidencian los mismos patrones de frecuencias mensuales de ocurrencia de POTENG con respecto a las observaciones realizadas.

El POTENG calculado con el algoritmo CIP-sonde-A para las observaciones tiende a disminuir con la altura hasta aproximadamente 350 hPa, representativo para el rango de altitud de 8 a 9 km y presenta mayores frecuencias entre 500 y 550 hPa, correspondiente a altitudes entre 4 y 5 km; se evidencian patrones mensuales que son consistentes con las temporadas de lluvias y las temporadas secas propias de cada estación.

Para el periodo de 30 años mediante ERA-5, con el algoritmo CIP-sonde-A se siguen manifestando patrones similares. Las mayores frecuencias de POTENG para las estaciones seleccionadas se observan en Leticia y Tres Esquinas, de acuerdo a las características descritas en la sección anterior. Los rangos de POTENG en altura se mantienen conforme a las observaciones, con mayores frecuencias entre 500 y 550 hPa.

Aunque los datos faltantes pudieron influir en los resultados de las observaciones, en los datos de reanálisis se evidenciaron similitudes importantes a los patrones mensuales de observaciones. La estación de Riohacha es la que menos POTENG detectó, tanto en las observaciones como en los resultados de ERA-5 mediante CIP-sonde-A.

Los resultados de frecuencia de POTENG para 30 años con el algoritmo SLWS mostraron patrones muy extraños y difíciles de analizar, ya que no concuerdan con los parámetros de las observaciones.

En las frecuencias de POTENG por año, no se observan patrones claros coincidentes con los rangos de observación para ninguno de los dos algoritmos, inhibiendo la posibilidad de asociarlo claramente con fenómenos de variabilidad climática, causado probablemente por la brecha de datos faltantes de radiosondeos que influyen en los patrones de frecuencia para los

diferentes años.

En los algoritmos CIP-sonde-A y SLWS se observan patrones geográficos similares. Obteniéndose como las zonas con mayor ocurrencia de POTENG los sectores del Cauca, Valle del Cauca, sur de Chocó, Risaralda, norte de Tolima, Caldas, sur de Cundinamarca, sur de la Amazonía y entre Santander y Norte de Santander. En la región Caribe, la mayor concentración se observa en cercanías de la Sierra Nevada de Santa Marta, sin embargo, se evidencian diferencias importantes en los patrones mensuales de los dos algoritmos. Entre las zonas con menor frecuencia de POTENG se encuentra el departamento el nor-oeste de la región Caribe, La Guajira, norte de Bolívar, Atlántico y centro-oeste del Magdalena y también la zona norte de la región Orinoquía.

El algoritmo SLWS tiene diferencias importantes en las frecuencias mensuales en la distribución geográfica de POTENG con respecto a CIP-sonde-A. Se observa una fuerte sobreestimación de SLWS en los meses de mayo a agosto, donde no se evidencia una disminución de POTENG en algunos sectores del país, especialmente en la región Pacífica, región Andina y gran parte de la Amazonía.

Dentro de los factores más influyentes en los patrones geográficos de POTENG se encuentran la orografía, el comportamiento de la ZCIT, ondas del este y los fenómenos a escala sinóptica del Pacífico y de la Amazonía. Sin embargo, se deben tener en cuenta las diversas variables a nivel local que pueden influir en la producción de nubosidad.

De acuerdo a CIP-sonde-A, la hora del ciclo diurno con mayor tendencia de POTENG es a las 06:00 UTC, en horas de la madrugada, mientras que a las 18:00 UTC, en horas del mediodía, se encontraron los registros de menor tendencia de POTENG. Se debe profundizar en el comportamiento del ciclo diurno en el futuro, ya que éste es altamente variable en el espacio y en el transcurrir de los meses del año, con una influencia muy fuerte de factores locales, adicional a la falta de datos de radiosondeo para recrear otras horas del día con este método.

Capítulo 2

Eventos de Englamiento de Aeronaves en Colombia

2.1. Datos y Metodología

2.1.1. Datos

En Colombia existe gran dificultad para encontrar datos o reportes meteorológicos generados a bordo de aeronaves en vuelo, debido a falta tanto de vuelos de investigación, como de disciplina en los procedimientos de reporte establecidos en las instituciones aeronáuticas, a diferencia de otros países donde los datos de aeronaves se convirtieron en base clave para el monitoreo y pronóstico de fenómenos peligrosos para la aviación. Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó una búsqueda de eventos de englamiento a partir de diferentes conjuntos de datos en las instituciones de autoridad aeronáutica.

El primer conjunto de datos proviene del Sistema Registrador de Datos de Vuelo (FDR) de la FAC. Este dispositivo se utiliza para registrar variables de diferentes sistemas de la aeronave en cada momento del vuelo, con el objetivo principal de poder realizar análisis después de la ocurrencia de un accidente aéreo. Los datos FDR hacen parte de la caja negra de las aeronaves y en el caso de la FAC, son leídos y exportados por medio del sistema Insight, utilizado para investigación en el campo de seguridad aérea.

Una de las variables que puede registrar el FDR, es el uso de sistemas de deshielo o alertas de hielo. De acuerdo a Politovich (2003), las aeronaves pueden volar en condiciones de formación de hielo, para hacerlo legalmente, deben primero estar certificadas y equipadas con dispositivos que sirven para prevenir el hielo o eliminarlo una vez que se haya adherido. Dicho equipo antihielo o deshielo se puede desplegar manualmente o mediante un sistema automático activado por una sonda de detección de formación de hielo. El equipo incluye “botas” neumáticas, calentamiento en las superficies y líquidos anticongelantes. Estos mecanismos pueden aplicarse a los bordes anteriores de los planos y a la cola, las hélices, los motores y las superficies expuestas como los tubos Pitot. Los sistemas e indicaciones registradas por el sistema FDR para la detección de eventos de englamiento, se observan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Sistemas de deshielo y alertas registrados en el sistema FDR para aeronave C-295

Sistemas registrado	Indicación	Ubicación o Función
De-ice Wing In	Active - Inactive	Seccion Plano interior
De-ice Wing Mid	Active - Inactive	Sección Plano intermedia
De-ice Wing Out	Active - Inactive	Sección Planos exterior
De-ice Tail	Active - Inactive	Empenaje
De-ice Prop 1	Active - Inactive	Helice 1
De-ice Prop 2	Active - Inactive	Helice 2
De-ice Standby Prop	Active - Inactive	Helice(reserva)
De-ice Air Intake 1	Active - Inactive	Toma de aire motor 1
De-ice Air Intake 2	Active - Inactive	Toma de aire motor 2
De-ice Standby Air Intake	Active - Inactive	Toma de aire (reserva)
De-ice Auto Light	Active - Inactive	Sistema automatico ligero
De-ice Auto Heavy	Active - Inactive	Sistema automatico fuerte
Airframe Ice Detect	Caution - No Caution	Detector en fuselaje

Se realiza la recolección de datos de FDR de aeronaves C-295, ya que fueron los únicos sistemas que reportaban activación de sistemas y alertas de deshielo. Se recopilaron un total de 215 vuelos, entre los cuales 55 registran activación de sistemas de deshielo o alertas de hielo en la superficie de la aeronave. En los 160 vuelos restantes, no se evidencia ningún registro de presencia de hielo en la aeronave, es decir, no se registra activación de sistemas o alertas de deshielo. Los primeros se denominaron como “eventos de engelamiento” y los segundos “eventos de no engelamiento”.

En la Figura 2.1 se puede observar la visualización inicial de un evento de engelamiento en el sistema Insight, donde las barras blancas muestran la activación de algún sistema de deshielo y las líneas verdes representan la altitud de la aeronave.

El segundo conjunto de datos son las aeronotificaciones o reportes en vuelo, cuyos emisores son el personal en vuelo y los receptores son personal en tierra de las entidades aeronáuticas. En las bases de datos de la FAC no se encontraron reportes registrados, mientras que en la UAEAC fueron hallados un total de 15 reportes de engelamiento, evidencia de que los mecanismos para reportes aéreos no están funcionando adecuadamente, ya sea por falta de reportes de los pilotos o por fallas en el proceso de ingreso de los datos del personal en tierra.

Las aeronotificaciones en Colombia son generadas mediante reportes codificados llamados AIREP, con base a estos se genera una alerta de tiempo significativo codificado para la aviación denominados reportes SIGMET.

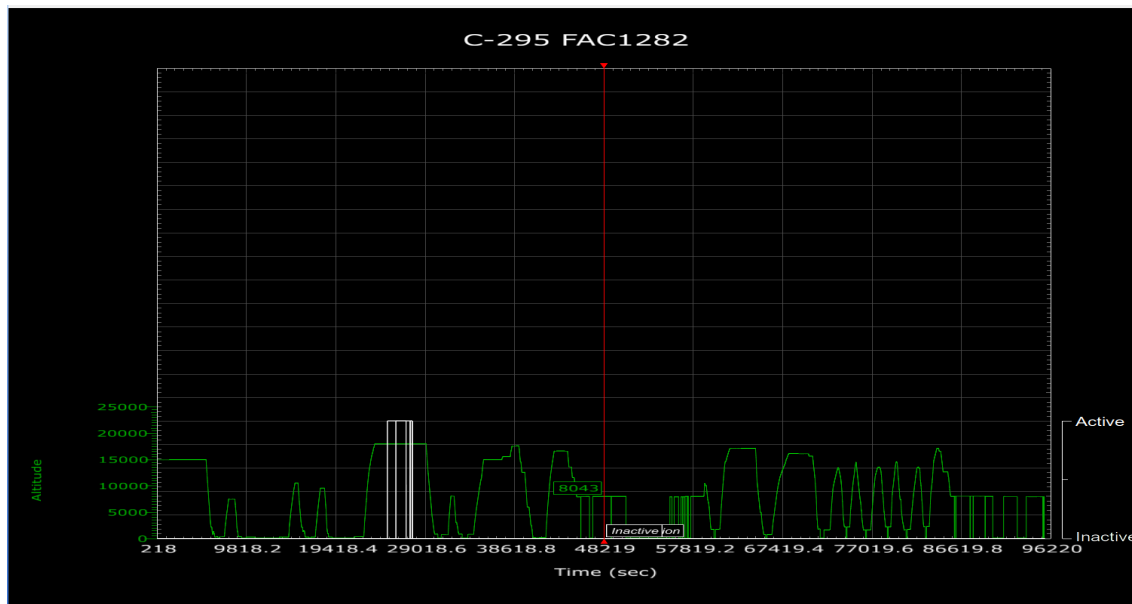


Figura 2.1: Ejemplo de evento extraído de registros de FDR

Las aeronotificaciones AIREP se definen como un reporte proporcionado por una aeronave en vuelo, de conformidad con los requisitos de notificación de posición e información operacional o meteorológica (OACI, 2007). Este reporte contiene la identificación de la aeronave, posición, hora, nivel de vuelo o altitud, presencia e intensidad del fenómeno y datos adicionales como la temperatura del aire exterior (OAT). Sin embargo, datos como la temperatura y la intensidad del fenómeno no siempre son reportados por los pilotos.

Por su parte, los SIGMET son reportes expedidos por una oficina de vigilancia meteorológica, relativa a la existencia de fenómenos atmosféricos en ruta, que pueden afectar la seguridad de las operaciones aéreas (OACI, 2007). En Colombia son expedidos por los centros de vigilancia meteorológica de la UAEAC o de la FAC. No son propiamente reportes AIREP, pero son informes que se realizan, en el caso de fenómenos como turbulencia y engelamiento, en base a los AIREP, para alertar a las aeronaves en vuelo o próximos a dirigirse a determinada área.

La tercera y última fuente de información, fueron los informes sobre accidentes o incidentes aéreos que tuvieron como causa la formación de hielo en la aeronave, registrados por las entidades de seguridad aeronáutica como la FAC y la UAEAC. Solo se encontraron 8 eventos en las bases de datos de la FAC. La base de datos para todos los eventos de aeronaves utilizados en este estudio se encuentra en la Tabla D.1 en el Anexo D.

2.1.2. Metodología

En el capítulo anterior se generaron patrones espaciales y temporales de POTENG en el territorio colombiano mediante algoritmos de detección. Con el fin de observar algunas relaciones con los eventos reales de aeronaves, se genera un análisis de estos patrones con el total de los eventos encontrados.

Adicionalmente, se determina la base de datos final de eventos provenientes de los reportes AIREP-SIGMET, eventos de seguridad aeronáuticos y datos extraídos del FDR. Así mismo, se utilizaron los eventos de no engelamiento, para realizar análisis de frecuencias relativas de los eventos encontrados.

Para determinar una distribución espacial de las áreas de mayor ocurrencia, los eventos fueron ilustrados mediante un sistema de información geográfica (SIG). Los datos se analizaron con estadísticos estándar, como los descritos en Wilks (2006), para determinar la intensidad predominante del engelamiento, horas y épocas del año con mayor frecuencia de eventos registrados y un análisis de las variables medidas o reportadas por las aeronaves, como la altura y la temperatura.

Los datos de FDR registran la temperatura del aire total (TAT), esta es la temperatura máxima que el aire puede lograr mediante la conversión del 100 % de la energía cinética en calor de la muestra de aire, es decir, la temperatura afectada por la velocidad del aire en el sensor. Esta debe ser transformada a la temperatura del aire estático (SAT), que se define como la temperatura del aire ambiente no perturbado a través del cual la aeronave está volando. SAT fue estimada mediante la Ecuación 2.1 de acuerdo a la relación indicada en (Smit *et al.*, 1998).

$$SAT = TAT - \frac{v^2}{2c_p} \quad (2.1)$$

Donde v es la velocidad del viento en relación a la aeronave, indicada en registro de FDR y c_p es el calor específico del aire seco ($1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

Además, se realizó un análisis de la capacidad de los algoritmos SLWS y CIP-sonde-A, para detectar POTENG a partir de todos los eventos disponibles de FDR, SIGMET, AIREP e informes de seguridad, tanto de engelamiento como de no engelamiento. Para esto, se utilizaron los datos de reanálisis de ERA-5, con el fin de conformar los perfiles en las coordenadas y tiempos más cercanos a cada evento.

Se calculó el POTENG para el total del perfil sin discriminar los niveles de presión, posteriormente se realizó el mismo ejercicio discriminando el POTENG por niveles de presión, descartando detección positiva si no se visualiza el nivel exacto del evento. Los resultados se

analizaron mediante tablas de contingencia se 2 x 2 de acuerdo a Wilks (2006), esta metodología evalúa cuatro posibles situaciones:

- a) Aciertos: eventos de engelamiento detectados por el algoritmo evaluado.
- b) Falsas alarmas: eventos de no engelamiento detectados erróneamente por el algoritmo evaluado.
- c) Fallas: eventos de engelamiento no detectados por el algoritmo evaluado.
- d) Negativo correcto: eventos de no engelamiento detectados correctamente por el algoritmo evaluado.

la Tabla 2.2 muestra la estructura de la tabla de contingencia para este análisis, en el cual las sumas en los bordes se llaman “sumas marginales” y “n” es el tamaño total de la muestra de eventos.

Tabla 2.2: Estructura de una tabla de contingencia (Wilks, 2006).

		Eventos aeronaves		
		Evento Engelamiento	Evento no engelamiento	
Detección algoritmo	POTENG	a	b	a+b
	No POTENG	c	d	c+d
		a+c	b+d	n=a+b+c+d

En base a los resultados de las tablas, se calcularon las siguientes medidas de precisión de acuerdo a Wilks (2006).

Proporción Correcta (PC): Es la razón de acierto correcto, acredita los resultados de aciertos, fallas, falsas alarmas y negativos correctos por igual y está dada por la Ecuación 2.2. La peor proporción posible correcta es 0 y la mejor proporción correcta es 1. Si se multiplica por el 100 % se conoce como el porcentaje correcto o el porcentaje de pronósticos correctos.

$$PC = \frac{a + d}{n} \quad (2.2)$$

Sesgo o Bias(B): El sesgo es la relación entre el número de detecciones positivas y el número de observaciones positivas, se calcula mediante la Ecuación 2.3. Las detecciones imparciales

muestran $B = 1$, lo que indica que el evento fue detectado un número de veces igual al que se observó. $B > 1$ indica que el evento se detectó con mayor frecuencia que lo observado, lo que se denomina sobredetección. Por el contrario, $B < 1$ indica que el evento se detectó con menor frecuencia de lo observada o que no se detectó.

$$B = \frac{a + b}{a + c} \quad (2.3)$$

Relación de falsas alarmas (FAR): Es la fracción de detecciones positivas que resultan ser incorrectas y está dado por la Ecuación 2.4. Los valores de FAR van de 0 a 1, donde FAR = 0 es el resultado más favorable, mientras que FAR = 1 indica que todas sus detecciones positivas fueron falsas alarmas.

$$FAR = \frac{b}{a + b} \quad (2.4)$$

Tasa de aciertos o probabilidad de detección (H): Es la proporción de detecciones correctas a la cantidad de veces que ocurrieron estos eventos de engelamiento, para este caso, se calcula mediante la Ecuación 2.5. Los valores de H están en el rango de 0 a 1, donde H = 0 es el resultado menos favorable, ya que no se habría detectado ningún caso de engelamiento, mientras que H = 1 es el mejor resultado, dado que habría detectado todos los eventos de engelamiento.

$$H = \frac{a}{a + c} \quad (2.5)$$

Tasa de falsas alarmas o probabilidad de falsas alarmas (F): Es la proporción de falsas alarmas con respecto al número total de no ocurrencias del evento, específicamente con respecto a todos los eventos de no engelamiento, se calcula con la Ecuación 2.6. Los valores de F van de 0 a 1, donde F = 0 es el resultado más favorable, al no haberse generado ninguna falsa alarma en los eventos de no engelamiento, mientras que F = 1 significaría todo lo contrario, mostrando el resultado menos favorable.

$$F = \frac{b}{b + d} \quad (2.6)$$

Índice crítico de éxito (CSI): Es el número de pronósticos correctos de engelamiento positivo, dividido entre el número total de ocasiones en que se pronosticó y/u observó ese evento. El peor puntaje de amenaza posible es cero, y el mejor puntaje de amenaza posible es uno.

Se puede entender como una proporción correcta para la cantidad que se pronostica, después de eliminar la correcta sin pronósticos de consideración. Es útil cuando el evento a pronosticar ocurre con mucha menos frecuencia que la no ocurrencia, es dado por la ecuación por la Ecuación 2.7.

$$CSI = \frac{a}{a + b + c} \quad (2.7)$$

Asimismo se calcularon los siguientes puntajes de habilidad de acuerdo a Wilks (2006):

Puntuación de habilidad de Heidke (HSS): Es un puntaje de habilidad basado en PC como medida de precisión básica, los pronósticos perfectos reciben $HSS = 1$, los pronósticos equivalentes a los pronósticos de referencia reciben puntajes cero y los pronósticos peores que los pronósticos de referencia reciben puntajes negativos (Wilks, 2006). HSS se calcula de acuerdo a la Ecuación 2.8.

$$HSS = \frac{2(ad - bc)}{(a + c)(c + d) + (a + b)(b + d)} \quad (2.8)$$

Puntaje de habilidad de Peirce (PSS): Puede entenderse como la diferencia entre dos probabilidades condicionales, en este caso F y H. Los pronósticos perfectos reciben una puntuación de uno, los pronósticos aleatorios reciben una puntuación de cero, es decir cuando $H = F$, finalmente los pronósticos inferiores a los aleatorios reciben puntajes negativos (Wilks, 2006). PSS se calcula de acuerdo a la Ecuación 2.9

$$PSS = \frac{ad - bc}{(a + c)(b + d)} \quad (2.9)$$

Puntuación de habilidad de Clayton (CSS): Indica habilidad positiva en la medida en que el evento ocurre con más frecuencia cuando se pronostica que cuando no se pronostica. Los pronósticos perfectos exhiben $CSS = 1$, mientras que, los pronósticos aleatorios producen $CSS = 0$.

$$CSS = \frac{ad - bc}{(a + b)(c + d)} \quad (2.10)$$

Puntaje de habilidad de Gilbert (GSS): Este puntaje usa CSI como la medida de precisión básica y se calcula mediante la Ecuación 2.11 de acuerdo a (Wilks, 2006).

$$GSS = \frac{a - \left(\frac{(a+b)(a+c)}{n} \right)}{a - \left(\frac{(a+b)(a+c)}{n} \right) + b + c} \quad (2.11)$$

Puntuación de habilidad de Yule's (Q): Este puntaje de habilidad se calcula mediante la Ecuación 2.12. Los pronósticos perfectos producen $Q = 1$, mientras que los pronósticos aleatorios deneran $Q = 0$ Wilks (2006).

$$Q = \frac{ad - bc}{ad + bc} \quad (2.12)$$

2.2. Discusión y Resultados

2.2.1. Análisis de eventos de engelamiento de aeronaves en Colombia

Antes de analizar los resultados de este capítulo, debemos tener en cuenta que los datos provenientes de aeronaves, se usan bajo una condición particular, ya que los eventos reportados tienden a ser más frecuentes en espacios y horas donde el tráfico aéreo es muy alto, por ejemplo, tienden a ser más frecuentes cerca a aeródromos y a las aerovías establecidas para las rutas.

En Colombia, los pilotos no reportan frecuentemente las condiciones meteorológicas adversas presentadas como el engelamiento, ni se reportan condiciones como la ausencia de engelamiento en condiciones favorables para que éste se produzca. Por otra parte, se debe tener en cuenta que normalmente los pilotos evitan áreas con presencia de convección profunda, por lo tanto, los eventos de engelamiento reportados desde aeronaves son esporádicos y no sistemáticos (Belo-Pereira, 2015). En el caso de los sistemas FDR, sólo se tiene una pequeña muestra del total de vuelos que se realizan en la institución, ya que estos datos no se extraen para todos los vuelos y se borran después de estar almacenados 24 horas. Sin embargo, los eventos de engelamiento reportados y de los cuales se mantienen registros, proporcionan información útil y se pueden utilizar para verificar los pronósticos y algoritmos de detección de engelamiento.

Se analizaron la totalidad de los eventos FDR, SIGMET, AIREP y eventos de seguridad, más los datos de “no engelamiento” los cuales fueron extraídos de los sistemas FDR. Los datos de no engelamiento fueron aquellos en los que en ningún momento del vuelo hubo la necesidad de usar sistemas de deshielo, ni se encendió la alerta automática por hielo.

En la Figura 2.2, se observa la distribución geográfica de los eventos de engelamiento, la mayoría de eventos se encuentra en áreas de cordillera. Solo el 15.85 % de los eventos se encuentra en zonas llanas lejanas de zonas montañosas, esto se debe a que en zonas de llanuras es más fácil para los pilotos esquivar sistemas nubosos con amenaza de engelamiento. En zonas de cordillera, el rango de maniobra es menor y de acuerdo a los resultados del Capítulo 1, en estas zonas la frecuencia de POTENG es mayor. Se debe tener en cuenta que la distribución geográfica de los eventos de engelamiento también se ve afectada por que la ubicación de los aeródromos y aerovías, hacia y sobre los cuales se vuela con más frecuencia, están concentrados sobre estas áreas. Sin embargo, resulta interesante analizar algunos casos en zonas poco frecuentes de POTENG para evaluar las posibles causas de estos eventos.

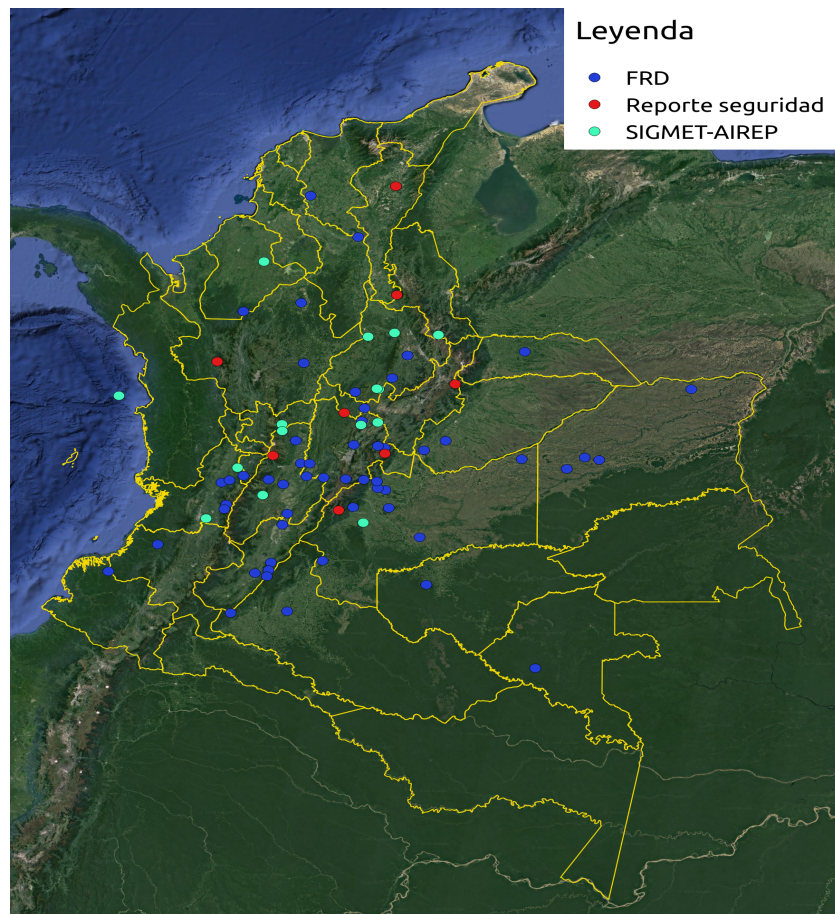


Figura 2.2: Mapa general eventos de engelamiento. La ubicación de cada punto en este mapa corresponde a las coordenadas en las cuales se detectó engelamiento por primera vez a partir de uso de sistemas de deshielo o el sensor de hielo, o la coordenada reportada por el piloto o los informes de seguridad.

En la Figura 2.3 se puede ver la distribución de eventos de no engelamiento. Para estos vuelos se muestra en el mapa la posición en que la aeronave se encontraba en la mayor altitud de vuelo; se debe recordar que todos los eventos de no engelamiento son tomados del sistema FDR, ya que no existen reportes SIGMET o AIREP que reporten este tipo de eventos. Allí se evidencia que los eventos de no engelamiento también se concentran en su gran mayoría en la región andina.



Figura 2.3: Mapa general eventos de no engelamiento según registro FDR. La ubicación de cada punto en este mapa, corresponde a las coordenadas en las cuales se registró la máxima altitud de vuelo de aeronaves C-295, a bordo de las cuales no se registraron alertas de hielo ni se usaron sistemas de deshielo.

En la Figura 2.4, se observa la distribución por año, mes y hora del día, del total de eventos, tanto de engelamiento como de no engelamiento. Se contó solo con datos entre 2014 y 2018, de los que 2014 y 2017 fueron años con muy pocos registros.

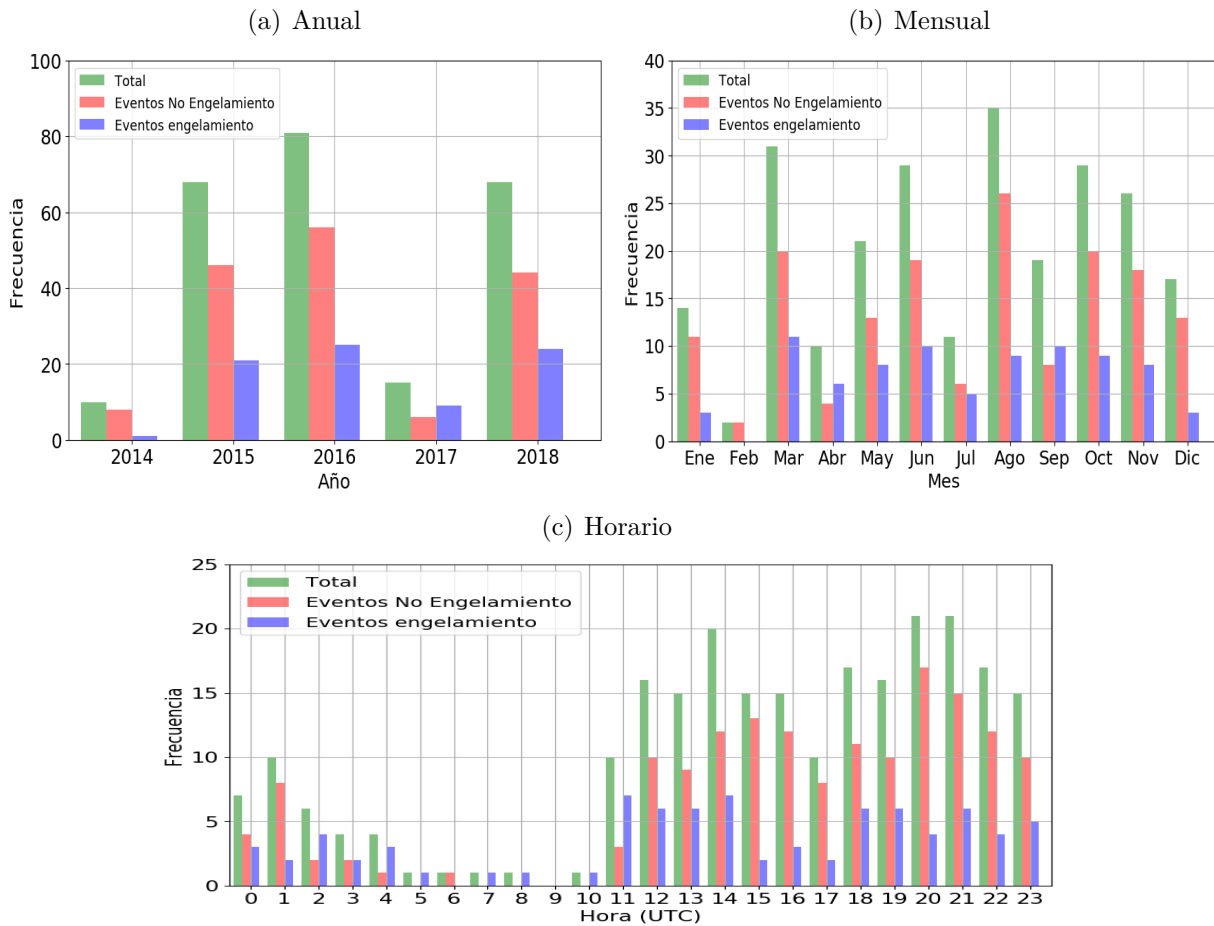


Figura 2.4: Diagramas de barras de número total absoluto de registros, número absoluto de registros con engelamiento y sin engelamiento, (a) por año, (b) por mes del año y (c) por hora del día.

En la Figura 2.5 se observan las frecuencias relativas de los eventos de engelamiento. A escala mensual, se evidencia que abril, julio y septiembre son los meses donde la frecuencia relativa ha sido mayor. Esto quiere decir que existe una cantidad considerable de vuelos con engelamiento respecto al total de eventos en cada uno de esos meses. Por el contrario, diciembre, enero y febrero, que son los meses de menor frecuencia de POTENG en la climatología de gran parte del país, muestran las frecuencias relativas más bajas de eventos. Aunque, como se mencionó anteriormente, esta es una muestra pequeña de eventos, que exhibe algunos patrones que pueden llegar a ser de relevancia con respecto a los resultados de la climatología, ya que como se puede ver en la Figuras 2.2 y 2.3, más del 90 % de los eventos se encuentra en el centro y norte del país.

En la Figura 2.5 (c) se observan las frecuencias relativas horarias, donde los mayores valores se encuentran en horas de media noche y madrugada, entre las 2 y 5 UTC e inclusive entre las 10 y 11 UTC. Esto también corresponde a los resultados horarios mostrados en el capítulo 1, donde las frecuencias más altas de POTENG se observaron en las horas de la noche y madrugada. Las horas con menor frecuencia fueron las horas 6 a 10 UTC. Sin embargo, esto se debe a la poca información de vuelos a esas horas, ya que es una hora de bajo tráfico aéreo para el caso de aeronaves C-295, por lo cual este no fue considerado como un patrón representativo.

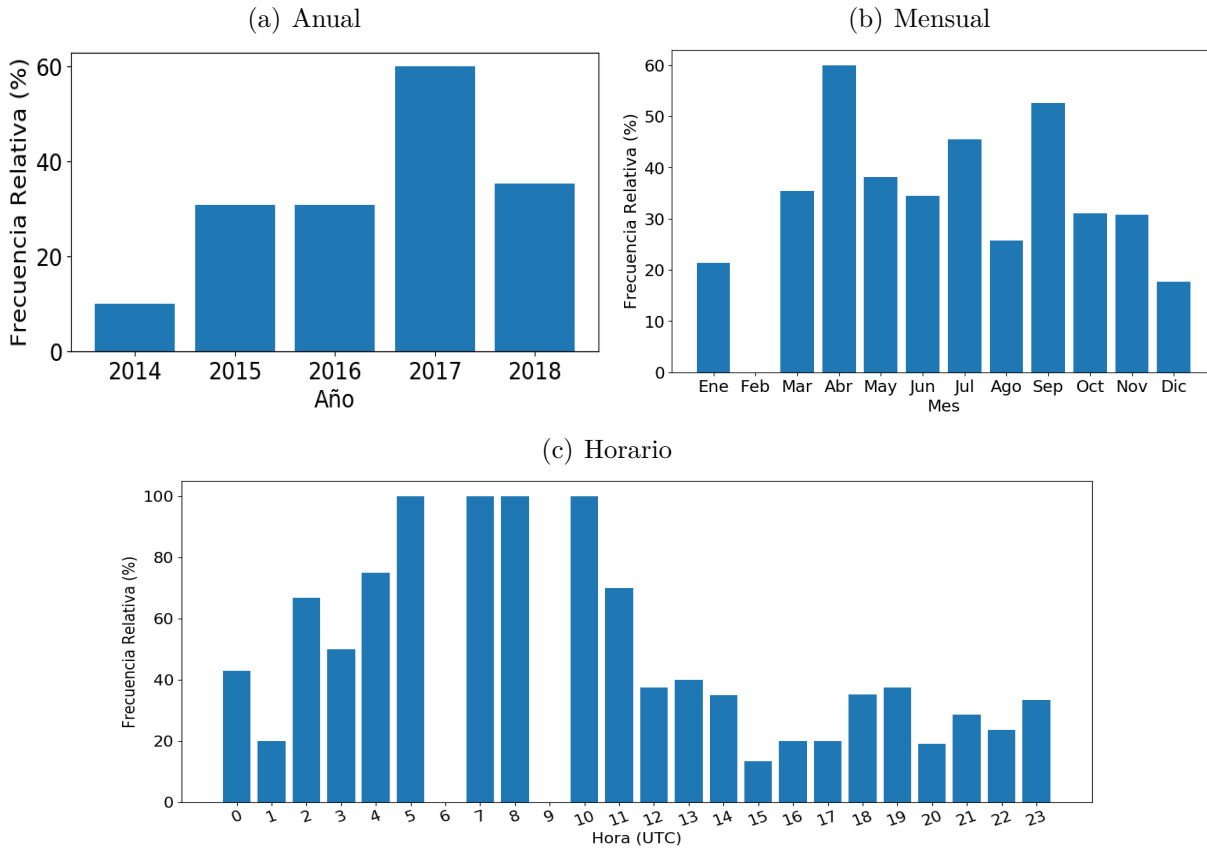


Figura 2.5: Diagramas de barras de número relativo de registros con engelamiento, (a) por año, (b) por mes del año y (c) por hora del día.

Los sistemas de los aviones C-295 registran la temperatura TAT en cada plano de la aeronave, en la Figura 2.6 se observa la frecuencia de temperaturas registradas para cada plano (TAT1 y TAT2) en eventos de engelamiento, que varían entre 1 y 12° C. Se realiza la estimación de la temperatura SAT de acuerdo al procedimiento mencionado en la sección anterior.

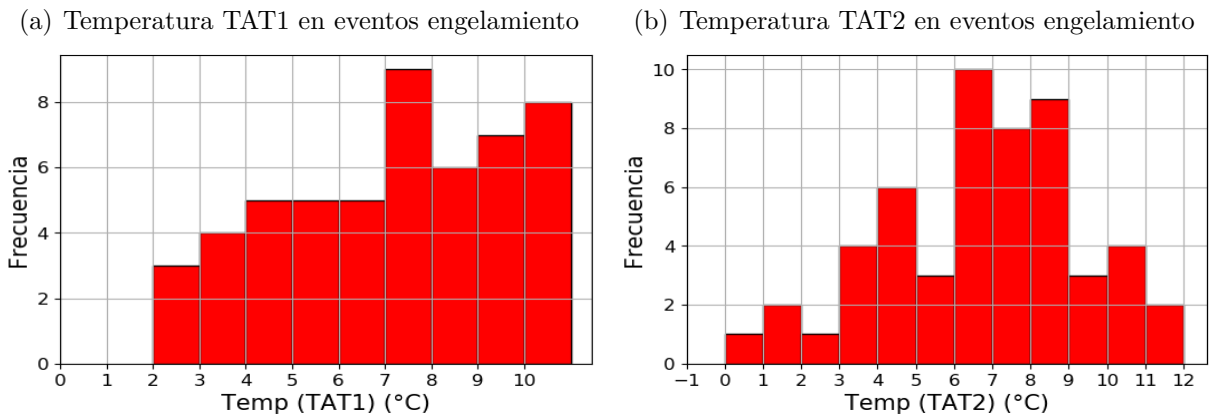


Figura 2.6: Histograma de temperaturas TAT en eventos de engelamiento de acuerdo a FDR

Las frecuencias de la temperatura SAT se observan en la Figura 2.7. Como se esperaba las temperaturas son más bajas que las temperaturas TAT, en el rango entre -7 a 6°C. También, se encuentra que los valores son cercanos a cero, siendo el resultado es una estimación en la que se reduce el efecto del viento en los sensores de temperatura.

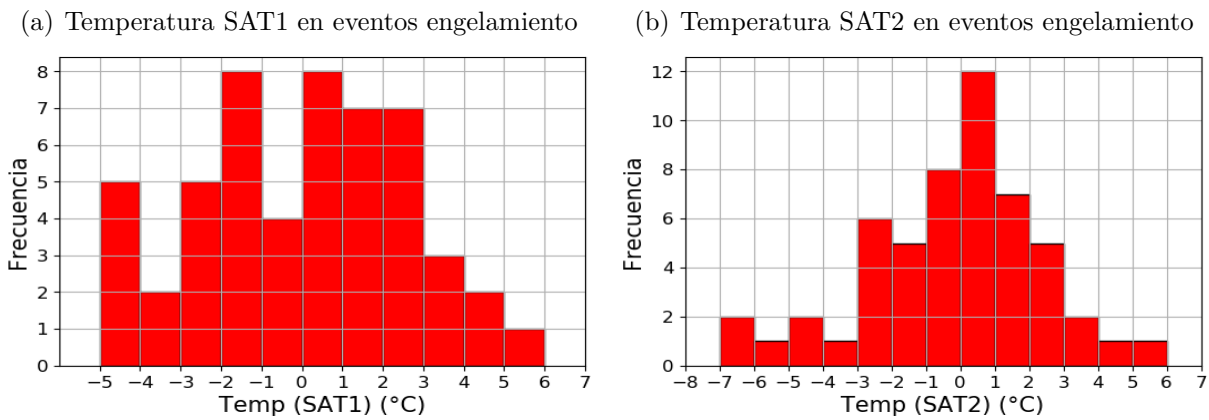


Figura 2.7: Histograma de temperaturas SAT en eventos de engelamiento de acuerdo a FDR

En la Figura 2.8, se evidencia la frecuencia de altitudes en las que se generó engelamiento. Las altitudes de mayor ocurrencia están entre a los 14000 y los 25000 ft, exceptuando solo 2 eventos fuera de ese rango, identificados como vuelos comerciales en los reportes SIGMET, los cuales probablemente fueron generados por convección profunda, debido a que en esas altitudes la ocurrencia de eventos de engelamiento no es frecuente de acuerdo a la teoría. Lo anterior demuestra que debido a que la mayoría de los eventos son registrados en vuelos

realizados por la FAC, se puede generar influencia en los resultados, ya que estos aviones no vuelan frecuentemente en algunas altitudes.

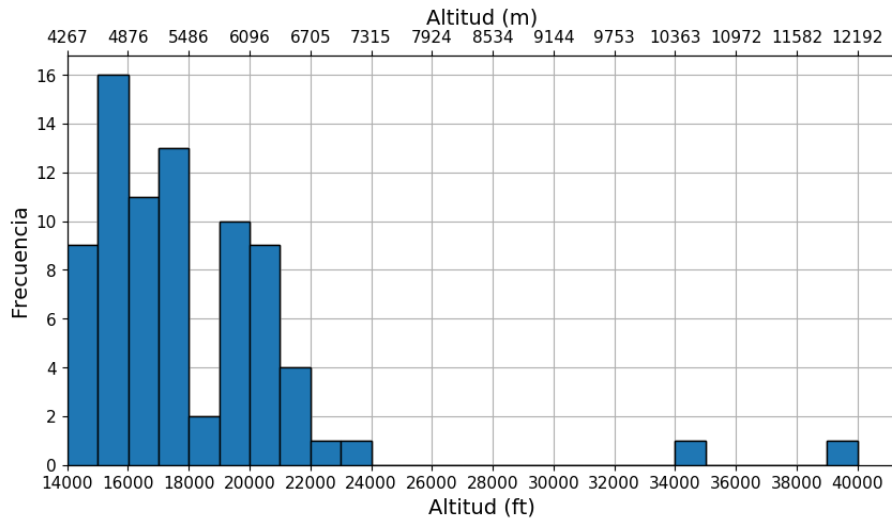


Figura 2.8: Frecuencia altitud eventos de engelamiento FDR.

2.2.2. Potencial de engelamiento en eventos de aeronaves mediante algoritmos SLWS y CIP-sonde-A

En esta sección se observan los resultados de la comparación de los algoritmos CIP-sonde-A y SLWS aplicados a los datos de ERA-5 para los días y horas más cercanas a la ocurrencia de todos los eventos de engelamiento y no engelamiento. Se utiliza la metodología de tablas de contingencia descrita en la sección anterior. Se generan dos tablas por algoritmo, la primera para analizar la detección de engelamiento para un evento, sin tener en cuenta cual nivel de presión particular es donde se produce el engelamiento, es decir si en cualquier parte del perfil POTENG es mayor a 0, esto significa que el algoritmo detectó engelamiento positivo. En la segunda tabla, POTENG tiene que ser mayor a 0 en el nivel aproximado al que se encontró la aeronave cuando hizo uso de sus sistemas de deshielo, detectando o reportando engelamiento, de lo contrario el evento no corresponderá a una detección positiva.

No se utilizan los datos de radiosondeo y METAR para desarrollar evaluaciones con las tablas de contingencia, debido a que no existen suficientes eventos que coincidan en tiempo y distancia con el lanzamiento del radiosondeo, por lo anterior, solo se validaron los eventos mediante datos de ERA-5.

En las Tablas 2.3 y 2.4 se registran los resultados de toda la columna para los algoritmos

CIP-sonde-A y SLWS, respectivamente. PC para CIP-sonde-A tiene un valor de 0.54 y de 0.41 para SLWS, indicando que CIP-sonde-A acierta con una proporción más alta tanto los eventos de engelamiento como los eventos de no engelamiento, con respecto al total de los datos, confirmado por el índice CSI que indica un valor de 0.38 para CIP-sonde-A y de 0.35 para SLWS. H tiene un valor de 0.87 para CIP-sonde-A mientras que para SLWS tiene un valor de 0.96, implicando que los dos algoritmos aciertan en muy buenas proporciones con respecto a los eventos de engelamiento siendo mejor en este caso SLWS.

Tabla 2.3: Tabla de contingencia para detección de eventos de engelamiento de aeronaves en toda la columna según el algoritmo CIP-sonde-A aplicado a datos de ERA-5.

		Eventos aeronaves			Resultados	
		Evento Engelamiento	Evento no engelamiento		Indice	Valor
Detección CIP-sonde-A	POTENG	a=68	b=99	a+b=167	PC	0.54
	No POTENG	c=10	d=61	c+d=71	H	0.87
		a+c=78	b+d=160	n=238	FAR	0.59
					F	0.62
					BIAS	2.14
					CSI	0.38

Tabla 2.4: Tabla de contingencia para detección de eventos de engelamiento de aeronaves en toda la columna según el algoritmo SLWS aplicado a datos de ERA-5.

		Eventos aeronaves			Resultados	
		Evento Engelamiento	Evento no engelamiento		Indice	Valor
Deteccion SLWS	POTENG	a=75	b=136	a+b=211	PC	0.41
	No POTENG	c=3	d=24	c+d=27	H	0.96
		a+c=78	b+d=160	n=238	FAR	0.64
					F	0.85
					BIAS	2.7
					CSI	0.35

FAR registra un valor de 0.59 para CIP-sonde-A y de 0.64 para SLWS, lo que indica que SLWS presenta mayores desaciertos en la detección positiva de POTENG, es decir, SLWS detecta mayor cantidad de falsas alarmas que CIP-sonde-A. Así mismo el valor de F para CIP-sonde-A es de 0.62 y para SLWS es de 0.85, señalando que SLWS también detecta una tasa de falsas alarmas mayor que CIP-sonde-A, esto quiere decir que detecta más falsas alarmas que negativos correctos. Aunque CIP-sonde-A genera menores falsas alarmas los dos algoritmos

sobrepasan el valor de 0.50, lo que indica una sobredetección significativa de POTENG para ambos algoritmos. Finalmente, B indica un valor de 2.14 para CIP-sonde-A y 2.7 para SLWS, lo que confirma que los dos algoritmos sobredetectan, sin embargo, CIP-sonde-A lo hace con menor proporción que SLWS.

En la Figura 2.9, se evidencia que todos los puntajes de habilidad aplicados a los resultados de CIP-sonde-A, a excepción del índice Q; superan a los puntajes registrados por SLWS. Todo lo anterior, nos permite concluir que sin discriminar la detección de eventos de engelamiento por niveles de altitud con los datos de ERA-5, CIP-sonde-A es más eficiente.

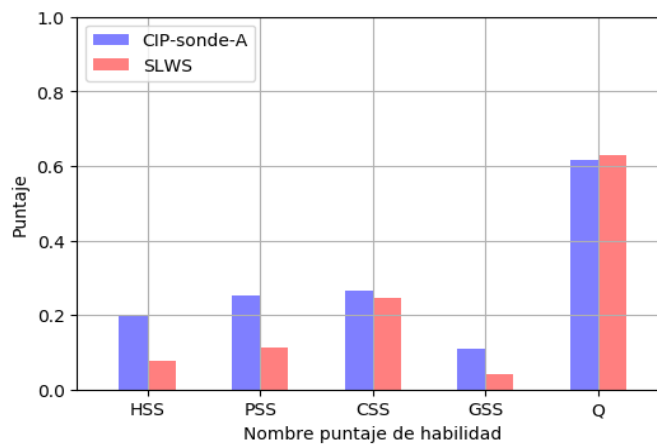


Figura 2.9: Puntajes de habilidad para detección de eventos de engelamiento en aeronaves, para los algoritmos CIP-sonde-A y SLWS, sin discriminar por nivel de altitud específico.

En las Tablas 2.5 y 2.6 se pueden encontrar los resultados por nivel específico para los algoritmos CIP-sonde-A y SLWS. PC para CIP-sonde-A tiene un valor de 0.60 y SLWS un valor de 0.61, lo que indica una proporción de acierto por el algoritmo SLWS, tanto de los eventos de engelamiento como los eventos de no engelamiento con respecto al total de los datos, sin embargo, el índice CSI indica un valor de 0.36 para CIP-sonde-A mayor al valor de 0.26 para SLWS. H tiene un valor de 0.70 para CIP-sonde-A mientras que SLWS tiene un valor de 0.40, lo que significa que SLWS acierta una proporción muy baja con respecto a los eventos de engelamiento, contrario al comportamiento de CIP-sonde-A.

Tabla 2.5: Tabla de contingencia para eventos de engelamiento de aeronaves en los distintos niveles de la columna según el algoritmo CIP-sonde-A aplicado a datos de ERA-5.

		Eventos aeronaves			Resultados	
		Evento Engelamiento	Evento no engelamiento		Indice	Valor
Deteccion CIP-sonde-A	POTENG	a=55	b=72	a+b=127	PC	0.60
	No POTENG	c=23	d=88	c+d=111	H	0.70
		a+c=78	b+d=160	n=238	FAR	0.56
					F	0.45
					BIAS	1.6
					CSI	0.36

Tabla 2.6: Tabla de contingencia para eventos de engelamiento de aeronaves en los distintos niveles de la columna según el algoritmo SLWS aplicado a datos de ERA-5.

		Eventos aeronaves			Resultados	
		Evento Engelamiento	Evento no engelamiento		Indice	Valor
Deteccion SLWS	POTENG	a=32	b=47	a+b=79	PC	0.61
	No POTENG	c=46	d=113	c+d=159	H	0.40
		a+c=78	b+d=160	n=238	FAR	0.59
					F	0.29
					BIAS	1.01
					CSI	0.26

FAR registra un valor de 0.56 para CIP-sonde-A y de 0.59 para SLWS, implicando que SLWS presenta mayores desaciertos en la detección positiva de POTENG, es decir, detecta mayor cantidad de falsas alarmas que CIP-sonde-A. Por otra parte, el valor de F para CIP-sonde-A es de 0.45 y de 0.29 para SLWS, señalando que CIP-sonde-A detecta una tasa de falsas alarmas mayor que SLWS, esto quiere decir que detecta más falsas alarmas que negativos correctos. CIP-sonde-A genera una proporción mayor de falsas alarmas con respecto a los eventos de no engelamiento que SLWS, sin embargo, no es tan representativo ya que los dos algoritmos lo hacen por debajo de 0.50. Finalmente, B indica un valor de 1.6 para CIP-sonde-A y de 1.01 para SLWS. Lo anterior indica una reducción en la sobredetección considerable con respecto al análisis para toda la columna por parte de los dos algoritmos.

Aunque el valor de B es mayor para CIP-sonde-A que el de SLWS en los niveles específicos, se debe considerar que SLWS solo detecta un valor del 0.40 de los eventos de engelamiento lo cual es muy bajo; además, teniendo en cuenta los resultados para toda la columna, en la que

a pesar de obtenerse un valor de H de 0.96 se obtuvo un valor de F de 0.85, se observa un mejor comportamiento en general para el algoritmo CIP-sonde-A.

Con respecto a los resultados de los puntajes de habilidad de la figura 2.10, se observa que se mantienen los puntajes más altos para el algoritmo CIP-sonde-A, confirmando que tiene mayor capacidad de detección que SLWS, con los datos de reanálisis de ERA-5.

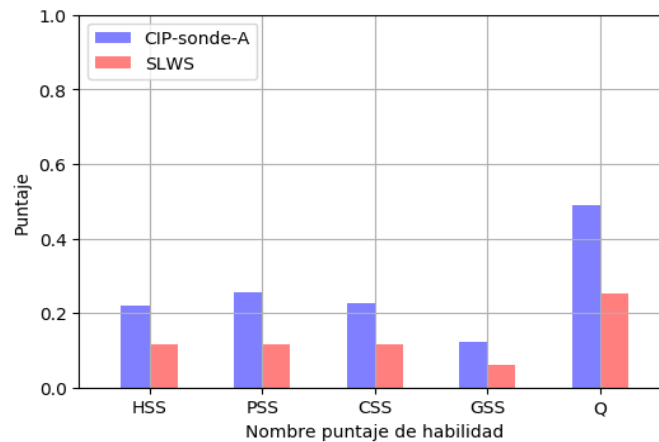


Figura 2.10: Puntajes de habilidad para detección de eventos de engelamiento en aeronaves, para los algoritmos CIP-sonde-A y SLWS, discriminando por nivel de altitud específico.

Para este análisis se debe contemplar, que los eventos de no engelamiento tienen una incertidumbre considerable, ya que pueden existir casos en que las aeronaves se encuentren cerca o en ambientes con mucho potencial de engelamiento pero no se activen sistemas de des-hielo, pues no necesariamente la aeronave se encuentra dentro de una nube, sin embargo, los algoritmos si pueden detectar estas condiciones.

2.3. Conclusiones y Recomendaciones

Aunque la cantidad de datos observados no fue la adecuada, las frecuencias relativas mostraron patrones importantes como frecuencias bajas en los meses de diciembre y enero, por el contrario, valores altos en abril, julio y septiembre. Así mismo, se encontró que las horas más probables para encontrar engelamiento son las horas de la noche y de la madrugada, como se observa en la climatología desarrollada en el Capítulo 1.

Las altitudes más frecuentes para los casos existentes, están entre 14000 y 25000 ft, correspondiente al rango entre 4267 a 7620 m, sin embargo, la altura de mayor riesgo está entre 15000 y 20000 ft, correspondiente a el rango de 4572 a 6096 m.

Los datos de temperatura registrada por las aeronaves son cercanos a 0°C; no obstante, se debe tener en cuenta la afectación de la velocidad del aire a los sensores, ya que no se dispone de la temperatura ambiente real.

Los algoritmos CIP-sonde-A y SLWS detectan más del 80 % de los eventos de engelamiento de las aeronaves sin tener en cuenta los niveles de altitud, como también logran observar entre el 60 y el 85 % de los eventos de no engelamiento. En este caso los mejores resultados de detección fueron para CIP-sonde-A ya que detectó un 87 % de los eventos de engelamiento y detectó menos falsas alarmas que SLWS, adicionalmente, obtuvo mejores resultados en los puntajes de habilidad.

Si se discrimina por niveles, SLWS tuvo un mejor resultado en el índice BIAS, pero sólo detectó un 40 % de los eventos de engelamiento, mientras que CIP-sonde-A detectó el 70 % y teniendo en cuenta la incertidumbre que representan los eventos de no engelamiento, se considera que CIP-sonde-A detecta de mejor manera los eventos de engelamiento cuando se aplica a datos de ERA-5, además de también obtener mejores puntajes en los puntajes de habilidad utilizados.

Se deben encontrar otras formas o datos para evaluar los algoritmos, ya que los eventos de no engelamiento presentan una gran incertidumbre, debido a que se pueden encontrar en condiciones potenciales para engelamiento o cerca a estos y no encender sus sistemas de deshielo, ya sea por criterio del piloto o porque no están necesariamente dentro de los sistemas nubosos que si observa el algoritmo. Esas nuevas formas podrían incluir campañas de investigación con aeronaves y radiosondas.

Se deben mejorar los procesos y reglamentaciones para la emisión y registro de reportes AIREP en las instituciones de autoridad aeronáutica, ya que los datos encontrados dejan grandes incertidumbres, pues hay cantidades muy pequeñas comparadas al total de vuelos que en realidad se realizan a diario. Esto puede traer avances importantes en el estudio de

englamiento, turbulencia, tormentas entre otros fenómenos de interés en el área aeronáutica.

Se recomienda registrar continuamente en bases de datos la información suministrada por aeronaves de FDR u otros sistemas, ya que pueden aportar para que se produzcan avances importantes en la investigación de fenómenos adversos para la aviación, así como alimentar modelos de monitoreo y pronóstico meteorológico.

Capítulo 3

Casos de Estudio

3.1. Datos y Metodología

3.1.1. Datos

Para el análisis de casos de estudio se utilizó la siguiente información:

- Cartas de superficie para análisis sinópticos, obtenidas de bases de datos del archivo de mapas meteorológicos de NWS (2018).
- Reportes METAR, a partir de las bases de datos de SIMFAC (2018), IDEAM (2019b) y OGIMET (2018).
- Los radiosondeos más cercanos a cada evento fueron consultados en las bases de datos de la universidad de Wyoming en UW (2018).
- Datos del sistema Linet Nowcast Lightning Detected en Keraunos (2018), para obtener el historial de rayos en el momento de los eventos. Los sistemas LINET comprenden sensores de rayos mediante antenas de campo en tiempo real y registran su historial. En las gráficas que se generaron con LINET se observan áreas negras circulares generadas por el usuario titular que corresponden a zonas de influencia para algunos aeródromos, estas deben ser ignoradas pues no son representativas para este estudio en ningún sentido.
- Imágenes satelitales en los canales Visual, Vapor de agua e Infrarrojo, solicitadas en NOAA (2018).
- Datos de la reanálisis ERA-5 extraídos de ECMWF (2018), utilizados para análisis de vientos por nivel y para la aplicación de los algoritmos SLWS y CIP-sonde-A al punto de grilla más cercano a la coordenada de cada evento. Para cada algoritmo se usaron las variables descritas en el capítulo 1 en la Tabla 1.3.

3.1.2. Metodología

3.1.2.1. Determinación de los casos de estudio

Con el fin de analizar diferentes condiciones meteorológicas específicas de algunos casos de engelamiento, se escogieron 4 eventos, de acuerdo a los resultados de la climatología y el análisis del total de eventos obtenidos en los capítulos anteriores, bajo los siguientes criterios:

- Ubicación en áreas donde no es frecuente que se produzca POTENG.
- Ubicación en áreas donde es muy frecuente que se produzca POTENG.
- Relevancia del evento para la seguridad operacional.
- Existencia de por lo menos un registro de cada reporte: SIGMET, FDR y eventos de seguridad.
- Temporalidad en meses u horas con alta o baja frecuencia de POTENG

También se seleccionaron 4 casos de no engelamiento cercanos a la ubicación y época del año de los 4 eventos de engelamiento analizados, con el fin de observar las diferencias entre las condiciones de los dos tipos de eventos. La ubicación de los casos de estudio seleccionados se observa en la Figura 3.1.

Las cartas de superficie se utilizaron en conjunto con las cartas de viento del reanálisis, con el fin de detectar condiciones sinópticas favorables para la producción de sistemas asociados a engelamiento y con las imágenes satelitales de los canales infrarojo, visual y vapor de agua, se verificó el tipo de nubosidad que afectó a la aeronave. Por otra parte, con los reportes METAR se identificaron condiciones o fenómenos relevantes reportados desde las estaciones más cercanas y relevantes a la localización del evento, asimismo, se analizaron las características generales del techo y cobertura de nubes en la zona. Los registros de rayos permitieron confirmar la presencia de sistemas de convección profunda en algunos casos.

En caso de existir un radiosondeo lanzado el día del evento y al menos 100 km a la redonda de su localización, éste fue analizado. Finalmente, se generaron perfiles verticales de POTENG con los algoritmos SLWS y CIP-sonde-A, aplicados a los datos de ERA-5 de la coordenada más cercana a la localización evento, asociando los resultados a las observaciones ya presentadas.

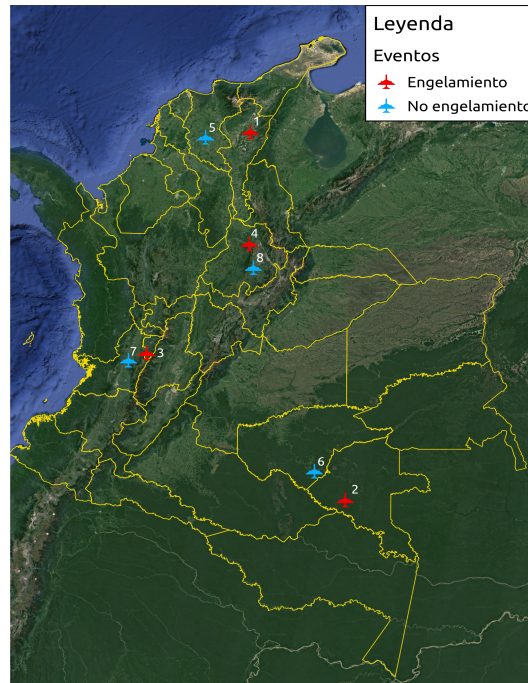


Figura 3.1: Ubicación de los 8 eventos tomados como casos de estudio.

3.2. Resultados y Análisis

3.2.1. Caso 1

El Caso 1 es un evento de seguridad aérea registrado en la base de datos de la FAC. El día 31 de julio de 2015 a las 19:45 UTC, una aeronave CN-235 presentó condiciones de engelamiento e impactó contra el terreno en el área cercana a la vereda la Paloma, municipio de Codazzi, Cesar, con coordenadas 10.01° N 73.35° W, Figura 3.2.

Se seleccionó este caso al ser un evento de seguridad operacional que se produjo en la región Caribe, donde de acuerdo a la climatología se presentan las frecuencias más bajas a nivel nacional. Sin embargo, este sector en particular tiene las frecuencias más altas de la región, junto al área de la Sierra Nevada de Santa Marta. La altitud del vuelo en el instante que se produjo el accidente fue de 21000 ft (6400 m), altitud de alta probabilidad de generación de ALS. Finalmente, el evento sucedió en el mes de julio, un mes con frecuencia de POTENG relativamente alta para el norte de la región Caribe, acorde a las observaciones en Riohacha del capítulo 1 y la climatología mensual de precipitación del IDEAM (IDEAM, 2019a).

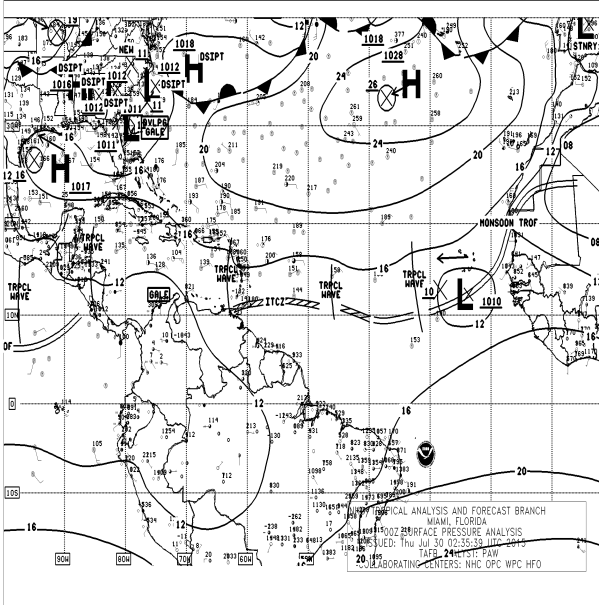


Figura 3.2: Ubicación del lugar en el que se produjo el evento analizado como caso 1. El caso corresponde a un evento de seguridad aérea que se produjo el día 31 de julio de 2015 a las 19:45 UTC en el municipio de Codazzi, Cesar.

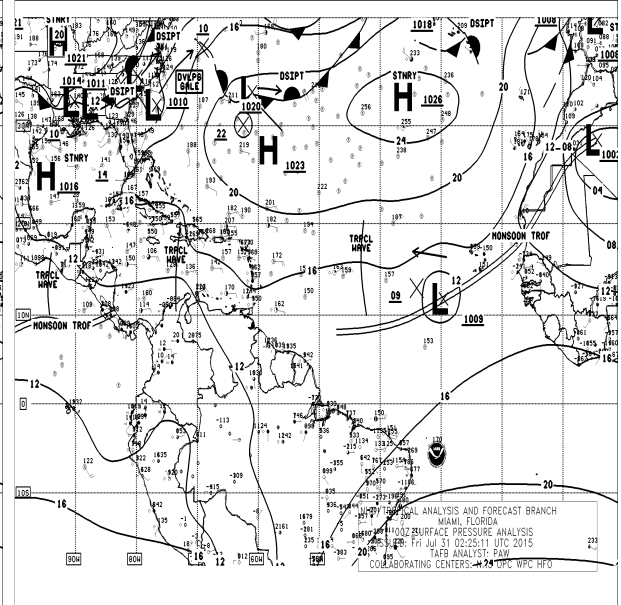
Para este análisis, se tienen en cuenta las condiciones sinópticas del día previo, el día de interés y el día posterior. En la Figura 3.3 se observa un tren activo de ondas del este, entre los 10° y 20° N. Durante el día del evento, se evidencia la presencia de una onda del este, posicionada al noroeste del territorio nacional sobre el mar caribe. La presencia de dicha onda es confirmada por las cartas de viento del reanálisis ERA-5 en la Figura 3.4, observando una ondulación con eje inclinado hacia el sureste en los niveles de 850 y 700 hPa, adicional de el apoyo de vientos fuertes de aproximadamente 20 nudos en el nivel de 500 hPa, además, se observan flujos convergentes y de baja intensidad de vientos en los niveles bajos de la zona de interés. Lo anterior, apoyado con el posicionamiento de la ZCIT al norte del país, favoreció con fuerte humedad e inestabilidad, la presencia de fuertes sistemas convectivos en la región.

Los aeródromos con registro METAR más cercanos al evento son Valledupar y Riohacha, Tabla 3.1). Se observa que el sector de Riohacha se encuentra con nubosidad dispersa a 2000 ft (609 m) y con alta visibilidad horizontal, se evidencia también la presencia de Torrecúmulos (TCU) y de chubascos en las vecindades (VCSH) al sur y noreste de la estación. En Valledupar, se cuenta con nubosidad dispersa entre 1500 y 2000 ft, con chubascos en las vecindades y nubes de tipo torrecumulo al noreste y sur de la estación, lo anterior, puede indicar la posibilidad de incluir los reportes de presencia de tormentas (TS), torrecumulos , cumulonimbos (CB) y precipitaciones reportadas, para la estimación de POTENG en la metodología de Bernstein *et al.* (2007) y no solo con la cobertura de nubes mayor a BKN. Por otra parte, los datos de radiosondeos en Riohacha y Barranquilla para la fecha del evento no están disponibles.

(a) 30 de julio de 2015, 2:35 UTC



(b) 31 de julio de 2015, 2:25 UTC



(c) 01 de agosto de 2015, 2:25 UTC

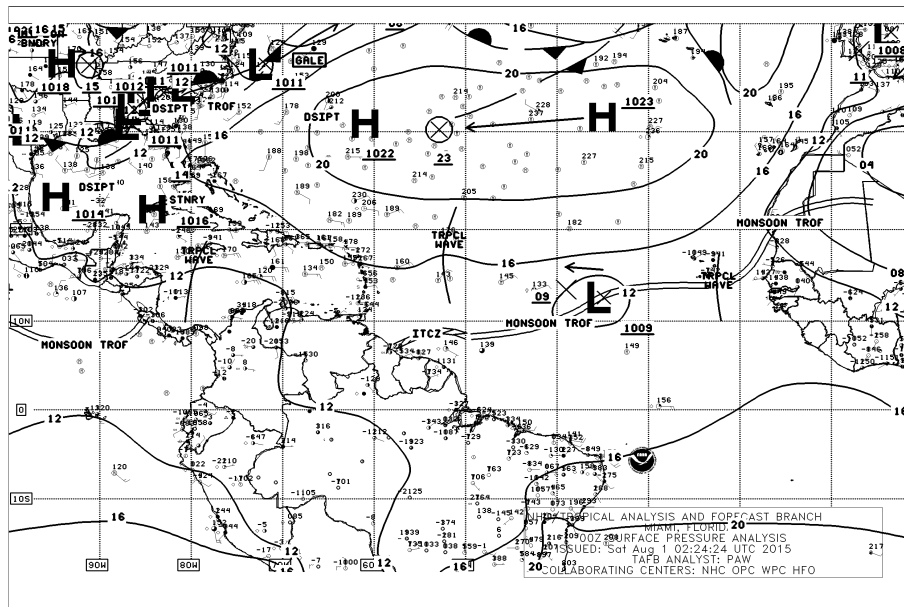


Figura 3.3: Cartas sinópticas de superficie para el caso 1.

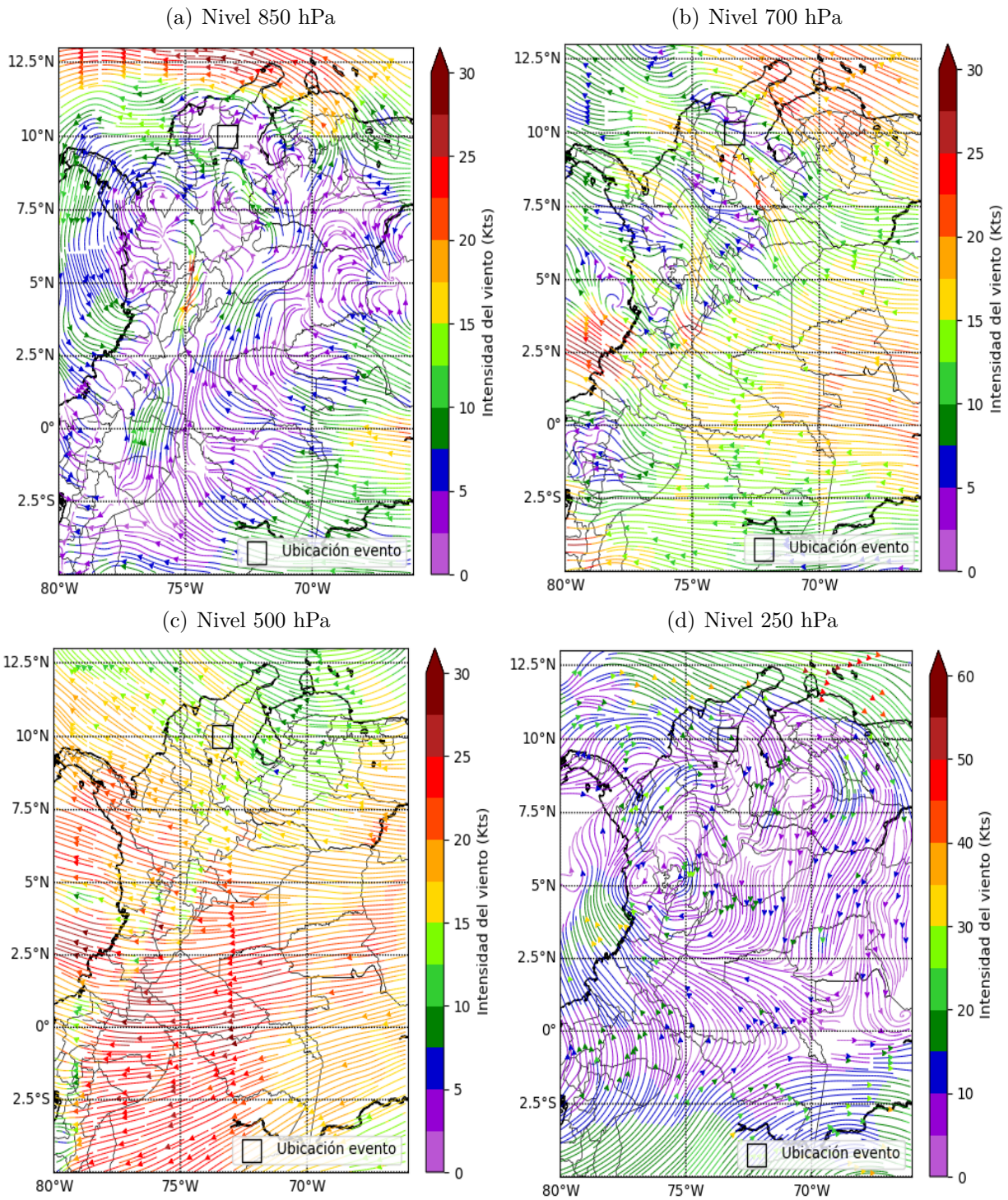


Figura 3.4: Cartas de líneas de corriente en los niveles de 850 (a), 700 (b), 500 (c) y 250 hPa (d), a las 19:00 UTC, de acuerdo a datos del reanálisis ERA-5 para el caso 1.

Tabla 3.1: Reportes METAR de los aeródromos de Riohacha y Valledupar para las 19:00 y 20:00 UTC del día 31 de julio de 2015.

Código OACI	Reporte METAR
SKRH	311900Z 09010KT 9999 SCT020TCU SCT080 37/21 A2981 RMK TCU NE/S=
	312000Z 12006KT 9999 VCSH SCT015TCU SCT080 34/20 A2980 RMK TCU/VCSH S/NE=
SKVP	311900Z 08013KT 9999 SCT020 33/24 A2980=
	312000Z 12006KT 9999 VCSH SCT015TCU SCT080 34/20 A2980 RMK TCU/VCSH S/NE=

Las imágenes satelitales del GOES-13 en los canales infrarojo, vapor de agua y visual, se pueden encontrar en las Figuras 3.5, 3.6 (b) y 3.6 (a), respectivamente. En las imágenes del canal infrarrojo se detalla la evolución de los sistemas desde las 17:45 UTC hasta las 20:45 UTC. En la imagen de las 17:45 UTC no se observa nubosidad en el área del evento, aunque al norte de la posición se empieza a identificar el crecimiento núcleos convectivos, posteriormente a las 19:45 UTC, siendo la hora más cercana al evento, se evidenció el crecimiento de un complejo convectivo sobre el centro de la región Caribe con influencia en el área de estudio. En el canal visible se confirma la presencia de grandes complejos convectivos con fuerte albedo y con formas correspondientes a convección profunda. La imagen de vapor de agua también corrobora grandes concentraciones de vapor en la zona de estudio.

En la Figura 3.7, se puede observar una gran cantidad de cargas eléctricas cercanas al área de interés del evento, iniciando desde las 18:00 UTC y creciendo en número hasta las 20:00 UTC. La presencia de rayos abarca los departamentos de Cesar, Magdalena y Atlántico, lo que indica presencia de sistemas de convección profunda. Como se ha mencionado anteriormente estos sistemas contienen grandes cantidades de agua líquida que pueden llegar a altitudes y temperaturas superiores a las registradas en la climatología.

Para el día del evento no existen radiosondeos en los aeródromos de la región Caribe. Sin embargo, se aplicaron los algoritmos SLWS y CIP-sonde-A a los datos del reanálisis ERA-5 para analizar el POTENG durante el evento. En la Figura 3.8 se encuentra la comparación entre los dos algoritmos y la evolución del POTENG para cada hora.

El algoritmo SLWS detectó contenido de agua líquida entre los 550 y 300 hPa, la altitud de la aeronave es de 21000 ft (6400.8 m) lo que equivale aproximadamente al nivel de 460 hPa. SLWS dejó de reportar POTENG a las 20:00. SLWS solo tiene valor de 0 o 1 por eso se observa con mayor potencial en los casos positivos.

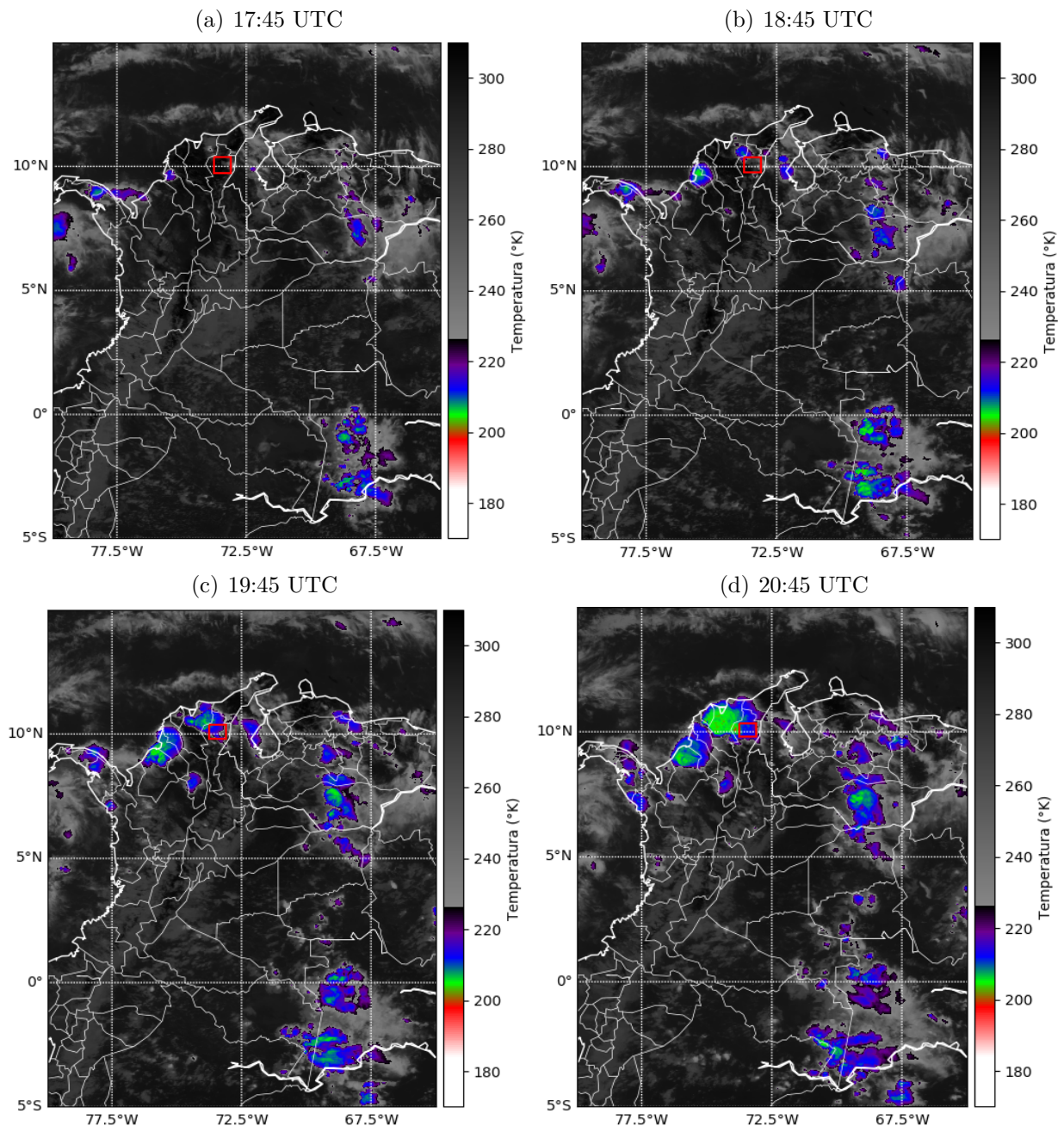


Figura 3.5: Imágenes de satélite del canal IR que muestran la evolución del caso 1, tomadas a bordo del satélite GOES-13.

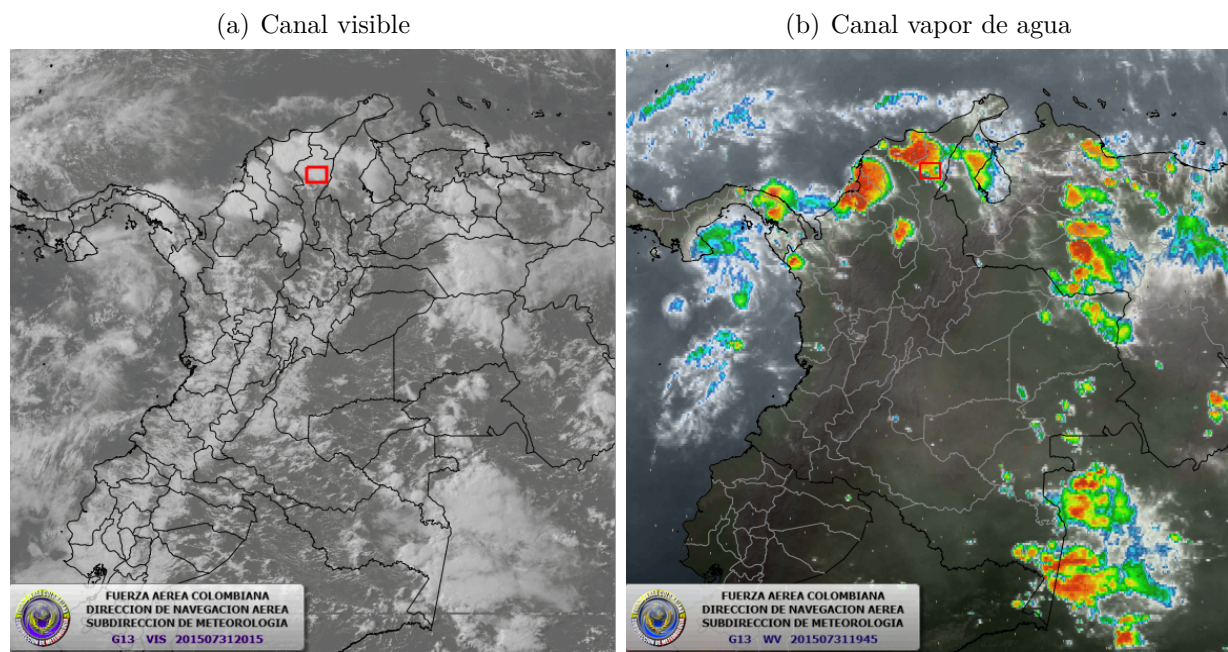


Figura 3.6: Imágenes Satelitales de los canales visibles y vapor de agua para el caso 1, tomadas a bordo del satélite GOES-13

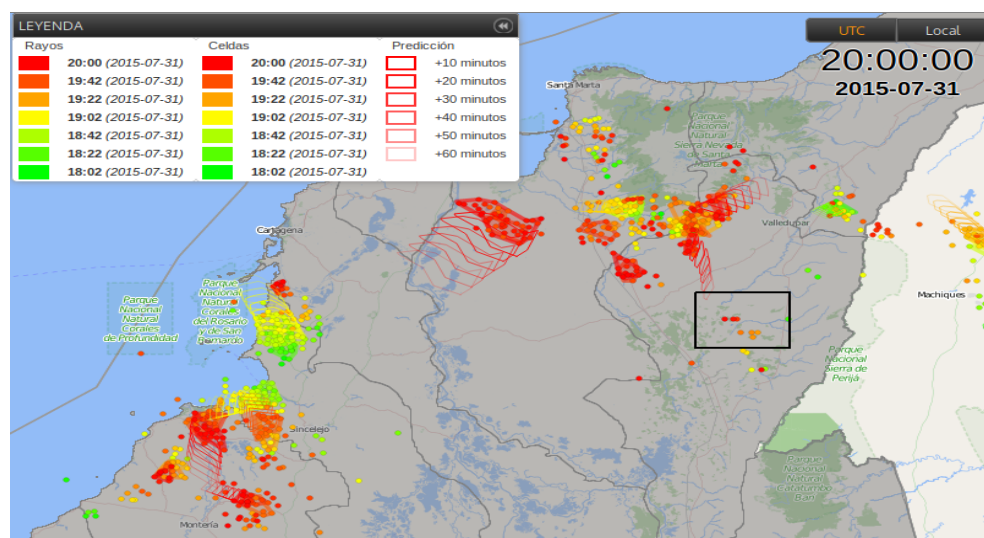


Figura 3.7: Presencia de rayos (puntos) y tendencia de movimiento de celdas (conjunto de rayos demarcado) de acuerdo al sistema LINET VIEW Keraunos (2018), para el caso 1. Las predicciones de tendencia están hechas a partir de la ultima hora registrada y son válidos para tiempos desde 10 minutos hasta 60 minutos después de la hora base.

Por su parte, el algoritmo CIP-sonde-A detecta POTENG entre 600 y 350 hPa entre las 18:00 y 21:00 UTC. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la temperatura límite de -25°C , usada en los algoritmos, subestima POTENG en casos de convección profunda y también que entre más frío o más alto es el tope, el POTENG tiende a ser menor.

El POTENG según CIP-sonde-A, concuerda mejor con las observaciones de las imágenes satelitales, las cuales muestran que hubo actividad convectiva entre las 18:00 y las 21:00 UTC. Según CIP-sonde-A en ese mismo periodo de tiempo los valores de POTENG son diferentes de cero. Se observa también que, en el momento del evento, los sistemas convectivos estaban en una etapa de formación, puesto que en la imagen satelital de las 20:45 se encuentra el sistema más desarrollado.

Este evento puede mostrar que en zonas con poca elevación y baja frecuencia de POTENG como la región Caribe, el riesgo más alto para las aeronaves lo constituyen los grandes sistemas convectivos, como los que se producen por efecto de la propagación de las ondas del este.

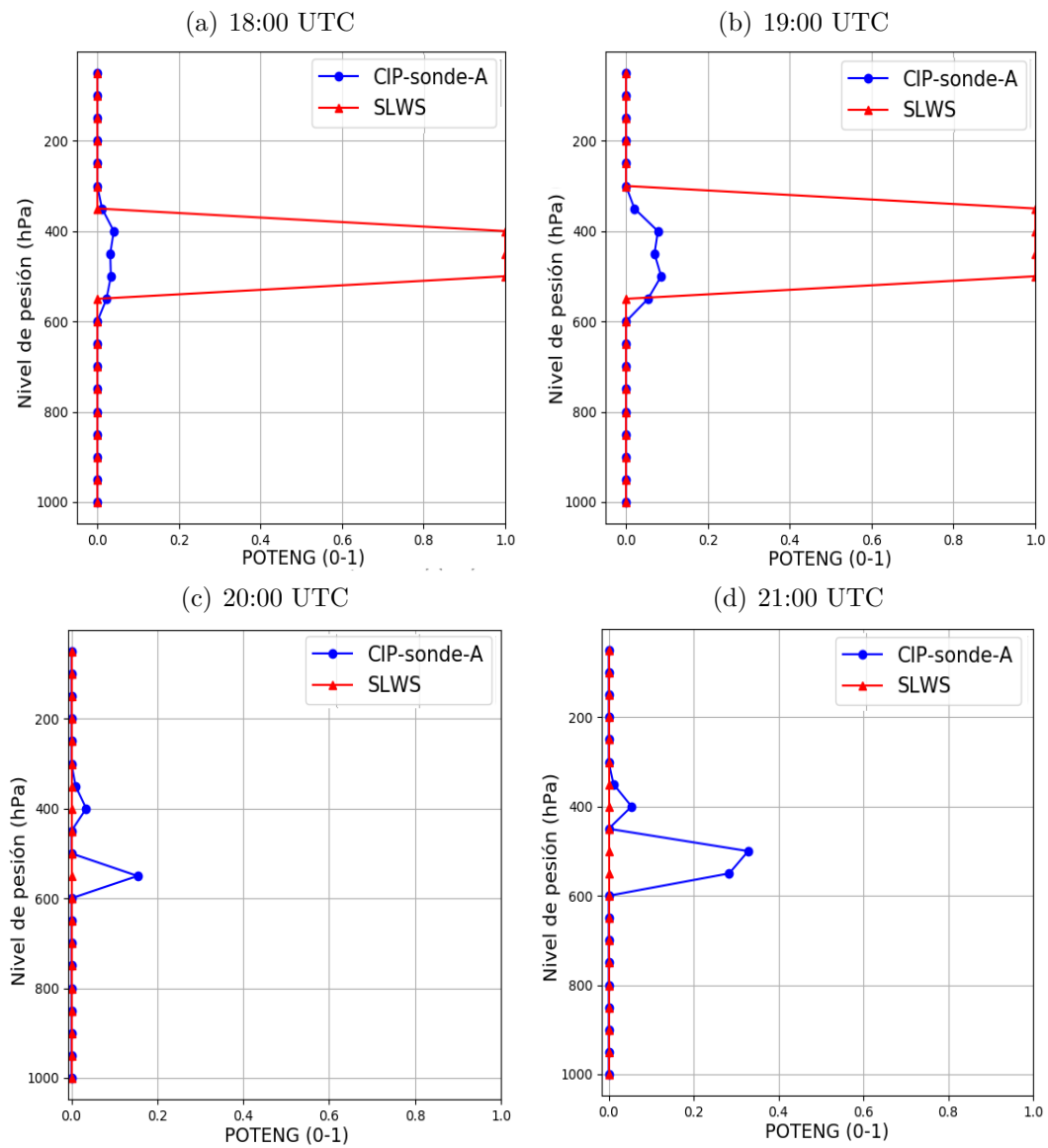


Figura 3.8: Evolución de perfil de POTENG entre las 18:00 UTC y las 21:00 UTC del 31 de julio de 2015 según los algoritmos SLWS y CIP-sonde-A aplicados a los datos de reanálisis ERA-5.

3.2.2. Caso 2

El caso 2 es un evento registrado por FDR de una aeronave C-295 de la FAC. La aeronave realizó la ruta descrita en la Figura 3.9. De acuerdo con los datos registrados, se activaron los sistemas de deshielo en las coordenadas 0.40° N 71.12° W. Este evento fue seleccionado debido a que es el único que se presentó al sur, en la Amazonía. Esta región de acuerdo a las climatologías tiene altas frecuencias de POTENG, sin embargo, es relativamente llana, por lo cual es poco probable que una aeronave entre en condiciones engelantes debido a la facilidad de maniobra.



Figura 3.9: Ubicación y ruta del lugar en el que se produjo el evento analizado como caso 2. El caso corresponde a un registro FDR que se produjo el día 15 de marzo de 2016 a las 23:13 UTC en coordenadas 0.40° N 71.12° W departamento de Vaupés. Zona con sistemas de deshielo activado (Azul).

El evento sucede a las 23:13 UTC el 15 de marzo de 2016 a 16003 ft (4876 m) de altitud, correspondiente aproximadamente al nivel isobárico 550 hPa. En el mes de marzo se presentan frecuencias altas de POTENG, en gran parte debido al paso de la ZCIT sobre la región en su tránsito hacia el norte.

De acuerdo a la carta de superficie para el día del evento, Figura 3.10 (b), la ZCIT se encuentra al este sobre Brasil, aproximadamente a los de 2° S de latitud, esto facilita la formación de fuertes complejos convectivos al sur del país.

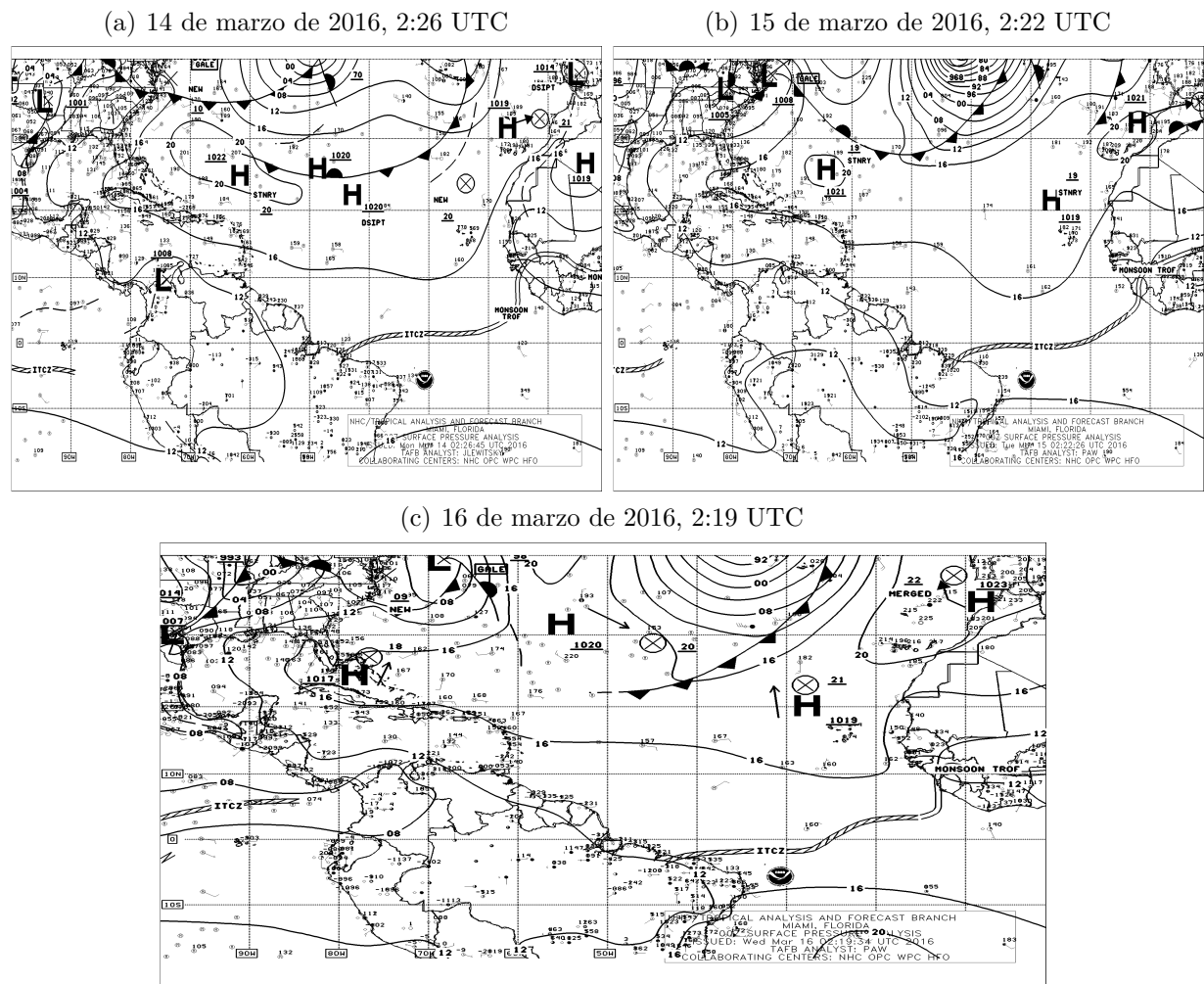


Figura 3.10: Cartas sinópticas de superficie para el caso 2

Las cartas de vientos de la figura 3.11, muestran una fuerte convergencia del flujo de vientos provenientes del noreste y sureste, en los niveles de 850 y 700 hPa, iniciando desde el norte del Departamento del Amazonas y afectando los departamentos de Vaupés, Guaviare y Meta, con intensidades aproximadas entre 5 y 13 nudos. En el nivel de 500 hPa, se confirma un patrón convergente con mayor intensidad sobre el centro del Departamento de Vaupés y el punto fronterizo entre los departamentos de Meta, Vichada, Guainía y Guaviare, lo anterior, apoyado por vientos divergentes sobre todo el sur del país en el nivel de 250 hPa, con intensidades que varían entre 13 y 30 nudos.

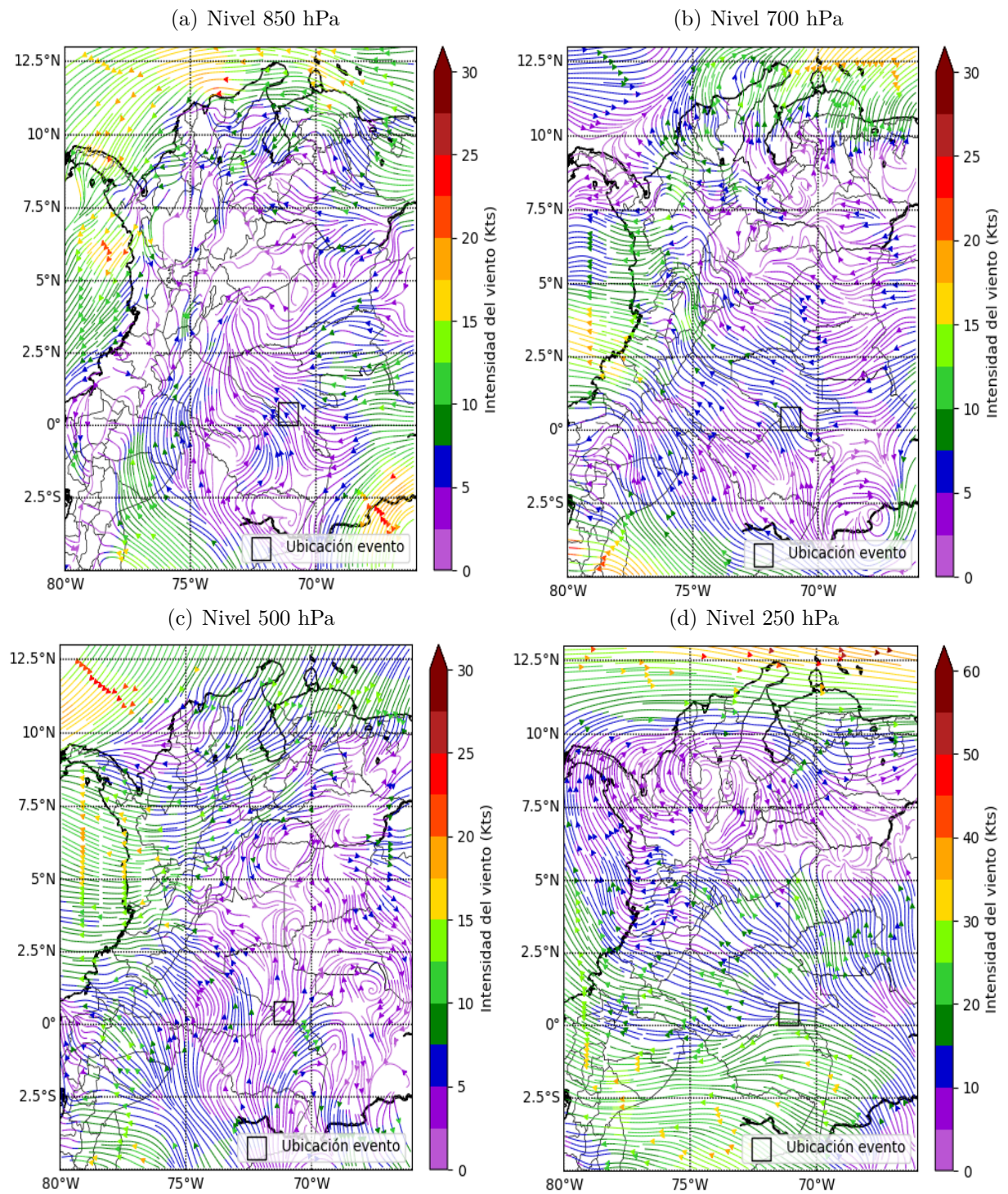


Figura 3.11: Cartas de líneas de corriente en los niveles de 850 (a), 700 (b), 500 (c) y 250 hPa (d), a las 23:00 UTC, de acuerdo a datos del reanálisis ERA-5 para el caso 2.

Los reportes METAR de los aeródromos más cercanos y próximos a la hora del evento, fueron los de San José del Guaviare a las 22:00 UTC y Mitú a las 22:00 y 23:00 UTC, Tabla 3.2. San José reportó visibilidad mayor a 10 km y nubosidad fragmentada a 5000 ft (1524 m), sin fenómenos predominantes. Mitú reportó visibilidad afectada por bruma de 9000 m y nubes dispersas a 5000 ft. Los reportes METAR más cercanos no lograron observar los sistemas convectivos que se formaron al noroeste del área del evento, no obstante, de manera clara en las imágenes satelitales, se observa que en área de las estaciones se encuentra cielos despejado tal como se registra en los reportes METAR.

Tabla 3.2: Reportes METAR de los aeródromos de San José del Guaviare y Mitú para las 22:00 y 23:00 UTC del día 15 de marzo de 2016.

Código OACI	Reporte METAR
SKSJ	152200Z 00000KT 9999 FEW030 BKN050 XX/XX A2978 =
SKMU	152200Z 00000KT 9000 SCT050 31/24 A2987 RMK HZ=
	152300Z 00000KT 9000 SCT050 29/24 A2990 RMK HZ=

En las imágenes de satélite del canal IR de la Figura 3.10, se observa un complejo convectivo en formación sobre los Departamentos de Guaviare y noroeste de Vaupés y a través de la frontera entre los Vichada y Guainía. Estos sistemas se ubican sobre la zona que atraviesa la ruta de vuelo de la aeronave. La imagen del canal visual no se encuentra disponible para la hora del evento.

Acorde a la Figura 3.13, correspondiente a la imagen satelital del canal visible de las 21:15 UTC, se confirma la presencia de sistemas de convección profunda en la ruta de la aeronave, la imagen de vapor de agua también muestra grandes cantidades de vapor en estos sistemas.

El radiosondeo más cercano disponible fue el de Leticia, donde se observa alta humedad desde superficie, iniciando desde 96 % y se mantiene por encima de 78 % hasta los 339 hPa, adicional a esto, no se observan inversiones de temperatura. Los niveles más potenciales para engelamiento se encuentran entre 550 y 350 hPa debido a que son los niveles en el rango de temperatura entre 0 y -20 °C con humedad relativa entre 96 y 70 %.

La detección de rayos en el sistema LINET, Figura 3.15, muestra gran cantidad de registros de rayos en el área en donde se encuentran los sistemas convectivos, los cuales se desplazan hacia el noroeste. En el punto exacto del evento no se registran rayos.

La aplicación de los algoritmos SLWS y CIP-sonde-A a los datos del reanálisis ERA-5, Figura 3.16, arrojó como resultado que entre las 23:00 UTC y 00:00 UTC, los dos algoritmos producen POTENG en el nivel entre los 500 y 550 hPa, niveles cercanos a lo estimado de acuerdo a la altitud de la aeronave.

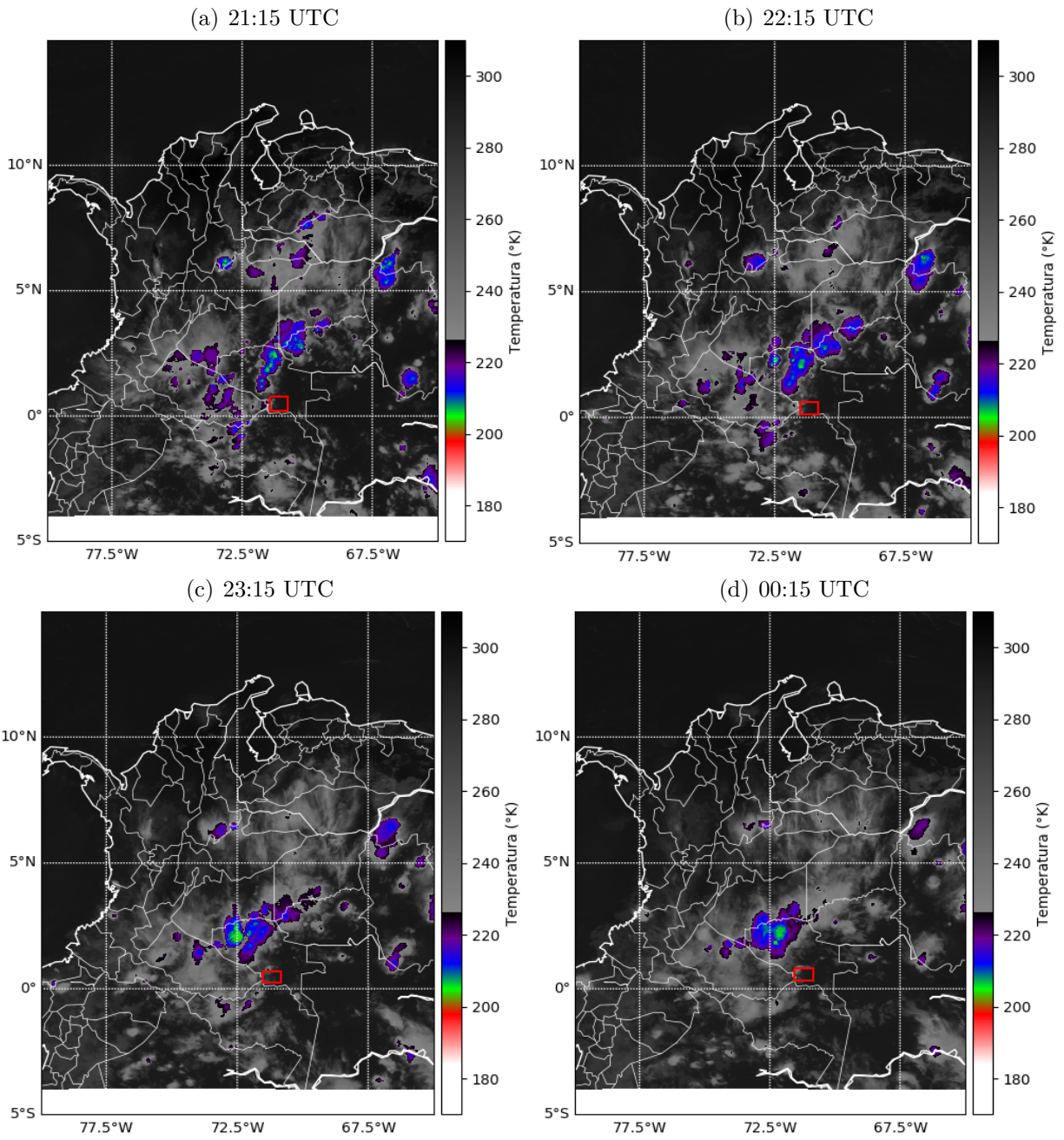


Figura 3.12: Imágenes satelitales del canal IR que muestran la evolución del caso 2, tomadas a bordo del satélite GOES-13.

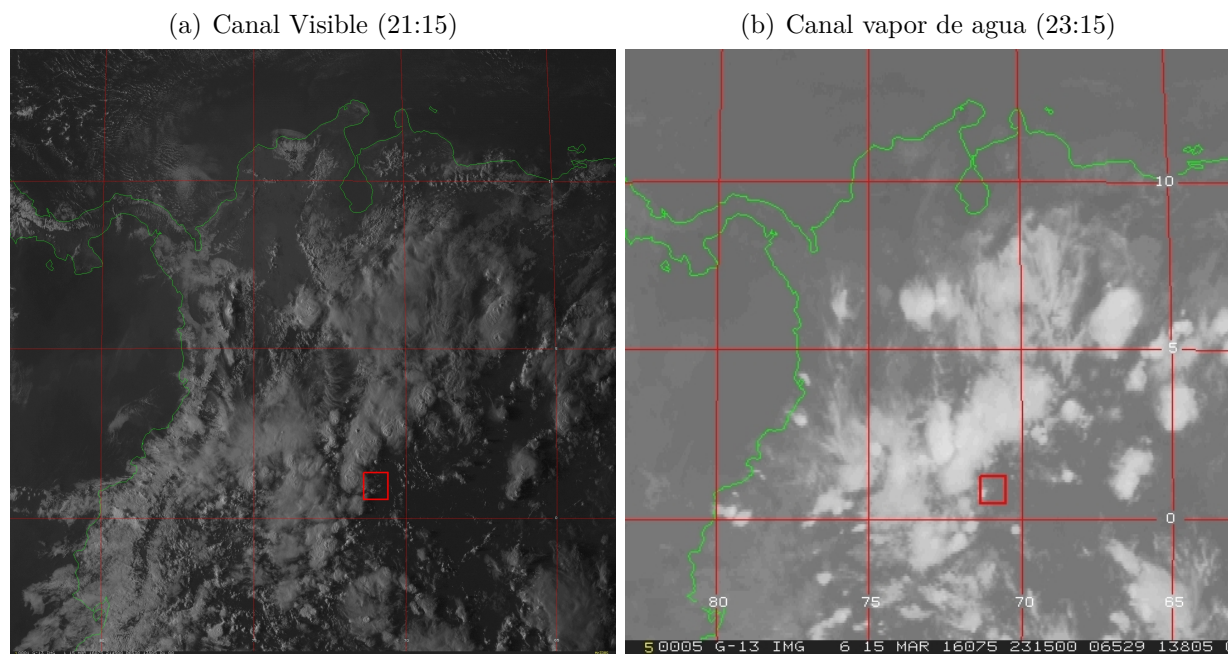


Figura 3.13: Imágenes de satélite del canal visible y vapor de agua para el caso 2, tomadas a bordo del satélite GOES-13.

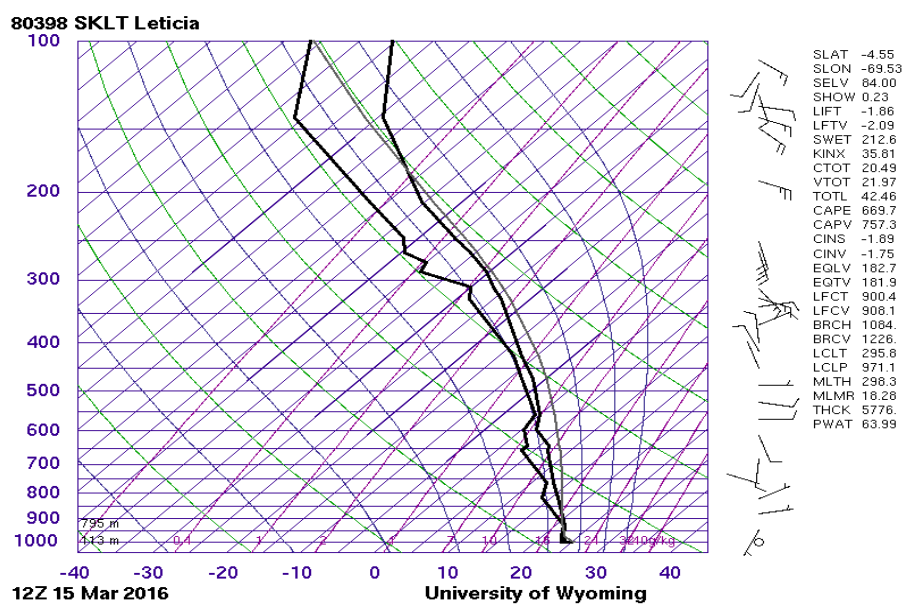


Figura 3.14: Radiosondeo más cercano a la estación de Leticia, Código 80398, para el día del caso 2.

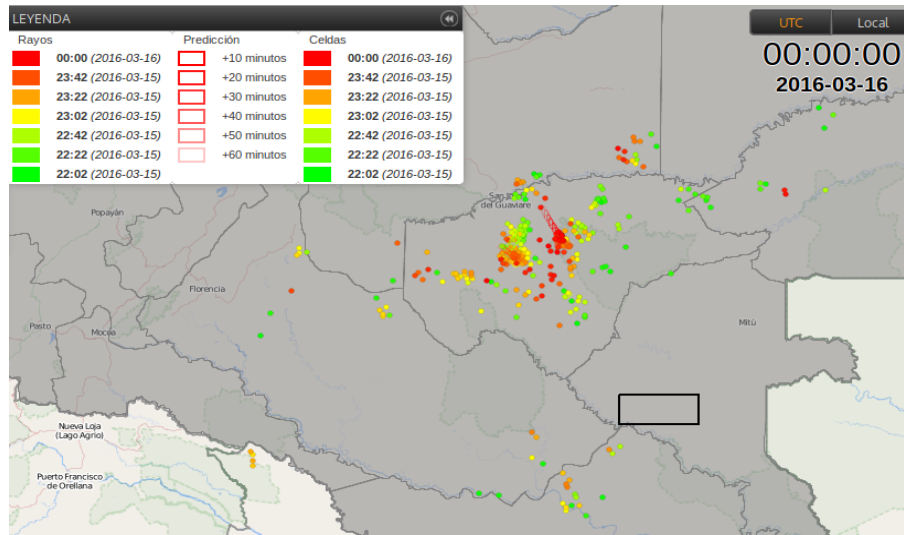


Figura 3.15: Presencia de rayos (puntos) y tendencia de movimiento de celdas (conjunto de rayos demarcado) de acuerdo al sistema LINET VIEW Keraunos (2018), para el caso 2. Las predicciones de tendencia están hechas a partir de la ultima hora registrada y son válidos para tiempos desde 10 minutos hasta 60 minutos después de la hora base.

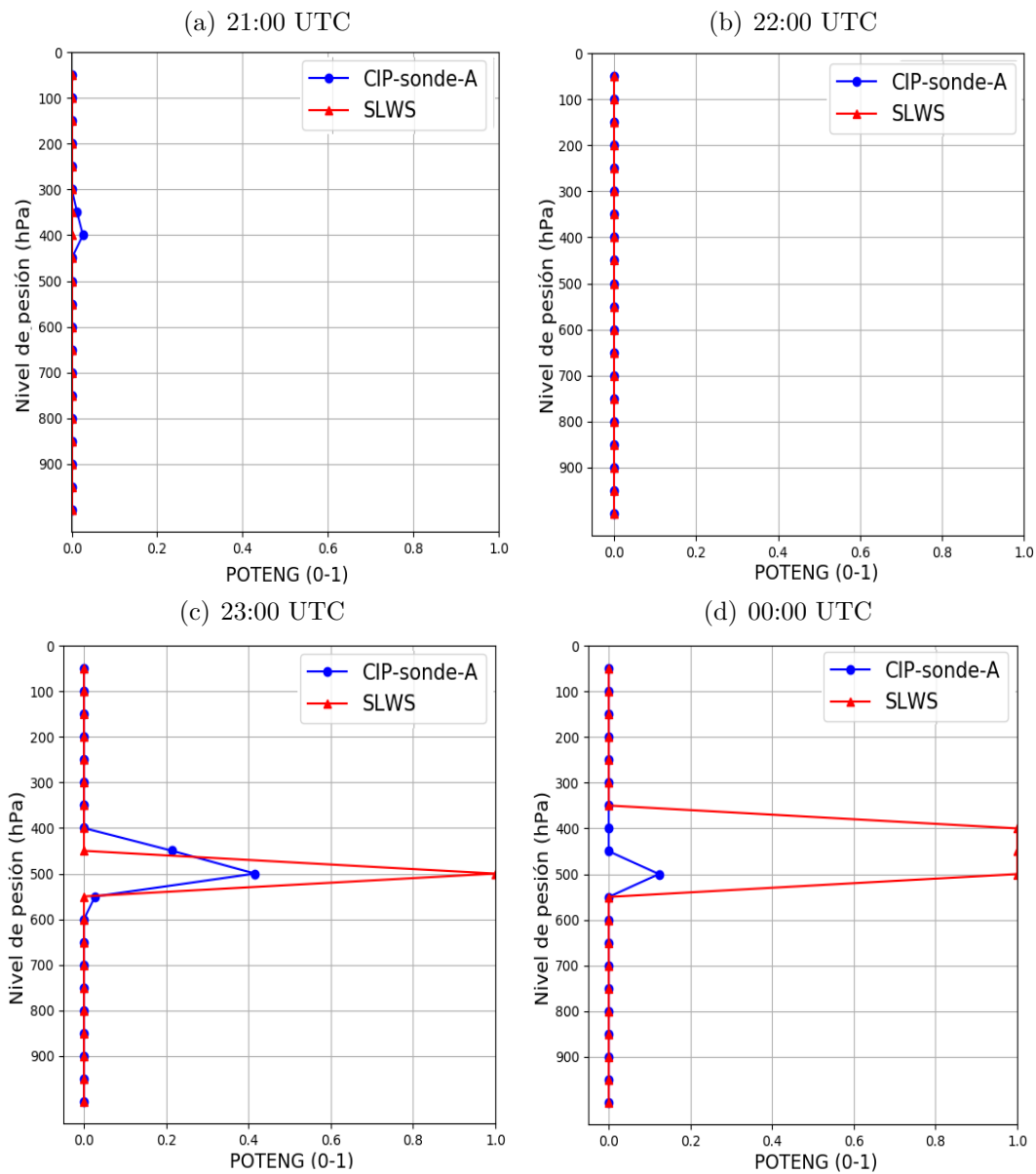


Figura 3.16: Evolución de perfil de POTENG entre las 21:00 UTC y las 00:00 UTC del 15 de marzo de 2016 según los algoritmos SLWS y CIP-sonde-A aplicados a los datos de reanálisis ERA-5.

3.2.3. Caso 3

El Caso 3 es un evento registrado por FDR, se produjo el día 26 de abril de 2016 a las 19:23 UTC, aproximadamente a 16947 ft (5165 m) de altitud. La aeronave realizó la ruta que se observa en la Figura 3.17, activando sus sistemas de deshielo en las coordenadas 4.25° N 75.8° W. La tripulación accionó sus sistemas de deshielo al cruzar la Cordillera Central, al sur del Nevado del Ruiz, en dirección del suroeste al noreste.



Figura 3.17: Ubicación y ruta del lugar en el que se produjo el evento analizado como caso 3. El caso corresponde a un registro FDR que se produjo el día 26 de abril de 2016 a las 19:23 UTC en coordenadas 4.25° N 75.8° W, departamento del Valle del Cauca. Zona con sistemas de deshielo activado (Azul).

Se seleccionó este caso, ya que es un evento representativo para los eventos que ocurrieron en zonas cercanas de la cordillera. Los departamentos del Valle del Cauca y Quindío están en una zona de alta frecuencia de POTENG, de acuerdo a la distribución geográfica de la climatología para los algoritmos SLWS y CIP-sonde-A, Figuras 1.36 y 1.38. Adicionalmente el mes de abril es uno de los meses con mayor frecuencia en esta zona de acuerdo a las observaciones.

En la Figura 3.18, se encuentran las cartas sinópticas de superficie de los dos días antes y el día del evento. Se observa la presencia de una baja presión influyendo sobre las condiciones meteorológicas al noroeste del país durante los 3 días, extendiéndose por las cordilleras Central y Occidental.

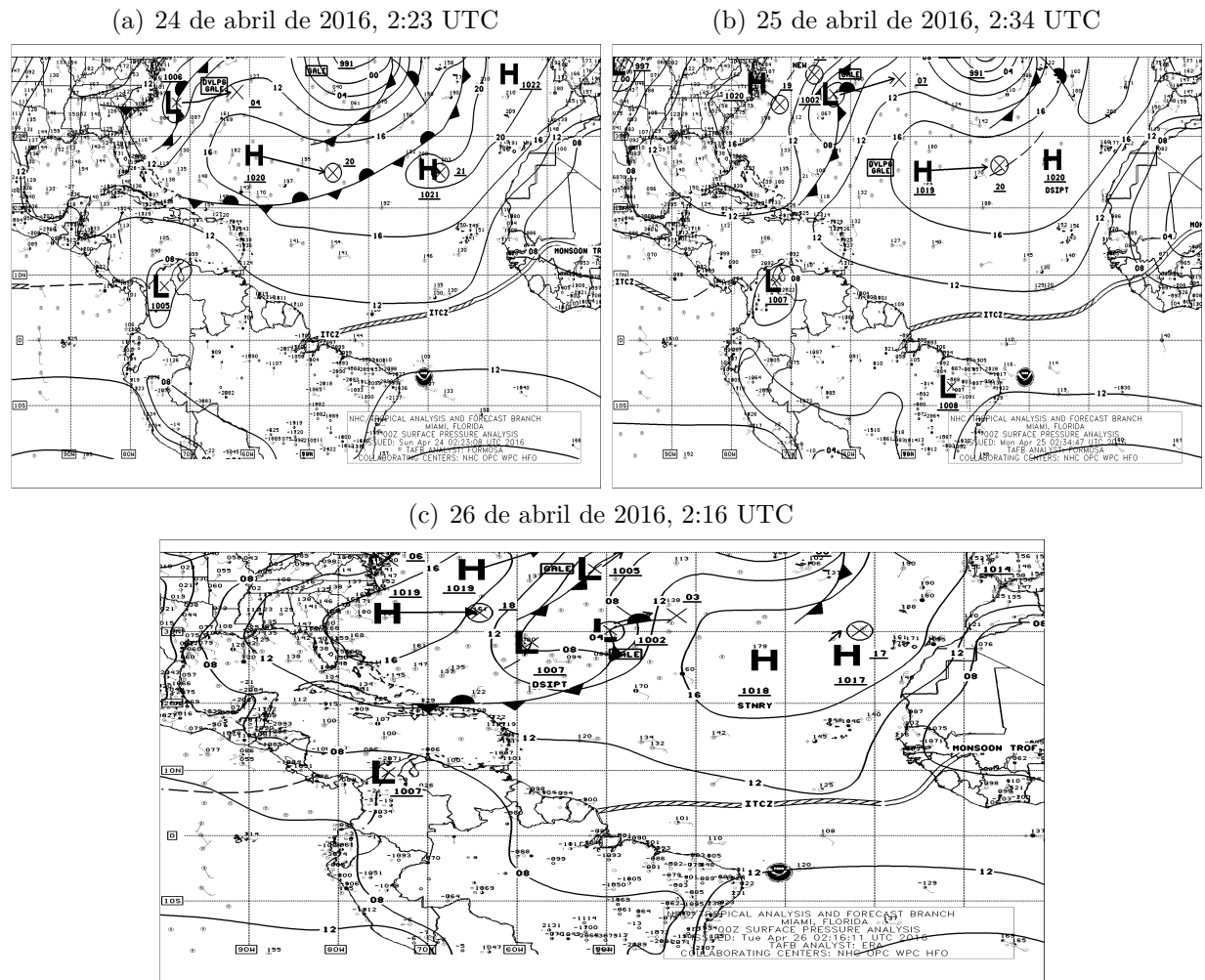


Figura 3.18: Cartas sinópticas de superficie para el caso 3.

Los flujos de vientos representados en la Figura 3.19, en los niveles de 850, 700 y 500 hPa, muestran flujos de viento provenientes del oeste que chocan contra la Cordillera Occidental, con intensidades que varían entre los 5 y 7 nudos, por otra parte, la zona este de la misma cordillera, recibe flujos del viento del sur y este, generando una posible agrupación de humedad sobre la zona montañosa. En el nivel de 250 hPa, se observan vientos difluentes provenientes del norte, con intensidades que varían entre los 10 y 20 nudos. Los flujos de viento anteriormente descritos, dan la oportunidad de inferir que la presencia de nubosidad en el área de interés y sus alrededores, está relacionada a nubosidad de tipo orográfica.

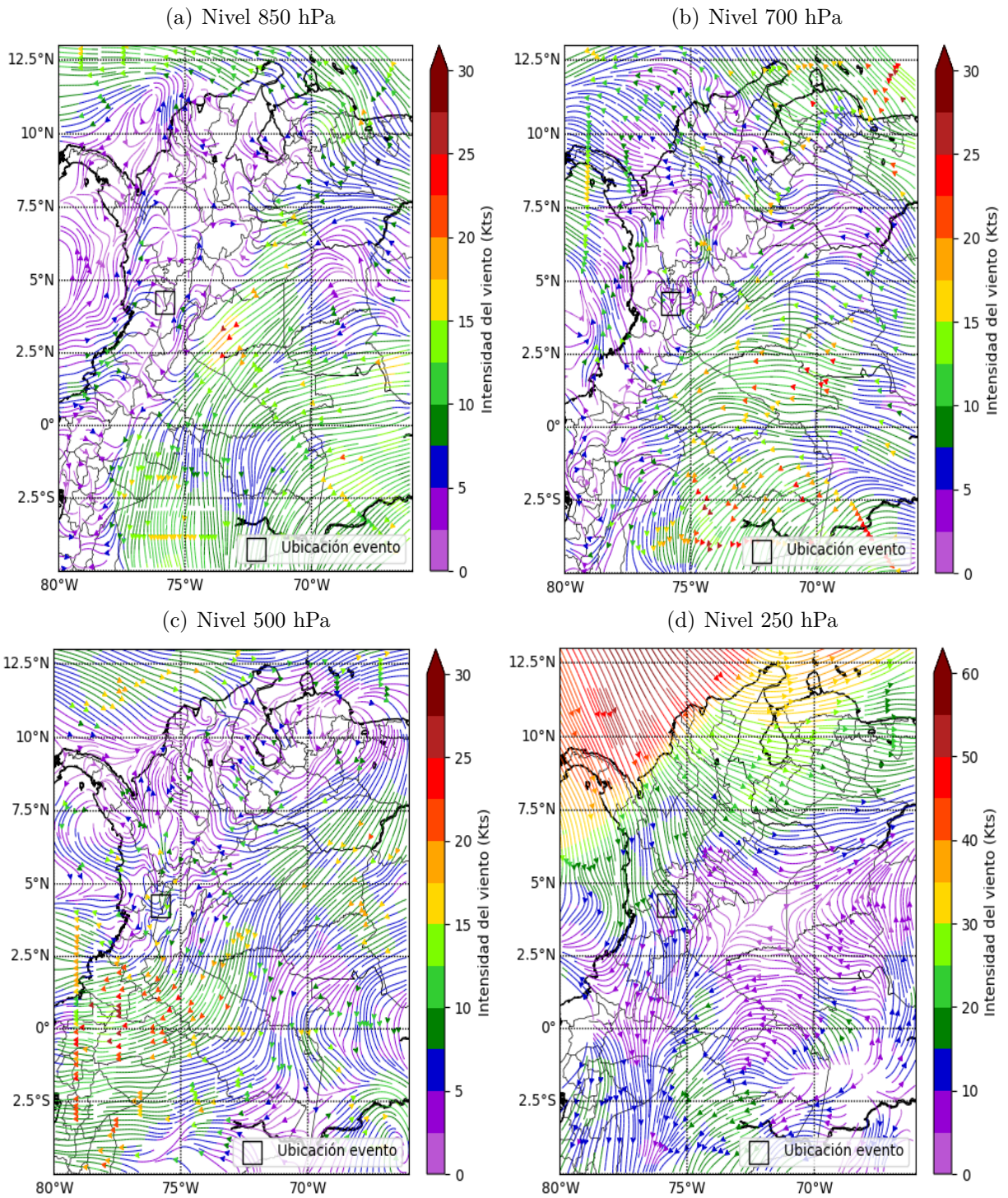


Figura 3.19: Cartas de líneas de corriente en los niveles de 850 (a), 700 (b), 500 (c) y 250 hPa (d), a las 19:00 UTC, de acuerdo a datos del reanálisis ERA-5 para el caso 3.

Los reportes METAR de los aeródromos más cercanos a la ubicación del evento son los de Armenia e Ibagué, Tabla 3.3. En Armenia entre las 19:00 y 20:00 UTC, horas en las que fue registrado el evento, se evidencia una cobertura de nubes fragmentada a baja altura, aproximadamente entre 2500 y 2700 ft (762 a 822 m). A las 21:00 UTC se observa nubosidad fragmentada a 2200 ft (670 m), con presencia de nubes tipo cumulonimbos y chubascos al sur-este y noroeste de la estación. Lo anterior indica que las condiciones sobre el sector se estaban deteriorando y existían sistemas convectivos a los alrededores. En Ibagué las condiciones se mantuvieron nubladas con techo a 3000 ft (915 m). Los datos de radiosondeo de Cali no están disponibles para día del evento.

Tabla 3.3: Reportes METAR de los aeródromos de Armenia e Ibagué para las 19:00, 20:00 UTC del día 26 de abril de 2016.

Código OACI	Reporte METAR
SKAR	261900Z 12003KT 9999 BKN027 SCT100 27/20 A2996
	262000Z 13003KT 9999 BKN025 SCT100 26/20 A2994=
	262100Z 13004KT 9999 5000SE TS BKN022 FEW025CB SCT090 25/20 A2993 RMK CB/NW VCSH SE/ NW=
SKIB	261900Z 12006KT 9999 BKN030 BKN200 30/21 A2994=
	262000Z 08004KT 9999 SCT030 BKN200 29/21 A2992=
	262100Z 15005KT 9999 SCT030 BKN100 28/21 A2991=

De acuerdo a las imágenes satelitales de GOES 13 en el canal IR, Figura 3.21, a la hora del evento se presentaron varios núcleos convectivos a lo largo de la Cordillera Occidental. La nubosidad forma la figura de la cordillera, por lo cual se infiere la presencia de nubosidad de tipo orográfico. En la imagen más cercana al evento, correspondiente a la Figura 3.21 (c), identificándose un aumento de la nubosidad con respecto a las dos horas anteriores.

En el canal visible, se observa claramente la influencia de la orografía de las cordilleras Occidental y Central, sin embargo, también se logran discriminar fuertes sistemas de convección profunda al sur y norte de la posición de la aeronave. Adicional, se observa gran concentración de vapor de agua en el área del evento de acuerdo a la Figura 3.21 (b).

En la Figura 3.22, se evidencia una gran cantidad de cargas eléctricas al sur y sur-oeste del sector de interés, lo cual confirma la presencia de fuertes sistemas convectivos alrededor. Las cargas están presentes desde las 18:00 UTC y se mantienen e incrementan aún a las 20:00 UTC.

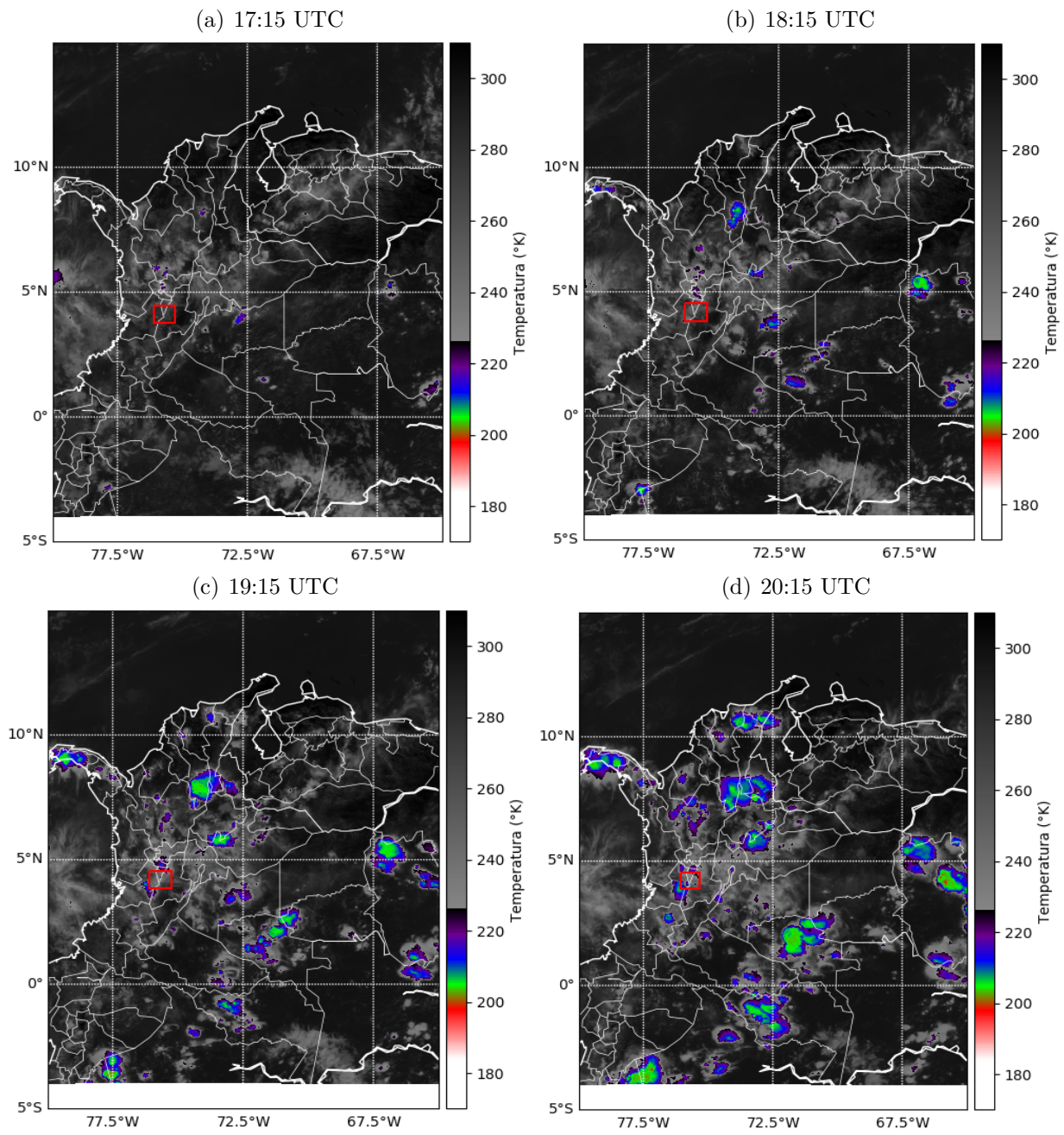


Figura 3.20: Imágenes satelitales del canal IR que muestran la evolución del caso 3, tomadas a bordo del satélite GOES-13.

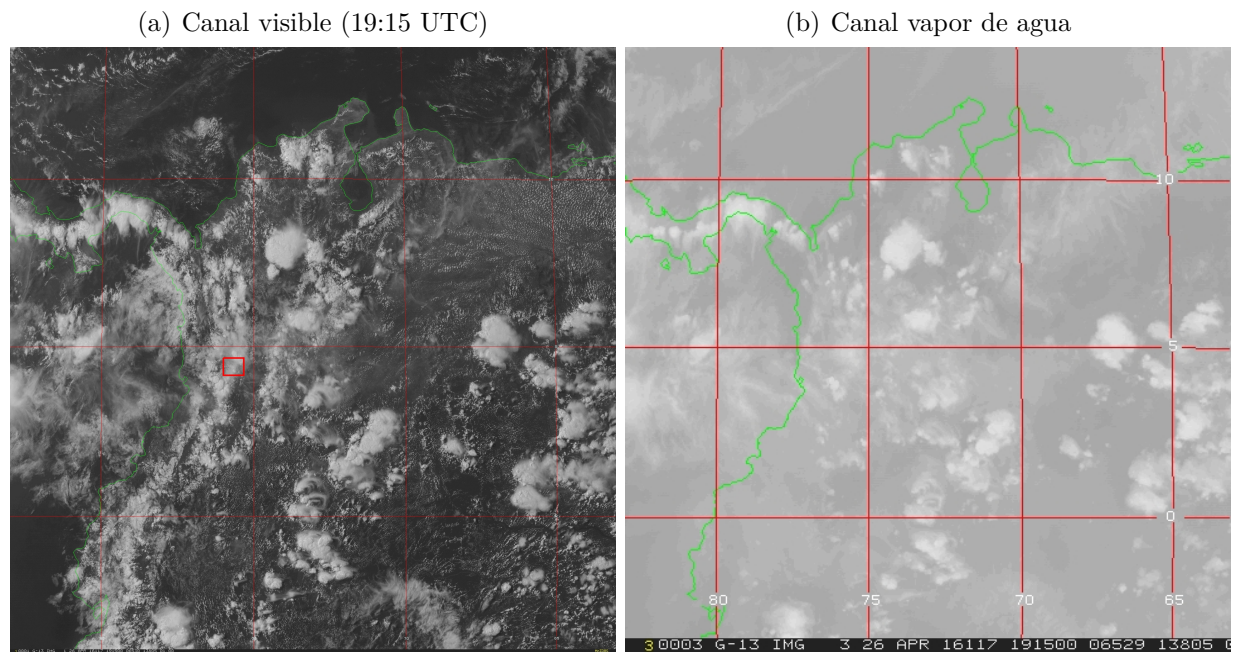


Figura 3.21: Imágenes de satélite canal visible y vapor de agua para el caso 3, tomadas a bordo del satélite GOES-13.

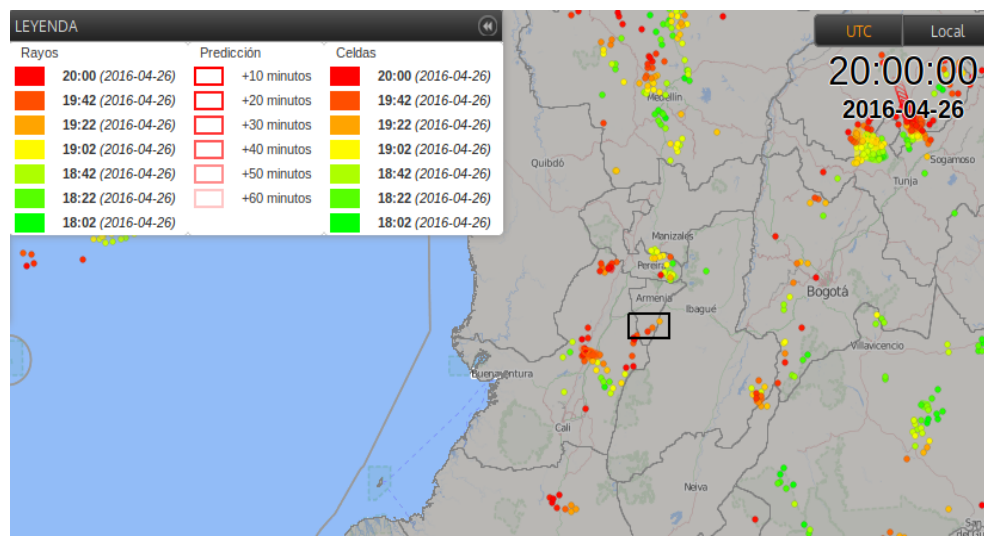


Figura 3.22: Presencia de rayos (puntos) y tendencia de movimiento de celdas (conjunto de rayos demarcado) de acuerdo al sistema LINET VIEW Keraunos (2018), para el caso 3. Las predicciones de tendencia están hechas a partir de la ultima hora registrada y son válidos para tiempos desde 10 minutos hasta 60 minutos después de la hora base.

De acuerdo a la Figura 3.23, los resultados obtenidos con los algoritmos SLWS y CIP-sonde-A aplicados a los datos del reanálisis de ERA-5, muestran que SLWS detectó POTENG en las horas anteriores y durante el reporte del evento, identificando una expansión vertical del POTENG hasta las 20:00 UTC. Lo anterior tiene consistencia con lo mostrado por las imágenes satelitales, ya que los sistemas se encuentran en desarrollo. CIP-sonde-A, por el contrario, muestras potenciales distintos a cero solo a las 18:00 y 19:00 UTC, con un valor muy bajo a las 19:00 UTC, debido a valores de humedad relativa casi despreciables en los rangos de temperatura más potenciales a engelamiento. Además, el nivel de humedad relativa más alto, esta cercano a la isoterma cero, donde el potencial tiende a ser bajo acorde a la Figura 1.10. Para este caso SLWS muestra características más reales de acuerdo a las observaciones.

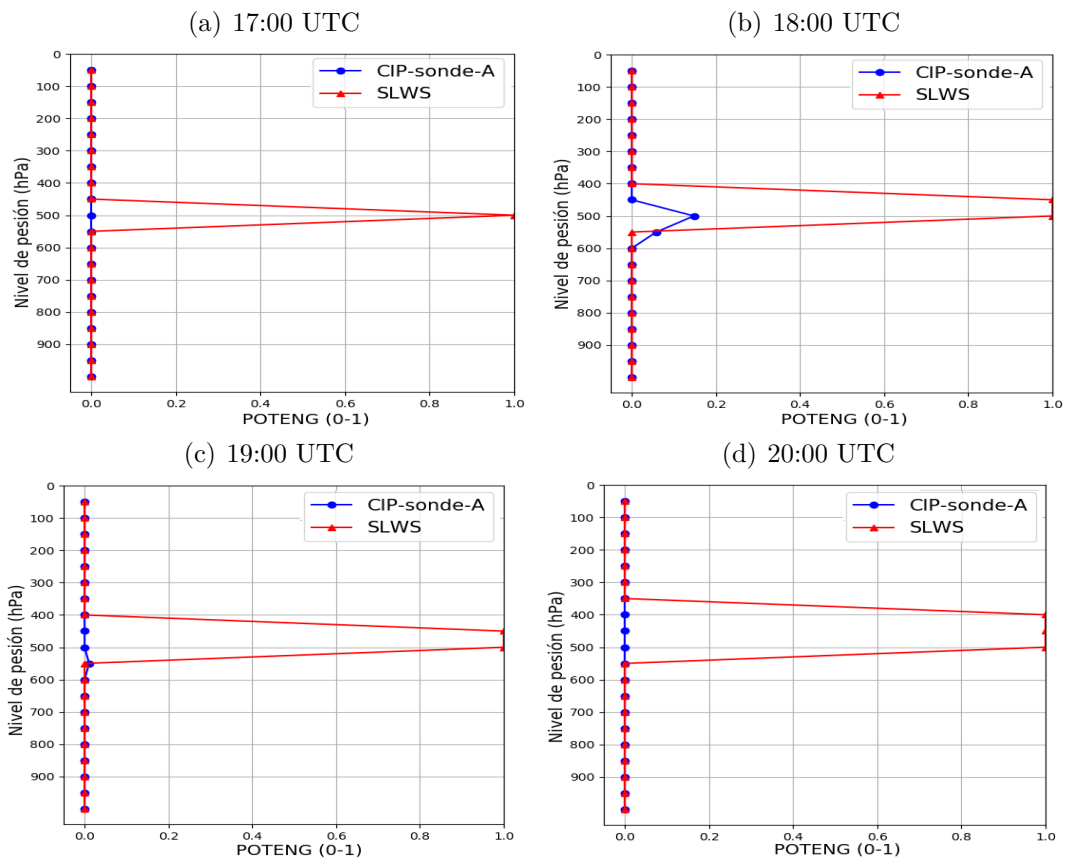


Figura 3.23: Evolución de perfil de POTENG entre las 17:00 UTC y las 20:00 UTC del 26 de abril de 2016 según los algoritmos SLWS y CIP-sonde-A aplicados a los datos de reanálisis ERA-5.

3.2.4. Caso 4

El Caso 4 es un evento de engelamiento registrado en un reporte SIGMET. Una aeronave comercial de la compañía Avianca, reportó engelamiento moderado a 21000 ft (6400 m) de altitud, en las coordenadas 7.10° N 73.38° W, el día 15 de octubre de 2015 a las 13:00 UTC. La posición donde se presentó el evento se observa en la Figura 3.24. El código SIGMET se observa a continuación:

Registro 15-Oct-15 08:38:45: WSCO31 SKBO 151332 SKED SIGMET 01 VALID 151300/151800 SKBO-MOD-ICE ARS AV9394 210FT ENGELAMINTO MODERADO SECTOR COORD 070617N/732256W TEMP -2C



Figura 3.24: Ubicación del lugar en el que se produjo el evento analizado como caso 4. El caso corresponde a un reporte SIGMET que se produjo el día 15 de octubre de 2015 a las 13:00 UTC en coordenadas 7.10° N 73.38° W departamento de Santander.

Este reporte SIGMET de forma decodificada, traduce la siguiente información: Tipo de reporte SIGMET de fenómenos riesgosos en donde se incluye el reporte de engelamiento (WS), región Colombia (CO), indica que el mensaje se distribuye en forma nacional (31), indicador de lugar de la OACI del centro que difunde el mensaje en este caso Bogotá (SKBO), fecha de elaboración del mensaje el día 15 a las 13:32 UTC (151332), indicador de lugar de la OACI de la dependencia de tránsito aéreo (ATS) (SKED), período de validez del SIGMET día 15 a las 13:00 UTC hasta el mismo día a las 18:00 UTC (SIGMET 01 VALID 151300/151800 SKBO), engelamiento moderado reportado desde el Sistema de Informes de Aviación de la aeronave Avianca AV9394 (MOD-ICE ARS AV9394), altitud del reporte 21000 ft, engelamiento mode-

rado en el sector de coordenadas 07° 06' 17"N/73° 22' 56"W, reporta temperatura indicada de -2°C (210FT ENGELAMINTO MODERADO SECTOR COORD 070617N/732256W TEMP -2C).

Este caso fue seleccionado debido a que se encuentra en una zona de alta frecuencia de POTENG entre Santander y Norte de Santander, de acuerdo a la climatología en las Figuras 1.36 y 1.38. El evento sucede en octubre, un mes de altas precipitaciones en ese sector, adicional es un evento registrado en la base de datos de reportes SIGMET, este tipo de datos no se habían evaluado dentro de los casos de estudio.

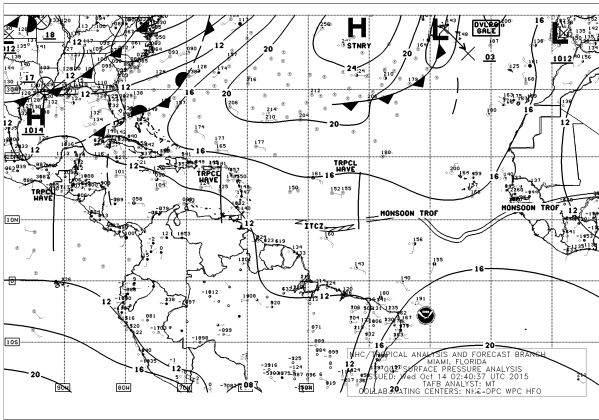
En la Figura 3.25, se muestran las cartas sinópticas de superficie para el día del evento, donde se percibe el paso de una Onda del Este sobre el norte del territorio colombiano. El eje de la onda se encuentra sobre La Guajira el día 15 de octubre a las 02:34 UTC y la ZCIT se encuentra activa al norte del territorio nacional.

De acuerdo cartas de viento de la Figura 3.26, se observa la formación de una perturbación en los niveles de 850 y 700 hPa, que se localiza principalmente al sur del Lago de Maracaibo, adicional, sobre el área de interés se identifican vientos convergentes, con intensidades no mayores a 7 nudos provenientes del este. En los niveles 500 y 250 hPa se observan flujos laminares sin patrones significativo e intensidades de aproximadamente entre 10 y 15 nudos. Los patrones de vientos favorecen al desplazamiento de humedad en niveles bajos al área de interés, ya que esta zona cuenta con la menor intensidad de viento en niveles bajos, en comparación a las intensidades al norte y este, que registran valores hasta de 15 nudos a 850 hPa.

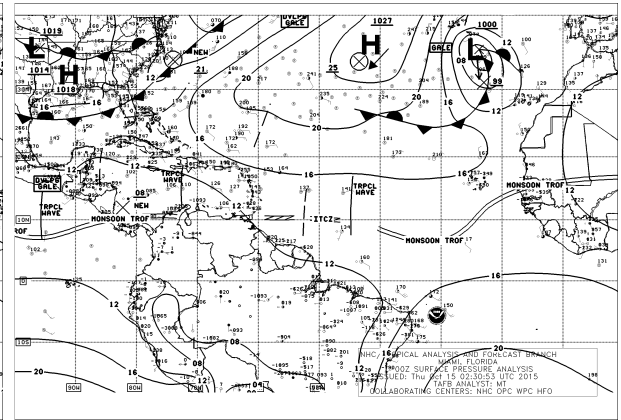
Los reportes METAR analizados, corresponden a los aeródromos de Bucaramanga y Barrancabermeja, Tabla 3.4. En Bucaramanga a la hora del evento se observó baja visibilidad por bancos de niebla, con un techo de nubes fragmentado a 300 ft (91.4 m) y nubes dispersas a 8000 ft (2438 m). Lo anterior indica que no se presentaron sistemas de convección profunda en el sector, pero dominaba una nubosidad fragmentada en niveles medios que se encontraba en incremento debido a que en los reportes previos se informaba cielo disperso.

En los reportes METAR de Barrancabermeja entre las 11:00 y 13:00 UTC, se evidencian condiciones meteorológicas similares a las de Bucaramanga. Se observa visibilidad entre 4000 y 6000 m por bancos de niebla y cielo fragmentado a entre 1000 y 1200 ft (304 a 365 m). Los datos de radiosondeo para Bucaramanga no están disponibles para la fecha del evento.

(a) 14 de octubre de 2015, 2:30 UTC



(b) 15 de octubre de 2015, 2:40 UTC



(c) 16 de octubre de 2015, 2:34 UTC

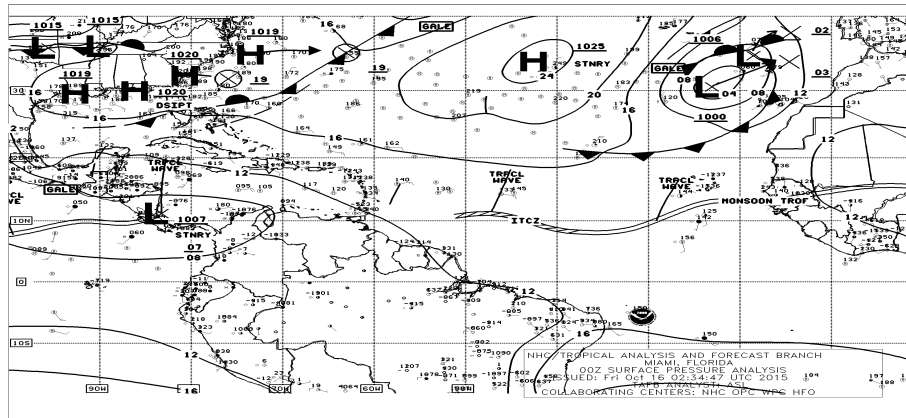


Figura 3.25: Cartas sinópticas de superficie para el caso 4.

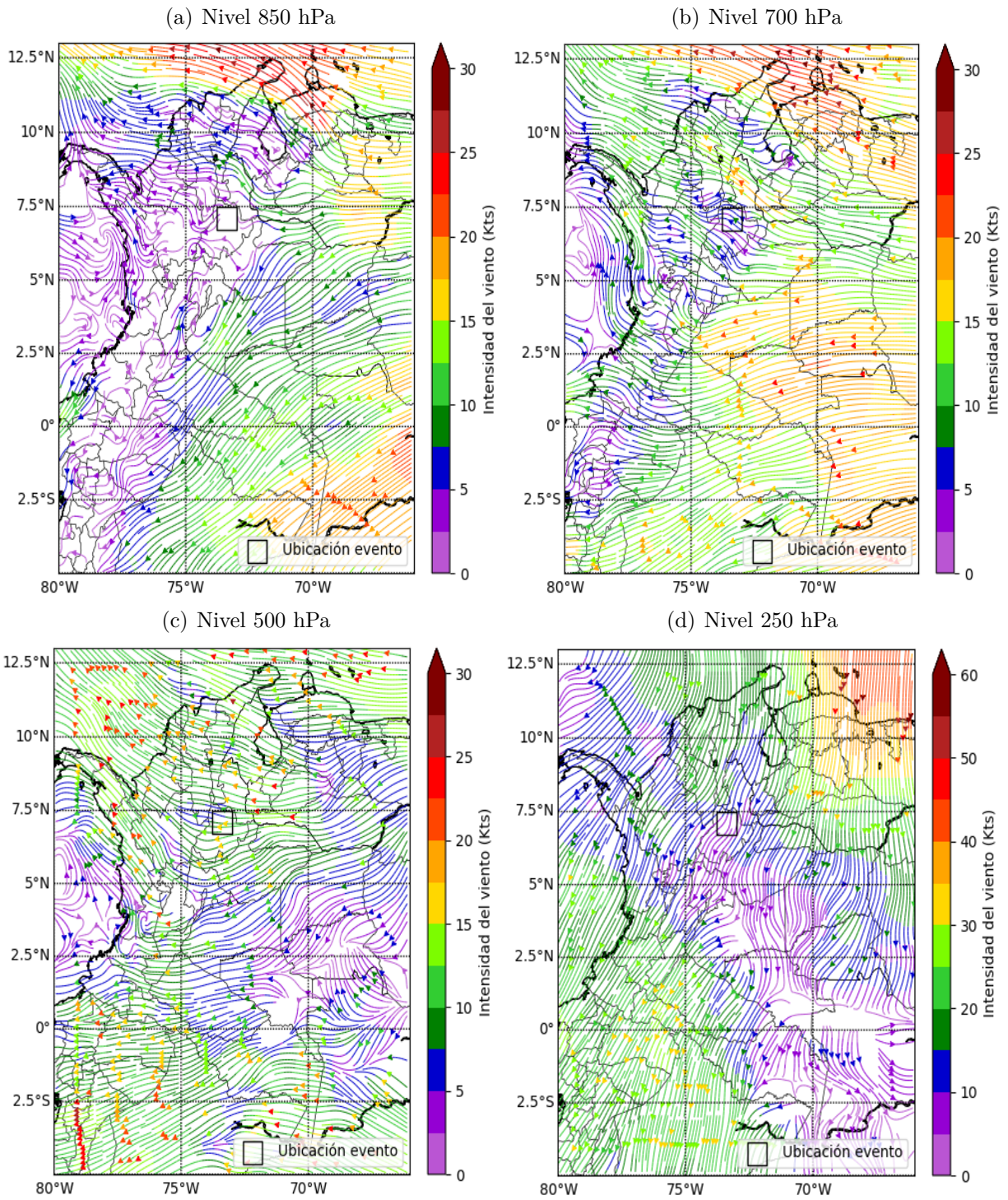


Figura 3.26: Cartas de líneas de corriente en los niveles de 850 (a), 700 (b), 500 (c) y 250 hPa (d), a las 19:00 UTC, de acuerdo a datos del reanálisis ERA-5 para el caso 4.

Tabla 3.4: Reportes METAR de los aeródromos de Bucaramanga y Barrancabermeja para las 11:00, 12:00 y 13:00 UTC del día 15 de octubre de 2015.

Código OACI	Reporte METAR
SKBG	151100Z 00000KT 0200 FG BKN001 SCT080 19/19 A2998 RMK AD BLW MNM MET=
	151200Z 00000KT 5000 BCFG SCT005 SCT080 20/20 A3000=
	151300Z 13004KT 1600 BCFG BKN003 SCT080 20/20 A3004 RMK AD OPR IMC=
SKEJ	151100Z 00000KT 5000 BCFG BKN012 25/24 A2982 RMK AD OPER IMC
	151200Z 00000KT 4000 BCFG BKN012 25/24 A2984 RMK AD OPER IMC=
	151300Z 06003KT 6000 VCFG BKN010 26/25 A2985 RMK AD OPER IMC=

De acuerdo a las imágenes satelitales de GOES 13 en el canal IR, Figura 3.27, se presenta gran cantidad de nubosidad de tipo estratiforme, cercano a dos sistemas de convección profunda que se desarrollaron sobre el lago de Maracaibo y el departamento de Norte de Santander, la nubosidad que afectó a la aeronave se encuentra asociada a humedad remanente a estos sistemas, que se desplazó a esta zona, posiblemente por la dirección de los vientos y al ser el área con menor intensidad de vientos.

Con el canal visible, Figura 3.28 (a), se observa nubosidad de tipo estratiforme como se menciona anteriormente y la cantidad de vapor de agua acorde a la Figura 3.28 (b) no evidencia cantidades significativas. Solo se observa un sistema importante al noreste de la ubicación de la aeronave.

Como se observa en la Figura 3.29, no se evidencian cargas eléctricas cercanas al área de engelamiento. Los rayos observados se encuentran al nor-este, ubicación del sistema convectivo lejano que aún se encontraba activo.

Los resultados obtenidos con los algoritmos SLWS y CIP-sonde-A aplicados a los datos del reanálisis ERA-5 se muestran en la Figura 3.30. CIP-sonde-A reporta un incremento sostenido de la intensidad del potencial de engelamiento entre las 11:00 y las 14:00 UTC; a las 13:00 UTC registra un potencial de engelamiento de aproximadamente 0.6 a 500 hPa. Al no existir topes de las nubes con temperaturas tan bajas, se observa un incremento importante de POTENG con respecto a los demás eventos, que si registran presencia de convección profunda con topes más fríos. En el nivel de vuelo de la aeronave, aproximadamente a 400 hPa, se observa POTENG entre 0.3 y 0.4. Por el contrario, el algoritmo SLWS muestra reducción de la extensión vertical

de POTENG y a la hora del evento se registra POTENG entre 500 y 450 hPa.

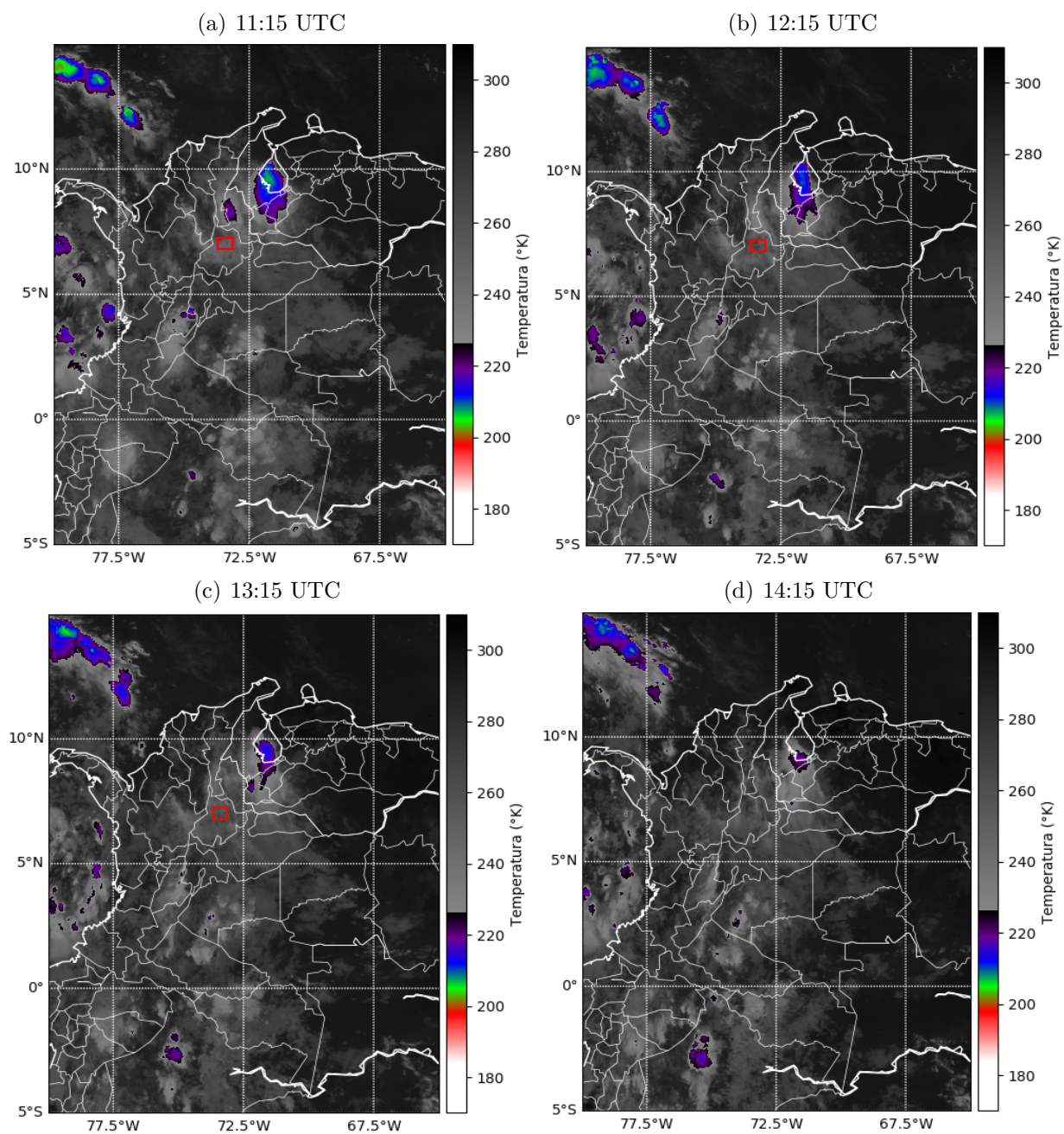


Figura 3.27: Imágenes satelitales del canal IR que muestran la evolución del caso 4, tomadas a bordo del satélite GOES-13.

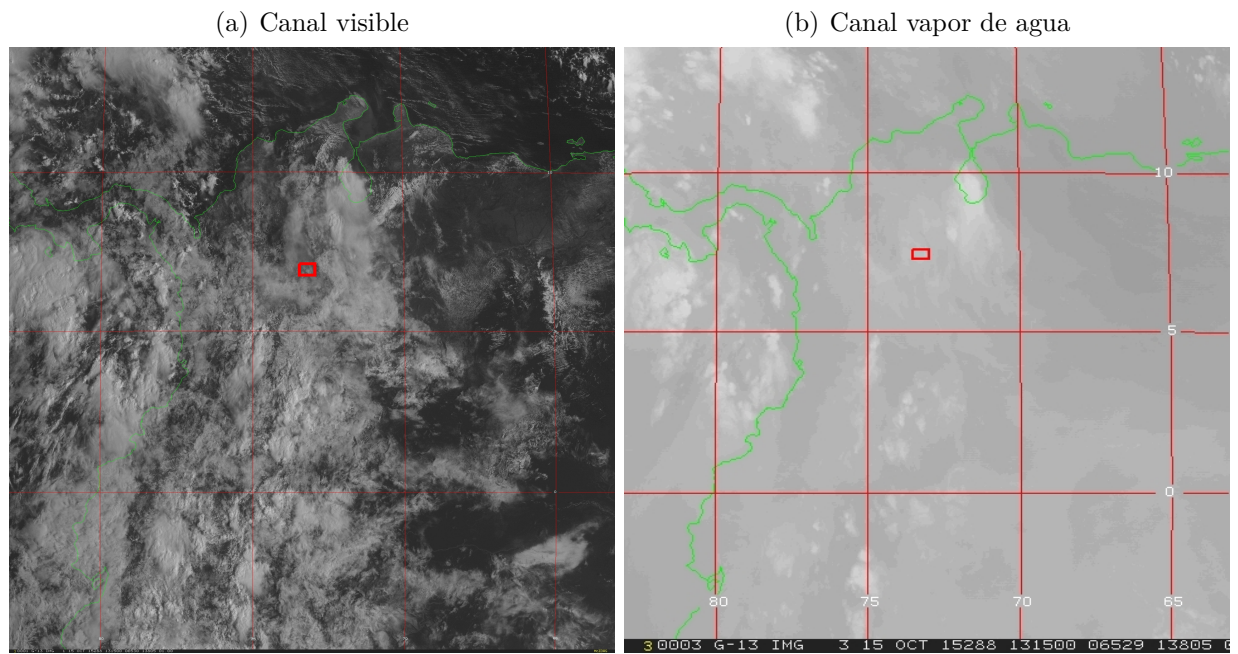


Figura 3.28: Imágenes de satélite canal visible y vapor de agua para el caso 4, tomadas a bordo del satélite GOES-13.

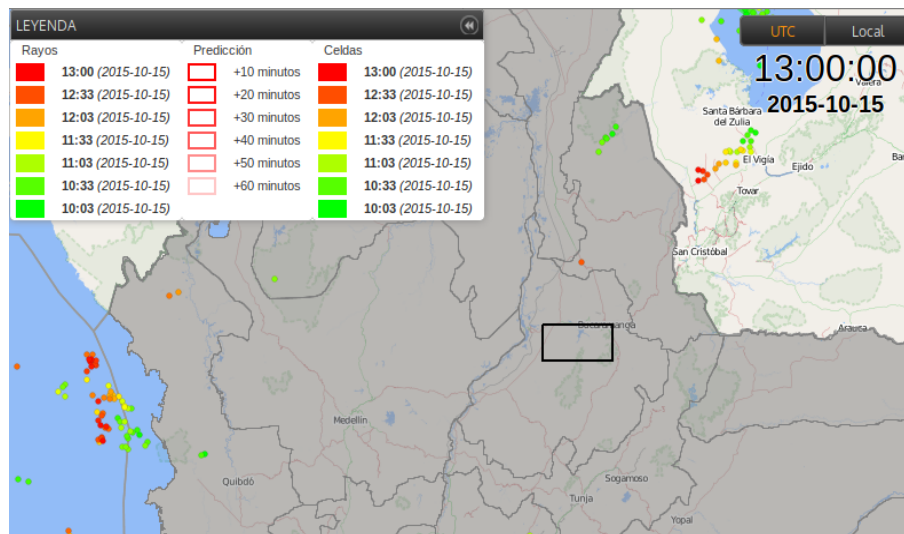


Figura 3.29: Presencia de rayos (puntos) y tendencia de movimiento de celdas (conjunto de rayos demarcado) de acuerdo al sistema LINET VIEW Keraunos (2018), para el caso 4. Las predicciones de tendencia están hechas a partir de la ultima hora registrada y son válidos para tiempos desde 10 hasta 60 minutos después de la hora base.

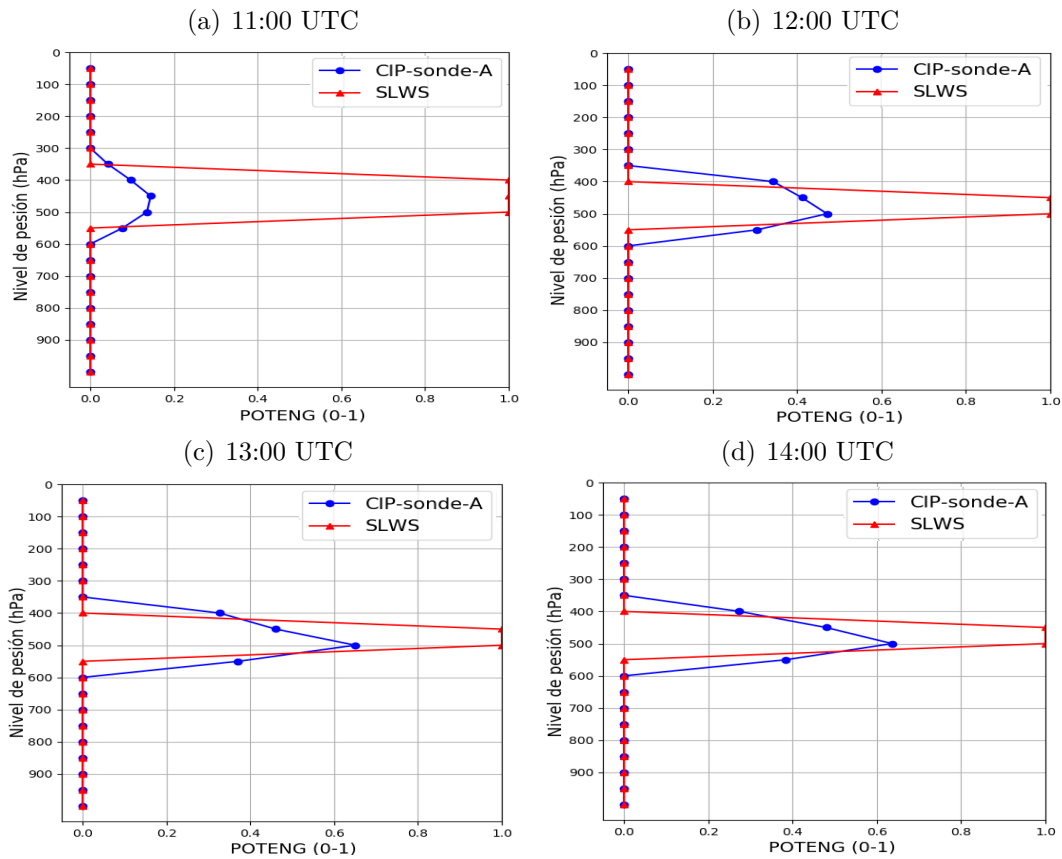


Figura 3.30: Evolución de perfil de POTENG entre las 11:00 UTC y las 14:00 UTC del 15 de octubre de 2015 según los algoritmos SLWS y CIP-sonde-A aplicados a los datos de reanálisis ERA-5.

3.2.5. Casos de estudio de no engelamiento

Se seleccionaron 4 casos en los cuales los sistemas de FDR no registraron el uso de sistemas de deshielo ni alertas por hielo en la aeronave. Estos eventos fueron seleccionados en épocas y ubicaciones similares a los 4 eventos de engelamiento analizados en la sección anterior, su ubicación se observa en la Figura 3.1, correspondientes a los casos 5, 6, 7 y 8. Las gráficas para estos casos de estudio se encuentran en las Figuras E.1 a E.29 del Anexo E.

El caso 5 ocurrió el día 24 de junio de 2018 a las 15:18 UTC, en el departamento del Magdalena, a 19075 ft (5814 m) de altitud, con coordenadas 9.86° N 74.41° W. Mediante los reportes METAR de Barranquilla, Santa Marta y Valledupar se observan condiciones con visibilidad mayor a 10 km, con nubosidad predominante dispersa o poca; solo en Barranquilla

se reporta un cielo fragmentado a 1500 ft (457 m), sin fenómenos peligrosos para la aviación reportados. Las condiciones sinópticas muestran el paso de ondas del este por el centro y norte del país, lo cual se confirma con el paso de grandes sistemas nubosos en la región Caribe, sin embargo, de acuerdo a cartas de viento e imágenes de satélite se observan vientos en 850 hPa de aproximadamente 15 nudos, y los sistemas en disipación. No se presentan rayos en el sector. Las imágenes satelitales muestran la evolución de un sistema convectivo en disipación sobre el área de interés. Con los datos de ERA-5 no se registra POTENG en el punto del evento para ninguno de los dos algoritmos, hasta las 16:00 UTC.

El caso 6 ocurrió el día 13 de marzo de 2016 a las 14:27 UTC en el departamento de Guaviare, con coordenadas 1.15° N 71.84W a 19039 ft (5803 m) de altitud. Las condiciones sinópticas muestran una vaguada al noroeste del país y a la ZCIT afectando al sur la región del Amazonas, visible en las imágenes satelitales, con un sistema convectivo presente en el área oeste del departamento del Caquetá. Sin embargo, el área de interés en este caso, no se encuentra afectada por nubosidad relevante ni rayos. El radiosondeo de Leticia evidencia alta humedad y la presencia de inversiones térmicas importantes en los niveles de 700 y 457 hPa. En los datos de ERA-5 tanto para CIP-sonde-A como para SLWS se observa potencial de engelamiento mayor a 0 en el sector, lo que se define como una falsa alarma. Para este caso no se encontraron registros METAR cercanos.

El caso 7 ocurrió el día 06 de marzo de 2016 a las 04:00 UTC, en el departamento del Valle del Cauca, coordenadas 4.06° N 76.22° W a 15884 ft (4841 m) de altitud. Los reportes METAR de Armenia y Cali muestran visibilidad mayor a 10 km y capas de nubes dispersas a 2000 ft (609 m) sin fenómenos relevantes. Las condiciones sinópticas muestran la presencia de una baja presión al norte de la región Pacífica y sur-oeste de la región Caribe, sin embargo, la imagen satelital a la hora del evento muestra condiciones secas en gran parte del territorio nacional. De igual manera, se presentan sistemas convectivos confirmados por presencia de rayos al norte y al sur de la posición del evento. Los datos ERA-5 no muestran POTENG con el algoritmo CIP-sonde-A, pero si con el algoritmo SLWS.

El caso 8 ocurrió el día 17 de octubre de 2016 a las 12:54 UTC, en el departamento de Santander, con coordenadas 6.48° N 73.28° W a 19011 ft de altitud. Los reportes METAR de Bucaramanga y Barrancabermeja reportan nubes pocas, dispersas y bancos de niebla sin ningún fenómeno relevante. Las cartas sinópticas muestran una baja presión en el centro del país, sin embargo, las imágenes satelitales muestran condiciones secas predominantes en el territorio nacional incluyendo el área de estudio. No se evidencian rayos en el sector y los datos de ERA-5 no registran POTENG a la hora del evento.

3.3. Conclusiones y Recomendaciones

La convección profunda influyó considerablemente en 3 de los 4 eventos de engelamiento analizados, por lo cual es importante recalcar la importancia de evitar zonas cercanas a este tipo de sistemas. Así mismo, los sistemas convectivos de mesoescala fueron un factor importante en eventos de engelamiento en sectores con terreno plano y con alta capacidad de maniobra como la región Caribe y la Amazonía. Estos sistemas pueden abarcar amplias zonas y llevar a los pilotos a ingresar a condiciones no deseadas. Las imágenes satelitales y la detección de rayos son herramientas apropiadas para localizar zonas afectadas en las rutas. En el caso de los eventos de no engelamiento no se detectaron rayos en ninguno de los casos.

La nubosidad por forzamiento orográfico fue un factor importante en los casos 3 y 4, en los cuales se observó fuerte influencia de la concentración de nubes en la cordillera, de acuerdo a análisis de vientos y nefoanálisis. Por tal razón, es importante que los pilotos ejerzan precaución al cruzar zonas con alta elevación, ya que esta nubosidad puede tapar rutas de entrada y salida hacia al destino, afectando de gran manera aeronaves con un techo limitado de operatividad.

Las cartas de superficie y vientos, fueron útiles para identificar áreas con mayor probabilidad de producción de sistemas convectivos. Se observa la influencia de las ondas del este en los casos 1 y 4, inversión de vientos en el pacífico, con afectación de orografía y acompañado de una baja presión en el en el caso 3, formación de complejos convectivos de mesoescala en los casos 1 y 2, así como el posicionamiento de la ZCIT en los casos 1, 2 y 4. En las cartas de viento para las áreas de interés de los 4 casos, se identificaron zonas convergentes con bajas intensidades de los vientos en niveles bajos.

Los reportes METAR son importantes para confirmar condiciones nubosas o fenómenos peligrosos cercanos a un evento de engelamiento y son útiles para la investigación de accidentes. En los casos de no engelamiento predominaron reportes de alta visibilidad y poca nubosidad.

En los 4 casos de no engelamiento se observaron condiciones considerablemente más secas o con sistemas convectivos relativamente más lejanos que en los eventos de engelamiento.

El algoritmo SLWS obtuvo buenos resultados para detección de engelamiento para los casos 2, 3 y 4, sin embargo, para el caso 1 no detectó el crecimiento de los sistemas en el área de interés. Por su parte el algoritmo CIP-sonde-A obtuvo buenos resultados para los casos 1,2 y 4, sin embargo, en el caso 3 tuvo dificultades para observar el POTENG.

El algoritmo CIP-sonde-A obtuvo mejores resultados, ya que en los eventos de no engelamiento, no indicó POTENG en 3 de 4 eventos; por el contrario, SLWS indicó POTENG en 2 de los 4 eventos de no engelamiento. CIP-sonde-A se ajustó mejor a las observaciones.

Capítulo 4

Desempeño de las Combinaciones WRF-CIP-sonde-A y WRF-SLWS en Casos de Estudio

4.1. Datos y Metodología

4.1.1. Datos

Se usaron los datos de salida del modelo WRF, configurado con los parámetros utilizados por la FAC (Anexo F), a partir de los datos de pronóstico del sistema de pronóstico global (GFS) de NOAA (2019). Los datos resultantes fueron utilizados para alimentar los algoritmos SLWS y CIP-sonde-A, las variables requeridas para cada algoritmo se encuentran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Variables requeridas de la salida del modelo para algoritmo SLWS y CIP-sonde-A.

Variable	Unidad	Algoritmo	
		CIP-sonde-A	SLWS
Relación de mezcla de agua de nube (Qcloud)	g^*Kg^{-1}		X
Relación de mezcla de agua de lluvia (Qrain)	g^*Kg^{-1}		X
Temperatura (T)	°C	X	X
Humedad Relativa (RH)	%	X	
Temperatura de tope de la nube (CTT)	°C	X	
Fracción de nube (CC)	%	X	

El pos-procesamiento de la salida del modelo se realizó mediante la librería WRF-Python (Ladwig, 2017), en el que las variables se interpolaron por niveles isobáricos, a excepción de la variable temperatura de tope de la nube. La variable fracción de nube está disponible para los niveles alto, medio y bajo, utilizando para este estudio el nivel intermedio.

Se usan los datos de la misión Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), una misión conjunta para estudiar la lluvia, entre NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA). Estos datos son el resultado del algoritmo TMPA (Multi-satellite Precipitation Analysis TRMM). Las características de los datos se encuentran en la Tabla 4.2 (TRMM, 2011).

Se utilizan las variables precipitación convectiva acumulada (RAINNC), precipitación no convectiva acumulada (RAINNC) y precipitación convectiva superficial (RAINSH) de la salida de las simulaciones del modelo WRF, para generar mapas de precipitación acumulada en las horas más cercanas al evento y realizar comparaciones con las imágenes TRMM, obteniendo otra fuente de comparación entre las observaciones y los resultados del modelo.

Tabla 4.2: Características de datos de imágenes satelitales TRMM.

Parámetro	Descripción
Formato	Netcdf
Cobertura Espacial	lon -180, lat -50 lon 180, lat 50
Cobertura Temporal	1997-12-31 a 2019-08-31
Resolución Espacial	0.25° x 0.25°
Resolución temporal	3 horas
Datos	Precipitación acumulada (mm)

4.1.2. Metodología

Los modelos de predicción numérica del tiempo son una herramienta utilizada en investigación para entender comportamientos de los fenómenos atmosféricos, que resuelven leyes y ecuaciones de la física atmosférica. WRF y otros modelos de mesoescala se han utilizado para el análisis de episodios de formación de hielo en aviones (Fernández *et al.*, 2014).

El modelo WRF es un sistema de predicción numérica del tiempo para simular las condiciones atmosféricas. Fue diseñado para dos funciones principales, investigación y aplicaciones de pronóstico. El modelo WRF es aplicable en un amplio rango de escalas espaciales, desde metros a miles de kilómetros.

Con este modelo se pueden producir simulaciones basadas en condiciones atmosféricas reales o condiciones idealizadas y contiene los avances recientes en física y asimilación de datos aportados por los desarrolladores de la comunidad de investigación (UCAR, 2018). A diferencia de los modelos globales, WRF es un modelo regional, esto significa que recrea el comportamiento de la atmósfera para una región seleccionada por el usuario; además, tiene la capacidad de generar reducción de escala espacial y temporal, tomando como entrada datos de modelos globales, aumentando así la resolución de los resultados, este proceso es llamado Downscaling Dinámico.

El modelo WRF inicia con los datos del modelo global seleccionado y las observaciones, los datos se procesan en el WRF Preprocessing system (WPS), ajustando los datos meteorológicos

y de geografía al dominio que el usuario a configurado, posteriormente el Advanced Research WRF (ARW) resuelve las ecuaciones mencionadas anteriormente y las parametrizaciones seleccionadas.

La FAC utiliza a diario el modelo WRF como herramienta base operacional para sus diferentes misiones, tales como pronóstico y análisis de eventos. Se realizan cuatro corridas operativas al día, usando como entrada los datos de pronóstico del modelo GFS. Para este análisis se utiliza la versión 4.0 del modelo WRF, con la configuración utilizada por la FAC, se usará el dominio que se observa en la Figura 4.1, con una resolución de 9 km. Las características generales de los modelos GFS y WRF se encuentran en la Tabla 4.3.

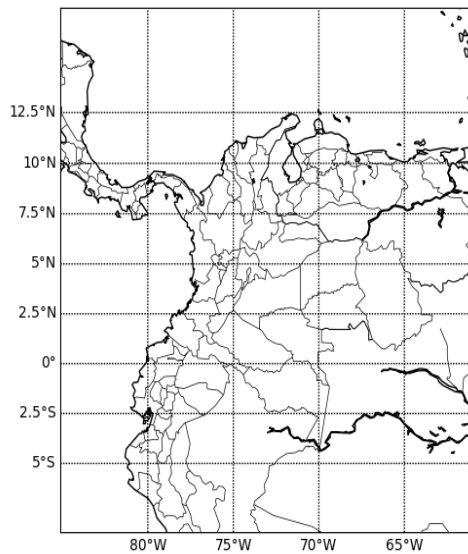


Figura 4.1: Dominio 01 del WRF para este estudio.

El modelo WRF considera parametrizaciones que contienen procesos físicos de manera simplificada. Para este caso, en la configuración de la FAC, se utiliza el esquema de microfísica MP8 de Thompson (Thompson *et al.*, 2008). Las otras parametrizaciones en la configuración del modelo se pueden en el Anexo F.

Para la aplicación de los algoritmos SLWS y CIP-sonde-A, se utilizaron las salidas de pronóstico del WRF con resolución horaria, variando las horas de inicio de la simulación cada 6 horas y hasta 2 días atrás de la hora del evento. Lo anterior con el fin de observar la variación del pronóstico con el cambio de las condiciones iniciales e identificar posibles mejores resultados. La primera simulación se realizó al menos 6 horas antes de la hora del evento, para

evitar errores generados por la asimilación de las condiciones iniciales y ruido que pueden representar perturbaciones atmosféricas, conllevando a pronósticos poco realistas durante las primeras horas (Peckham *et al.*, 2016).

Tabla 4.3: Características del modelo WRF y de los datos GFS usados en este estudio.

Modelo GFS	
Parámetro	Descripción
Resolución espacial	0,5°
Resolución Temporal	3 h
Hora inicial	00, 06, 12, 18(UTC)
Salida Modelo WRF	
Parámetro	Descripción
Versión	4.0
Solver Dinámico	ARW
Resolución espacial Salida	9km
Resolución temporal Salida	1 h

Tomando en cuenta que se utilizó el modelo sin asimilación de datos a escala regional, difícilmente se reproducen las condiciones exactas en la caja de grilla más cercana a la ubicación del evento. Además, se debe recordar que los reportes de aeronaves y registros FDR pueden tener pequeñas variaciones en la ubicación exacta en la que se presentó el engelamiento. Por lo anterior, se utiliza una metodología basada en la manera tradicional para calcular Probabilidad de Precipitación (PdP), utilizada por National Weather Service (NWS) de forma rutinaria.

El método para obtener PdP consiste en calcular la probabilidad de ocurrencia de precipitación en cualquier punto de un área determinada. Matemáticamente PdP se define de acuerdo a la Ecuación 4.1, donde “C” es la probabilidad de que suceda precipitación en algún lugar del área de pronóstico y “A” el porcentaje de área que recibirá precipitación, si ésta ocurre (NWS, 2019).

$$PdP = C \times A \quad (4.1)$$

Para este estudio se calculó la Probabilidad de Engelamiento (PdE) de la misma manera. La variable “C” es el valor de POTENG calculado por cada algoritmo, sin embargo, se debe recordar que SLWS solo emite un diagnóstico binario de 0 o 1, generándose 1 solamente en caso de existir ALS mayor a 0.001 g/kg en el ambiente. Por lo tanto, para CIP-sonde-A se establecieron equivalencias binarias similares, 0 en caso de tener POTENG menor a 0.01 y 1 si el POTENG es mayor a 0.01. Por otro lado, el valor de “A” es el porcentaje de área

donde se detectó engelamiento en un área determinada. De acuerdo a lo anterior, el PdE será superior para el algoritmo que capte mayor porcentaje de área con POTENG sobre los sectores establecidas.

Adicionalmente, se definieron 3 áreas para observar los resultados del modelo, centradas en la caja de grilla con las coordenadas más cercanas a la ubicación exacta en la que se reportó el evento. Verticalmente, para cada área seleccionada se abarcan los niveles que, de acuerdo a la climatología, mostraron POTENG, es decir, los niveles isobáricos de 350, 400, 450, 500, 550, 600 hPa. Considerando que se cuenta con una salida con resolución espacial de 9 km, horizontalmente el área 1 corresponde a 3 cajas de grilla desde la coordenada más cercana al evento, conformando una cuadrícula de 6*6 de 50 km *50 km aproximadamente, correspondiente a un radio cercano a 27 km alrededor del punto. Así mismo se establecieron las áreas 2 y 3, con un aproximado de 100 km *100 km y 200 km *200 km, con 6 y 11 cajas de grilla alrededor de cada evento respectivamente. Las áreas definidas horizontalmente para un evento específico, se pueden ver la Figura 4.2.

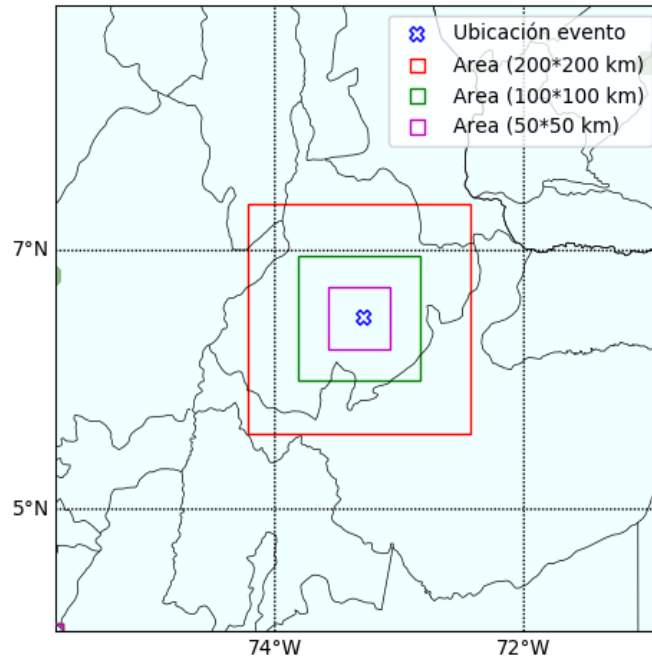


Figura 4.2: Áreas definidas para estimación de PdE.

Se analizaron los 8 casos del capítulo anterior, 4 de engelamiento y 4 de no engelamiento. Para cada evento se compararon los resultados de las simulaciones, variando 9 veces la hora inicial hasta 54 horas antes del evento. Los resultados de las simulaciones para cada área y cada algoritmo se analizaron por medio de tablas de contingencia de acuerdo con la metodología presentada en el capítulo 2 y Wilks (2006). Así mismo, se seleccionaron para cada caso las

simulaciones con mayor y menor PdE, teniendo en cuenta los dos algoritmos utilizados, con la intención de compararlos con los resultados del capítulo 3, las observaciones de precipitación acumulada para 3 horas provenientes del satélite TRMM y la precipitación simulada por WRF para el mismo periodo de tiempo. La precipitación TRMM corresponde a la observación más cercana a la existencia de agua líquida en altura en las horas cercanas al evento, sin embargo, se debe tener en cuenta que no siempre que se produce engelamiento existe precipitación.

Para los algoritmos de engelamiento, se generaron mapas de POTENG, donde se utilizaron rangos de intensidad solo para diferenciar los valores resultantes. La intensidad de los algoritmos se dividió en 4 rangos de valores: No engelamiento, ligero (Lig), moderado (Mod) y severo (Sev), Tabla 4.4. Se aclara que en este estudio no se realizaron pruebas de intensidades ni tipos de hielo, ya que esto depende de muchas variables, entre estas, el tipo y tamaño de las aeronaves. Adicionalmente, no hay reportes de intensidad o tipo de hielo suficientes para hacer un análisis estadístico, para lo cual sería más pertinente el uso de vuelos de investigación.

Tabla 4.4: Rangos de intensidad para algoritmos de detección

Intensidad	Rango de intensidad algoritmo	
	CIP-sonde-A	SLWS
Severo	$POTENG \geq 0.4$	$CAL \geq 0.3 \text{ g/kg}$
Moderado	$0.4 > POTENG \geq 0.15$	$0.3 > CAL \geq 0.1 \text{ g/kg}$
Ligero	$0.15 > POTENG \geq 0.01$	$0.1 > CAL \geq 0.001 \text{ g/kg}$
No engelamiento	$POTENG < 0.01$	$CAL < 0.001$

4.2. Discusión y Resultados

Para iniciar el análisis y brindar un diagnóstico de la capacidad del modelo para detectar POTENG en los casos de estudio, se revisan los resultados de las tablas de contingencia para cada área y algoritmo.

El área 1 es la que menor error espacial le permite a los algoritmos, sus resultados se pueden observar para CIP-sonde-A en la Tabla 4.5 y para SLWS en la Tabla 4.6. El indicador PC para CIP-sonde-A es de 0.48, levemente mayor al de SLWS con 0.45, esto indica que los dos algoritmos en el área 1 aciertan un porcentaje de pronósticos similar, tanto para los eventos de engelamiento como para no engelamiento, siendo CIP-sonde-A mejor. El indicador H para el área 1 indica que evaluando sólo la capacidad de pronóstico para eventos de engelamiento, CIP-sonde-A se comporta mejor con un valor de 0.58, mientras que SLWS solo logra un valor de 0.27.

Tabla 4.5: Tabla de contingencia de resultados de simulaciones con WRF para los 8 casos de estudio para el área 1 mediante algoritmo CIP-sonde-A.

		Total Simulaciones			Resultados	
		Engelamiento	No engelamiento		Indice	Valor
Detección CIP-sonde-A	PdE	a=21	b=22	a+b=43	PC	0.48
	No PdE	c=15	d=14	c+d=29	H	0.58
		a+c=36	b+d=36	n=72	FAR	0.51
					F	0.61
					BIAS	1.19

Tabla 4.6: Tabla de contingencia de resultados de simulaciones con WRF para los 8 casos de estudio para el área 1 mediante algoritmo SLWS.

		Total Simulaciones			Resultados	
		Engelamiento	No engelamiento		Indice	Valor
Detección SLWS	PdE	a=10	b=13	a+b=23	PC	0.45
	No PdE	c=26	d=23	c+d=49	H	0.27
		a+c=36	b+d=36	n=72	FAR	0.56
					F	0.36
					BIAS	0.63

El índice FAR para CIP-sonde-A tiene un valor de 0.51, indicando que se generaron prácticamente la misma cantidad de aciertos que de falsas Alarmas. SLWS tiene un valor de 0.56, reportando un mayor fallo que CIP-sonde-A, con respecto a todos los eventos pronosticados con engelamiento. Así mismo, el índice F revela que existió un mayor porcentaje de falsas alarmas con respecto a los eventos de no engelamiento para CIP-sonde-A, con un valor de 0.61, mientras que SLWS tiene un valor de 0.36. Finalmente, el índice B, muestra que CIP-sonde-A pronosticó con más frecuencia de lo que realmente ocurrió, con un valor de 1.19 y una diferencia de 0.19 del valor ideal, por el contrario, SLWS subestimo al obtener un valor de 0.63, 0.37 por debajo del valor ideal.

En la Figura 4.3, se evidencia que los dos algoritmos dieron como resultados puntajes de habilidad negativos, sin embargo, CIP-sonde-A reporta en todos los puntajes valores más cercanos a 0 que SLWS, obteniendo mejores resultados.

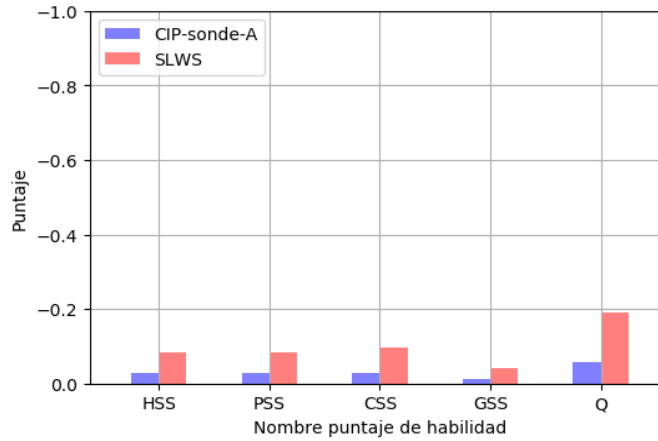


Figura 4.3: Puntajes de habilidad para detección de eventos de engelamiento en aeronaves en el área 1, para los algoritmos CIP-sonde-A y SLWS a partir de la salida del modelo WRF.

Teniendo en cuenta los valores analizados en los párrafos anteriores con respecto al área 1, CIP-sonde-A obtiene los mejores resultados, ya que sobrestima en menor proporción respecto a la subestimación que evidencia SLWS y obtiene mejores valores en los puntajes de habilidad, advirtiendo que los algoritmos no fueron eficientes para esta área.

Para el área 2 se observaron los resultados para CIP-sonde-A y SLWS, de acuerdo a las Tablas 4.7 y 4.8, respectivamente. El indicador PC para CIP-sonde-A es de 0.62, mayor al de SLWS con 0.56, evidenciando que CIP-sonde-A tiene mayor acierto en la suma de los pronósticos de engelamiento y no engelamiento. El indicador H para el área 2 revela que CIP-sonde-A logra detectar el PdE con mayor frecuencia que SLWS para los casos de engelamiento, con valores 0.91 para CIP-sonde-A y 0.58 para SLWS.

El índice FAR para el área 2 muestra un valor para CIP-sonde-A de 0.42 y un valor de 0.44 para SLWS, lo que indica que los algoritmos tienen un valor similar de simulaciones que pronosticaron erróneamente la existencia de engelamiento. El índice F evidencia que existió un mayor porcentaje de falsas alarmas en los eventos de no engelamiento para CIP-sonde-A, con un valor de 0.66, mientras que SLWS tiene un valor de 0.44. Por último, el índice B revela que CIP-sonde-A pronosticó con más frecuencia de lo que realmente ocurrió, con un valor de 1.58 y una diferencia de 0.58 del valor ideal. Por el contrario, SLWS subestimó al obtener un valor de 0.55, 0.45 por debajo del valor ideal.

Dados estos resultados para el área 2, los dos algoritmos presentan deficiencias, ya que CIP-sonde-A sobrestima PdE mientras que SLWS lo subestima; además, el índice B indica que la sobrestimación de CIP-sonde-A es mayor que la subestimación de SLWS, sin embargo, conforme a los resultados de los puntajes de habilidad en la figura 4.4, se evidencian mejores

valores para CIP-sonde-A que para SLWS, al estar más cercanos a 1.

Tabla 4.7: Tabla de contingencia de resultados de simulaciones con WRF para los 8 casos de estudio para el área 2 mediante algoritmo CIP-sonde-A.

		Total Simulaciones			Resultados	
		Engelamiento	No engelamiento		Indice	Valor
Detección CIP-sonde-A	PdE	a=33	b=24	a+b=56	PC	0.62
	No PdE	c=3	d=12	c+d=15	H	0.91
		a+c=36	b+d=36	n=72	FAR	0.42
					F	0.66
					BIAS	1.58

Tabla 4.8: Tabla de contingencia de resultados de simulaciones con WRF para los 8 casos de estudio para el área 2 mediante algoritmo SLWS.

		Total Simulaciones			Resultados	
		Engelamiento	No engelamiento		Indice	Valor
Detección SLWS	PdE	a=21	b=16	a+b=37	PC	0.56
	No PdE	c=15	d=20	c+d=35	H	0.58
		a+c=36	b+d=36	n=72	FAR	0.43
					F	0.44
					BIAS	0.44

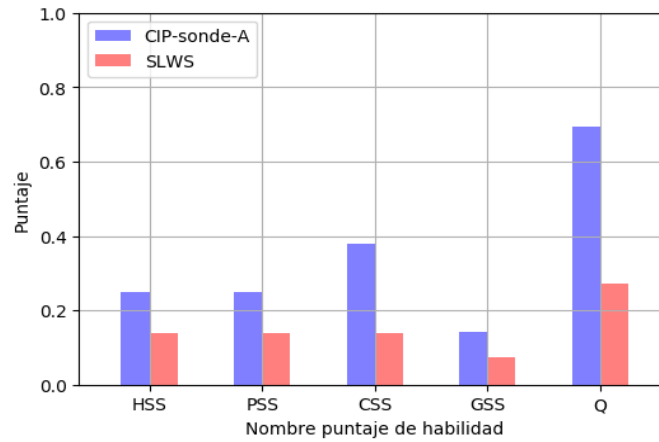


Figura 4.4: Puntajes de habilidad para detección de eventos de engelamiento en aeronaves en el área 2, para los algoritmos CIP-sonde-A y SLWS a partir de la salida del modelo WRF.

Según los resultados registrados en las Tablas 4.9 para CIP-sonde-A y 4.10 para SLWS. En el Área 3 se observa que el indicador PC para CIP-sonde-A es de 0.62, menor al de SLWS con 0.69, lo que indica que SLWS acertó ligeramente más que CIP-sonde-A en los pronósticos tanto de engelamiento como no engelamiento. También se encuentra que el indicador H para el área 3 logra un valor de 1 en CIP-sonde-A, mientras que para SLWS, H tiene un valor de 0.87.

El índice FAR para el área 3 muestra un valor para CIP-sonde-A de 0.42 y un valor de 0.36 para SLWS. El índice F indica que existió un mayor porcentaje de falsas alarmas para los casos de no engelamiento, para CIP-sonde-A con un valor de 0.75, mientras que SLWS tiene un valor 0.52. Por último, el índice B muestra que CIP-sonde-A y SLWS pronosticaron engelamiento con más frecuencia respecto a la realidad, con valores de 1.75 y 1.4 respectivamente.

Los puntajes de habilidad también evidencian mejores resultados para SLWS en el área 3, ya que 3 de estos muestran valores más altos que CIP-sonde-A.

Teniendo en cuenta lo anterior para el área 3, SLWS logra reconocer con relativa mayor eficiencia el PdE que CIP-sonde-A, implicando que, para detectar que PdE aproximadamente 100 km al rededor del evento, SLWS sobrestimaría, aunque de menor manera que CIP-sonde-A. Sin embargo, este último logra obtener mayor precisión espacial que SLWS en áreas más pequeñas.

Tabla 4.9: Tabla de contingencia de resultados de simulaciones con WRF para los 8 casos de estudio para el área 3 mediante algoritmo CIP-sonde-A.

		Total Simulaciones			Resultados	
		Engelamiento	No engelamiento		Indice	Valor
Detección CIP-sonde-A	PdE	a=36	b=27	a+b=63	PC	0.62
	No PdE	c=0	d=9	c+d=9	H	1
		a+c=36	b+d=36	n=72	FAR	0.42
					F	0.75
					BIAS	1.75

Tabla 4.10: Tabla de contingencia de resultados de simulaciones con WRF para los 8 casos de estudio para el área 3 mediante algoritmo SLWS.

		Total Simulaciones		
		Engelamiento	No engelamiento	
Detección SLWS	PdE	a=33	b=19	a+b=52
	No PdE	c=3	d=17	c+d=20
		a+c=36	b+d=36	n=72

Resultados	
Indice	Valor
PC	0.69
H	0.87
FAR	0.36
F	0.52
BIAS	1.4

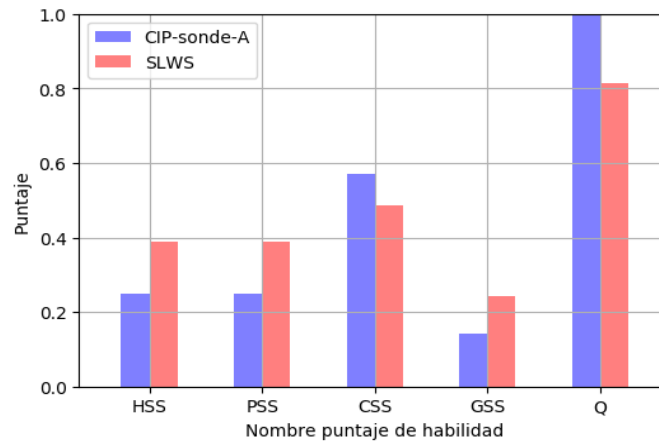


Figura 4.5: Puntajes de habilidad para detección de eventos de engelamiento en aeronaves en el área 3, para los algoritmos CIP-sonde-A y SLWS a partir de la salida del modelo WRF.

A continuación, se describen las características de las simulaciones que representaron mayor y menor PdE para cada evento y su análisis con respecto a las observaciones de las imágenes de satélite TRMM y del capítulo 3. En los Anexos G y H se observan los resultados para todas las simulaciones correspondientes a cada caso.

4.2.1. Casos de engelamiento

4.2.1.1. Caso 1

Fueron analizadas las simulaciones para las 19:00 UTC del día 31 de julio de 2015 para el caso 1. En la Figura 4.6, se observa el porcentaje de detección del área total para todos los

niveles en los dos algoritmos. En el área 1, se detecta PdE solo para la simulación iniciada el día 30 de julio a las 00:00 UTC en los dos algoritmos, SLWS detectó un 2.7 % del área, mientras que CIP-sonde-A detectó aproximadamente un 1.7 %. Adicionalmente, en la simulación también detectaron porcentajes altos en las áreas 2 y 3. Para las cuales se observa detección de PdE en todas las simulaciones, a excepción del área 2 donde las simulaciones iniciadas el día 31 a las 00:00 y 06:00 UTC no presentaron PdE. Los porcentajes más bajos se observan en la simulación iniciada el día 31 a las 00:00 UTC.

La simulación para el día 31 a las 12:00, hora de inicio más cercana a la hora del evento, obtuvo porcentajes importantes de detección en las áreas 2 y 3. A nivel general, los algoritmos se comportaron similarmente, sin embargo CIP-sonde-A detecta porcentajes mayores que SLWS.

En la Figura 4.7 se observa el porcentaje de detección de PdE para cada área en cada nivel por separado y para los dos algoritmos en todas las simulaciones. Se evidencia que los niveles con mayor PdE para son 500 hPa y 550 hPa.

La Figura 4.8 describe la evolución de PdE en el tiempo para todas las simulaciones en cada área de detección. Se observa que CIP-sonde-A aplicado a la simulación con inicio 31 a las 12:00 UTC, reporta un PdE a las 19:00 UTC, considerablemente más bajo que el de las 16:00 UTC. Sin embargo, es de resaltar que, para las simulaciones iniciadas el día 30 a las 00:00 UTC y el 31 a las 12:00 UTC hay un aumento de PdE a las 19:00 UTC, hora en la que se registró el evento. También se observa ese mismo incremento para SLWS aplicado a las mismas simulaciones.

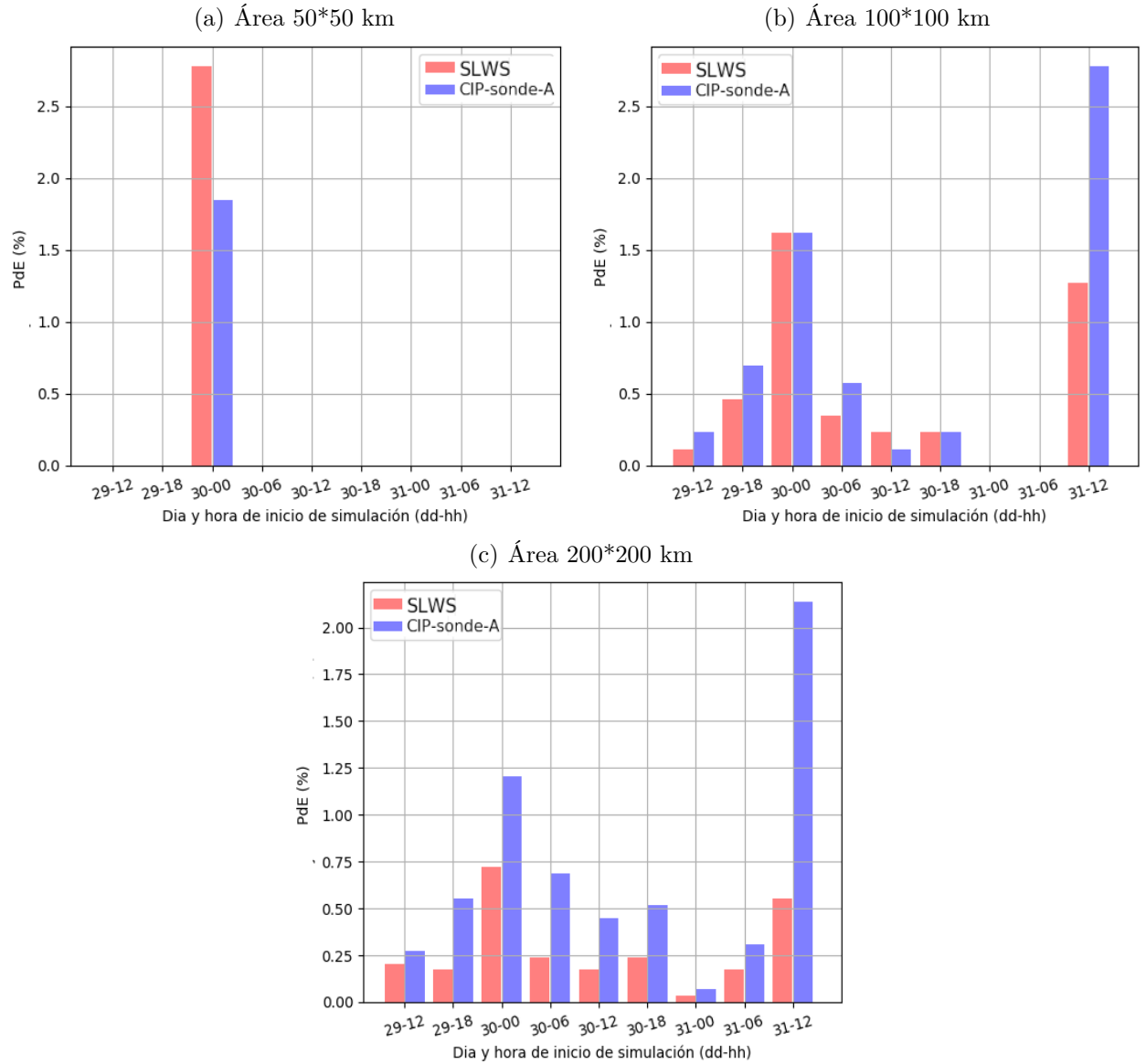


Figura 4.6: PdE para el 31 de julio de 2015 a las 19:00 UTC (caso 1) en función de la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones. PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS para todos los niveles entre 600 y 350 hpa y para el (a) área 1, (b) área 2 y (c) área 3.

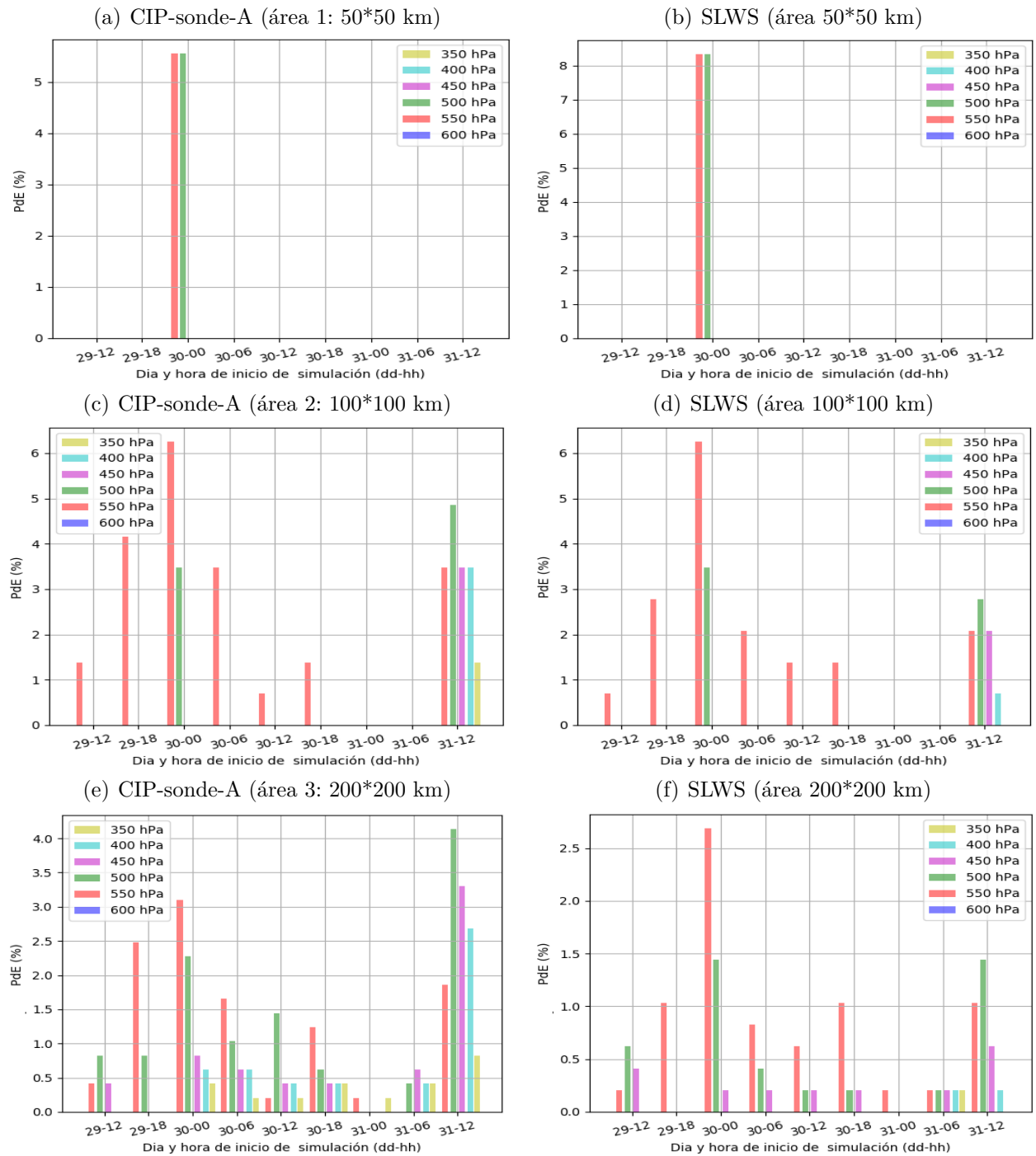


Figura 4.7: PdE para el 31 de julio de 2015 a las 19:00 UTC (caso 1) en función a la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones y el nivel de presión.

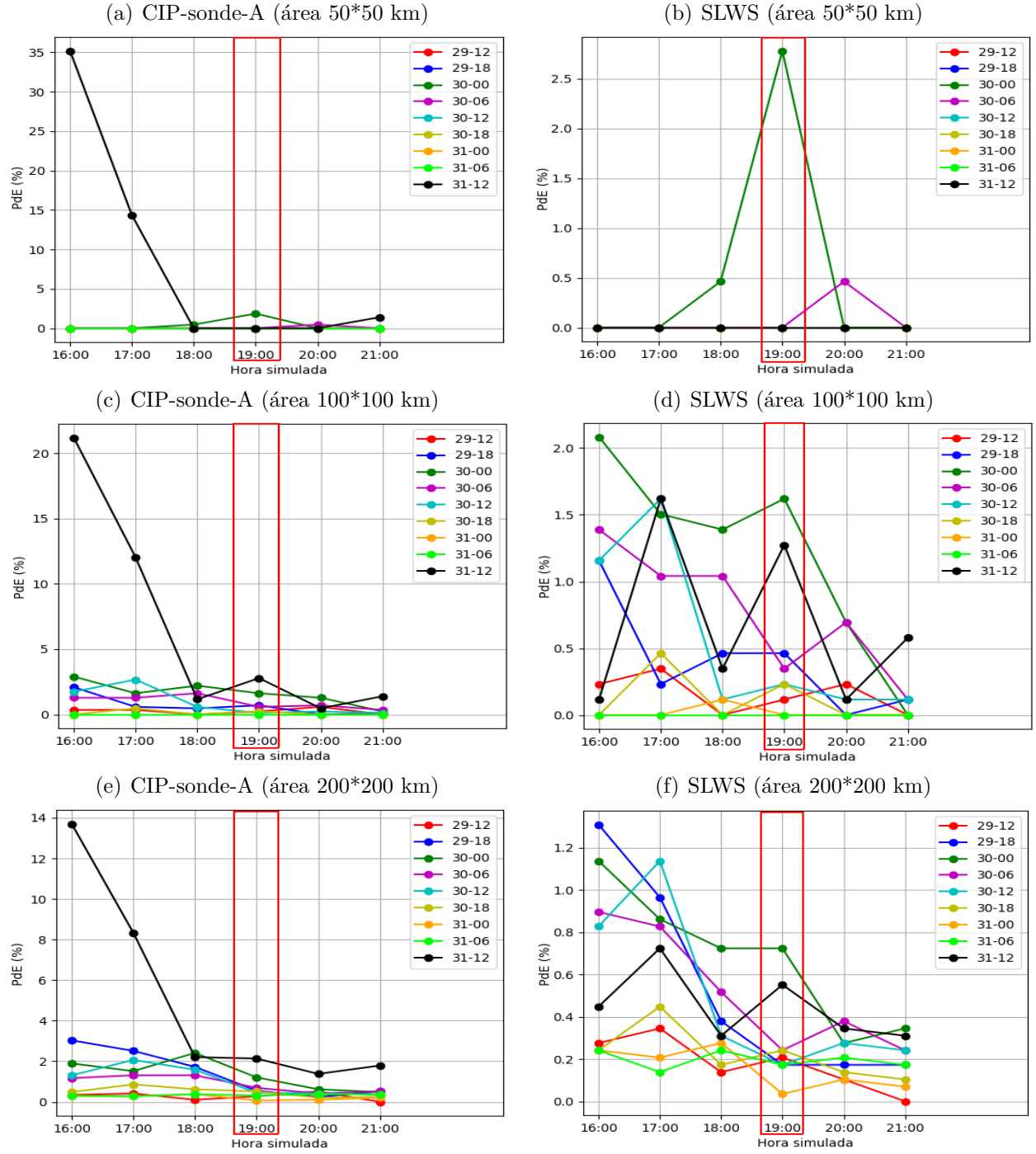


Figura 4.8: Evolución temporal de PdE para el 31 de julio de 2015 (caso 1). El PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS aplicado a las 9 simulaciones para cada una de las tres áreas y todos los niveles entre 600 y 350 hPa.

La simulación del día 30 a las 00:00 UTC, fue seleccionada como la que detectó PdE más cerca a la ubicación del evento y la segunda de mayor área de detección, esta simulación corresponde a un día y 19 horas antes de que sucediera el evento. La Figura 4.9, muestra que la precipitación acumulada calculada por WRF subestima la precipitación al compararla con respecto a las imágenes satelitales TRMM. A pesar de esto, la detección de POTENG por los algoritmos es buena, teniendo en cuenta los sistemas presentes en las observaciones analizadas en el capítulo 3. Los dos algoritmos exhiben dos núcleos pequeños al norte y este del evento, en distancias aproximadas de 25 y 50 km aproximadamente. Cabe aclarar que la simulación con hora de inicio más cercana al suceso, arrojó los segundos mejores resultados y se puede observar en las imágenes del Anexo G.

Por otro lado, la simulación que menos muestra PdE, fue la iniciada el día 31 a las 00:00 UTC. En la Figura 4.10, hacia el norte son visibles núcleos muy pequeños y alejados de la coordenada del suceso. Considerando las observaciones de imágenes satelitales y rayos realizadas en el capítulo 3, además de las imágenes de precipitación de TRMM, se considera que es una simulación no coincidente.

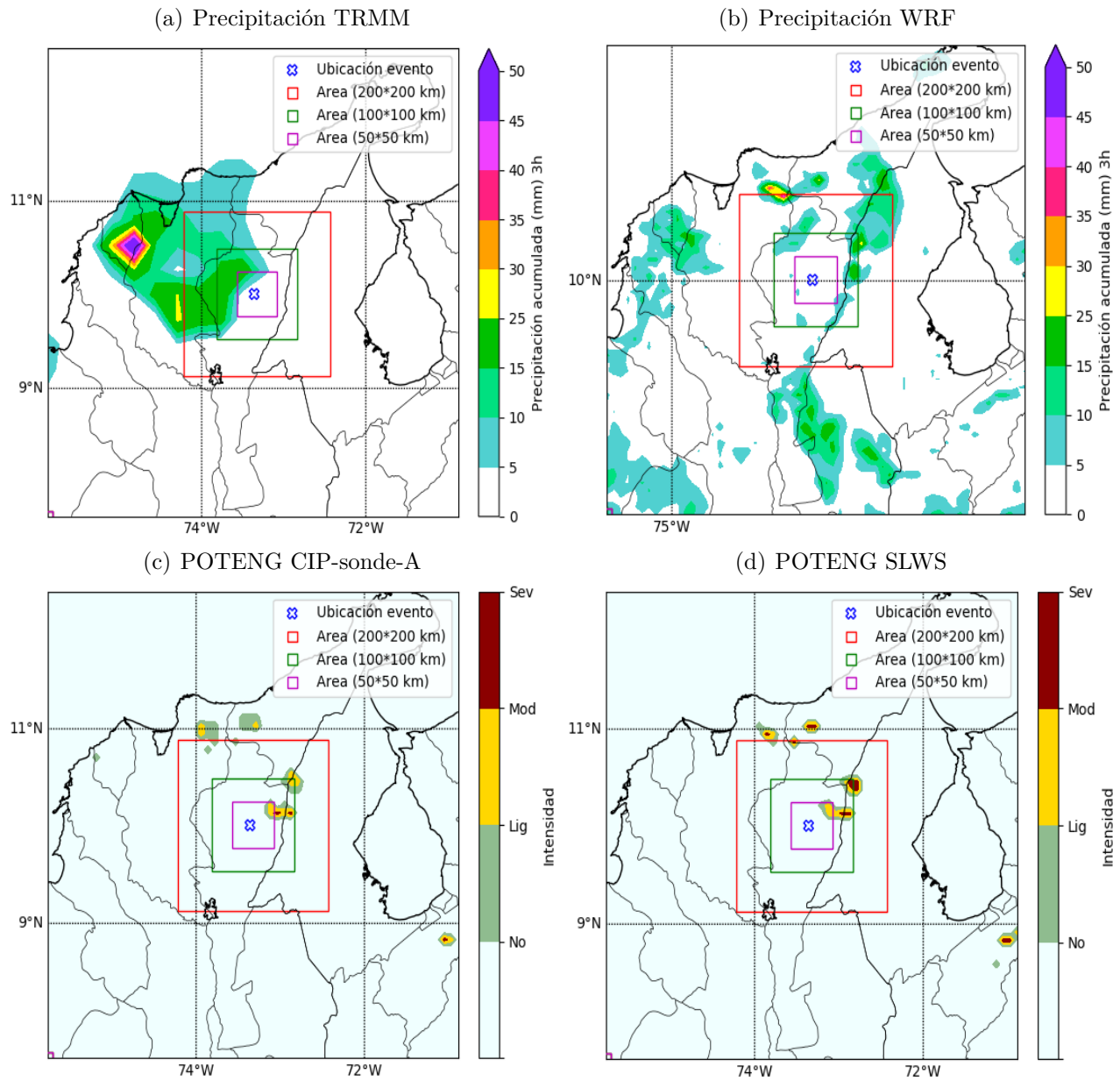


Figura 4.9: Precipitación acumulada entre las 19:00 y 21:00 UTC del 31 de julio de 2015 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 19:00 UTC (caso 1) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 550 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 30 de julio a las 00:00 UTC. simulación que más PdE muestra y catalogada como la mejor.

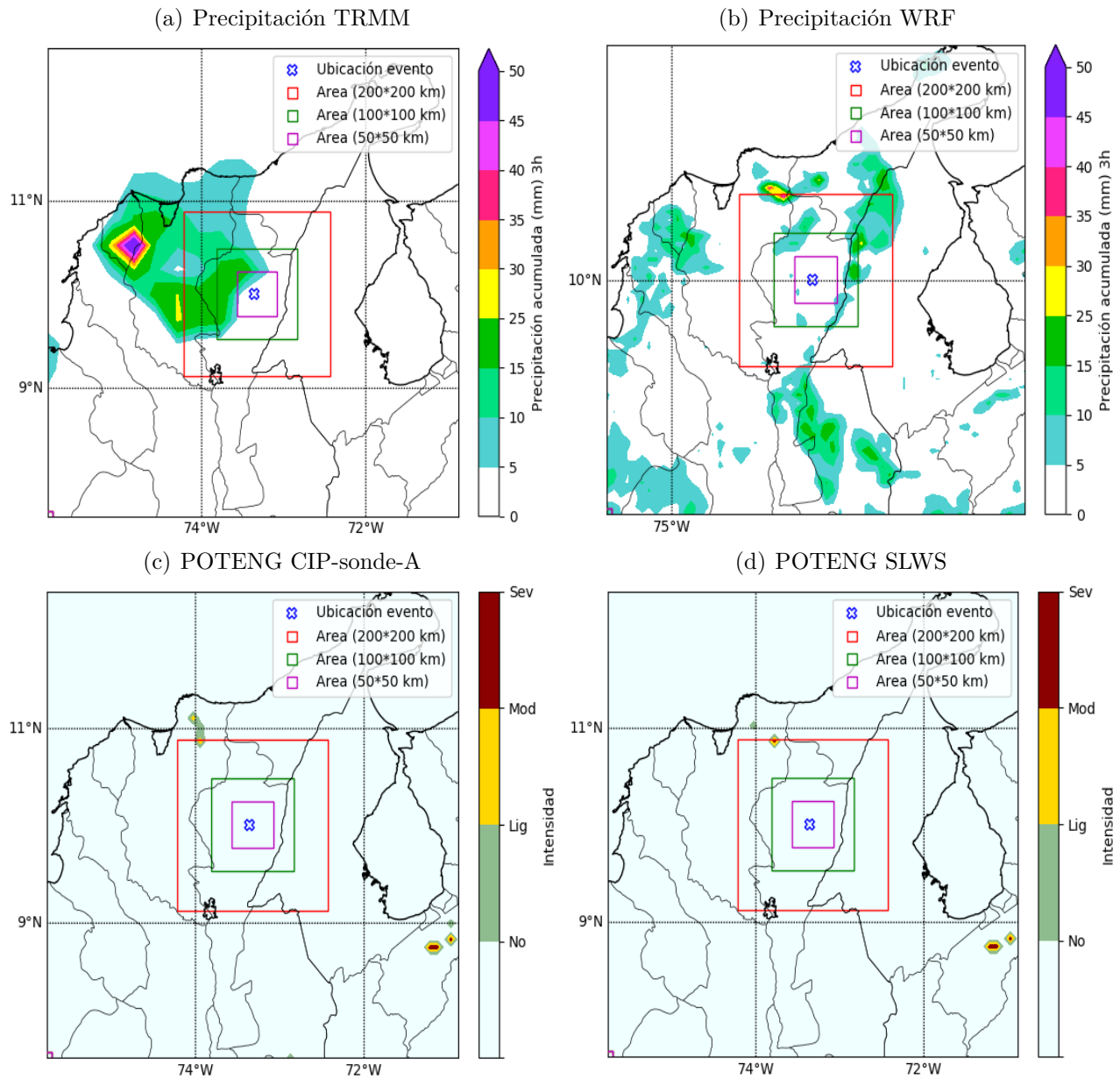


Figura 4.10: Precipitación acumulada entre las 19:00 y 21:00 UTC del 31 de julio de 2015 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 19:00 UTC (caso 1) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 550 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 31 de julio a las 00:00 UTC. simulación que menos PdE muestra y catalogada como la peor.

4.2.1.2. Caso 2

Para este caso, fueron analizadas las simulaciones para las 23:00 UTC del día 15 de marzo de 2016. En la Figura 4.11, se observa que CIP-sonde-A detecta mayor porcentaje de PdE en las 3 áreas. En el área 1 CIP-sonde-A aplicado a la simulación del 13 de marzo a las 18:00 UTC, produjo un PdE de 75 %, en cambio SLWS arrojó un valor de PdE de apenas 18 %.

La simulación iniciada el día 13 a las 18 UTC es la que mayor área detecta a nivel general, contrario a la simulación del día 15 a las 06:00 UTC en la que se evidencia la menor detección. Adicionalmente, se encuentra que cuando se aplica CIP-sonde-A a las simulaciones realizadas al menos 24 horas antes, se obtienen mejores resultados que las que se ejecutan el mismo día del evento. Cuando se aplica SLWS a las simulaciones del día antes y el mismo día del evento los valores de PdE son cero.

La simulación del día 15 a las 12:00 UTC, es la que tiene hora de inicio más cercana a la ocurrencia evento, sin embargo, no logra detectar englamamiento con el algoritmo SLWS, contrario a CIP-sonde-A, que detecta un porcentaje de 4 % para el área 2 y de 12 % para el área 3. En la Figura 4.12 se discrimina el porcentaje de detección de PdE para cada área y cada nivel en todas las simulaciones de los dos algoritmos. Se evidencia que los niveles con mayor PdE para el evento, son los niveles 500, 450 y 400 hPa cuando se usa el algoritmo CIP-sonde-A y 500 y 450 hPa cuando se usa SLWS.

La evolución de PdE en el tiempo de cada área de detección y para cada simulación, se puede observar en la Figura 4.13. En las simulaciones que detectaron PdE, hay un incremento del valor a la hora del evento con respecto a las horas anteriores.

La simulación que más detectó PdE tiene hora de inicio a las 18:00 UTC el día 13 de marzo, dos días y 5 horas antes de que se registrara el evento. La imagen satelital TRMM, Figura 4.14, muestra la presencia de alta precipitación al nor-oeste de la localización en la que se reportó el evento, coincidente con los sistemas detectados en el capítulo anterior. Los resultados de precipitación acumulada del modelo muestran una sobrestimación sobre el área del evento, aunque también hubo precipitación de menor intensidad cerca a la ubicación del sistema predominante. El algoritmo CIP-sonde-A muestra valores altos del POTENG sobre el punto de interés y también detecta el sistema del norte. Por su parte SLWS también detecta POTENG sobre el punto de interés y en zonas cercanas, aunque en una extensión mucho menor.

La simulación que menos muestra PdE, tiene hora de inicio a las 06:00 UTC del día 15 de marzo. En la Figura 4.15 se encuentra que la precipitación acumulada estimada por el modelo no logra reproducir el sistema del norte y solo muestra precipitación al oeste de la ubicación del evento. De manera similar, CIP-sonde-A solo logra detectar POTENG al sureste

del evento. Por último, SLWS no logra detectar POTENG.

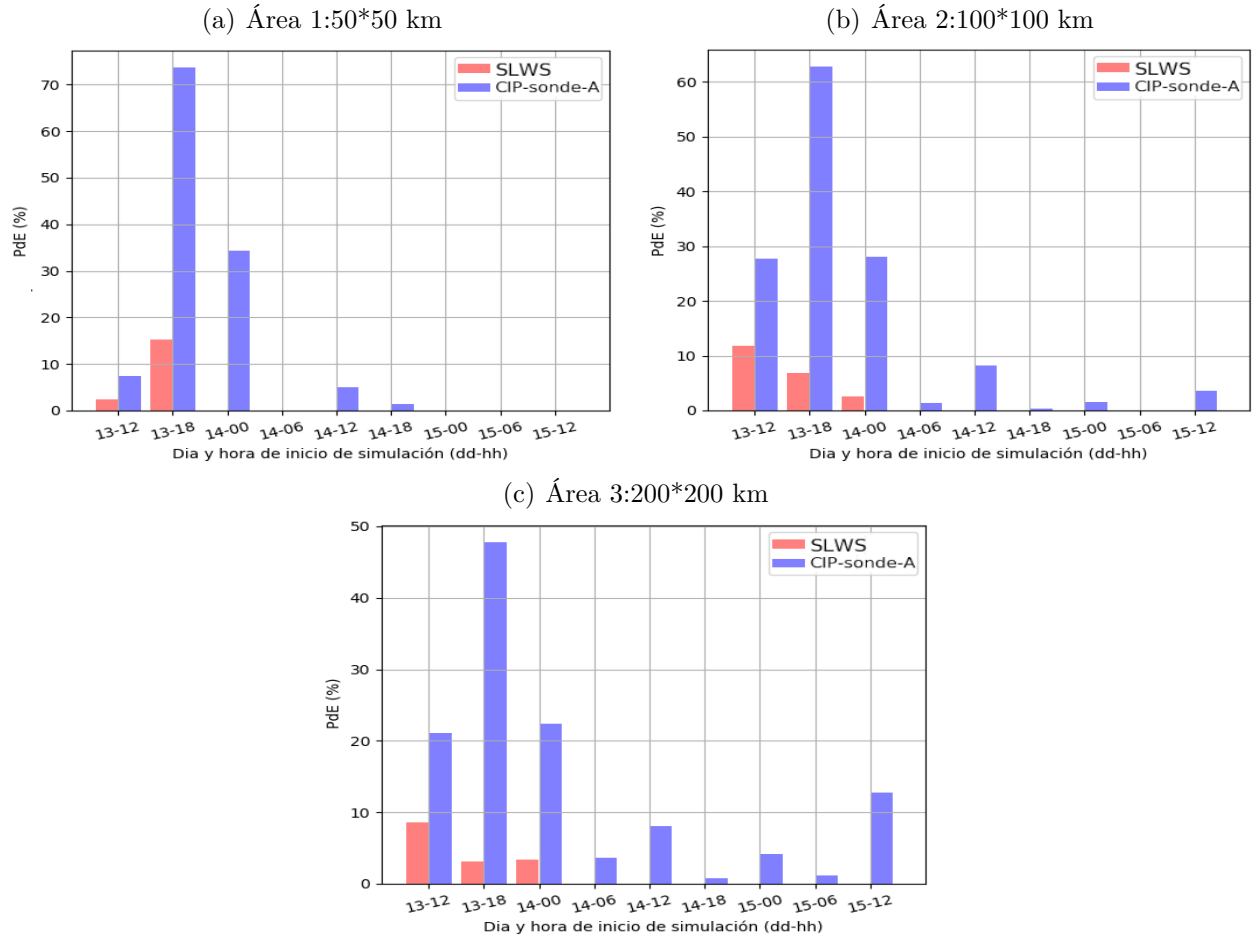


Figura 4.11: PdE para el 15 de marzo de 2016 a las 23:00 UTC (caso 2) en función de la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones. PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS para todos los niveles ente 600 y 350 hpa y para el (a) área 1, (b) área 2 y (c) área 3.

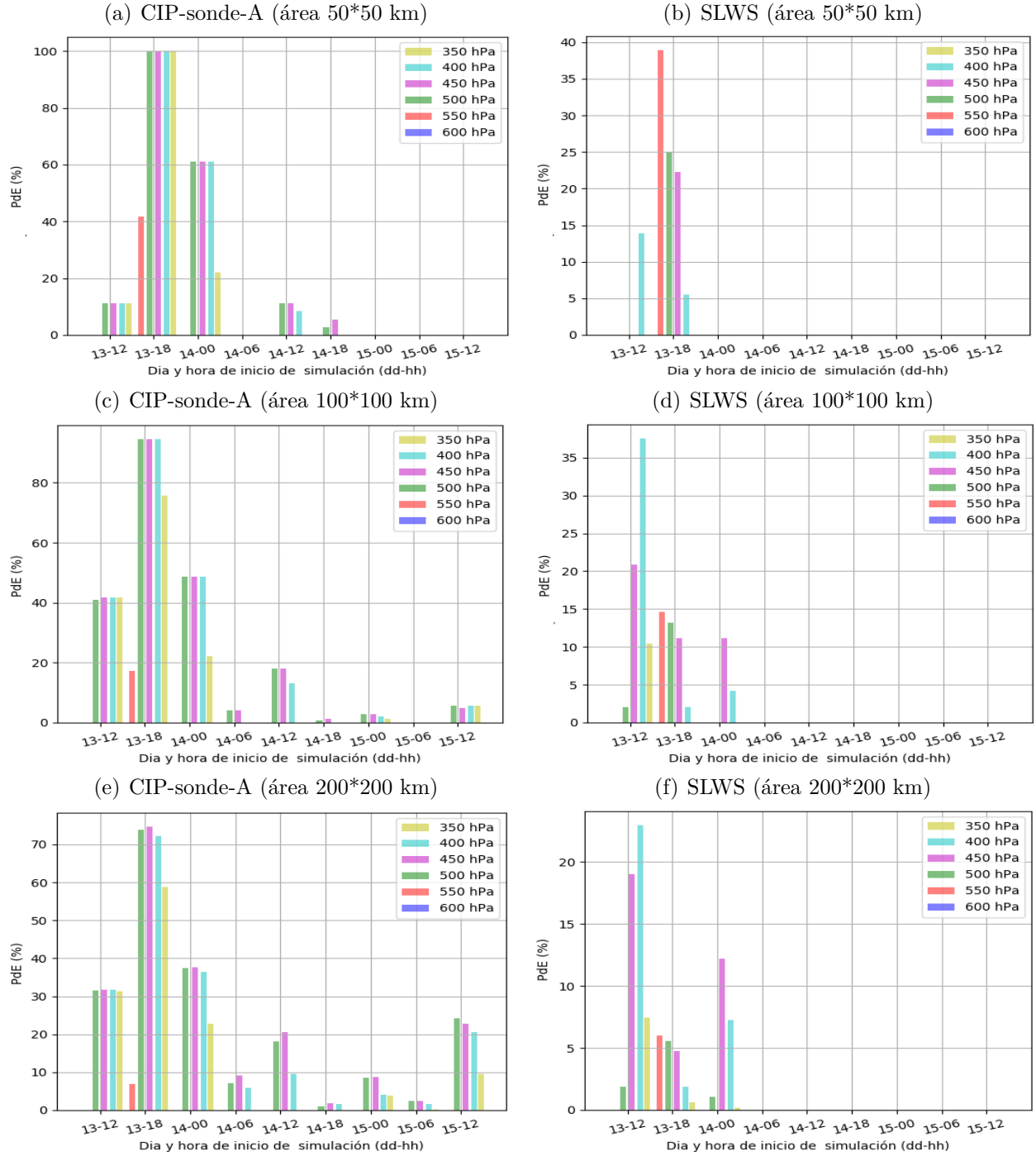


Figura 4.12: PdE para el 15 de marzo de 2016 a las 23:00 UTC (caso 2) en función a la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones y el nivel de presión.

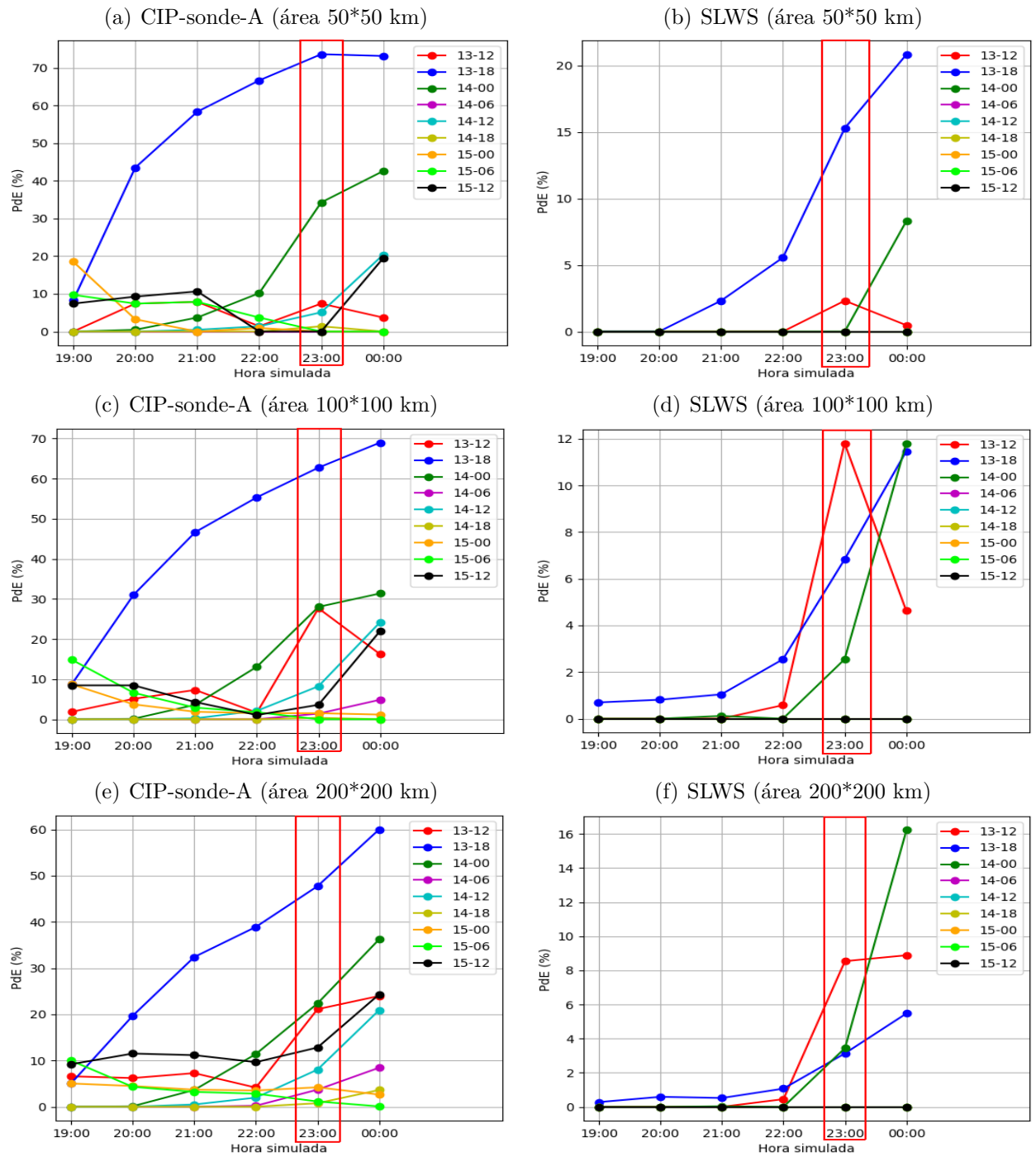


Figura 4.13: Evolución temporal de PdE para el 15 de marzo de 2016 (caso 2). El PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS aplicado a las 9 simulaciones para cada una de las tres áreas y todos los niveles entre 600 y 350 hPa.

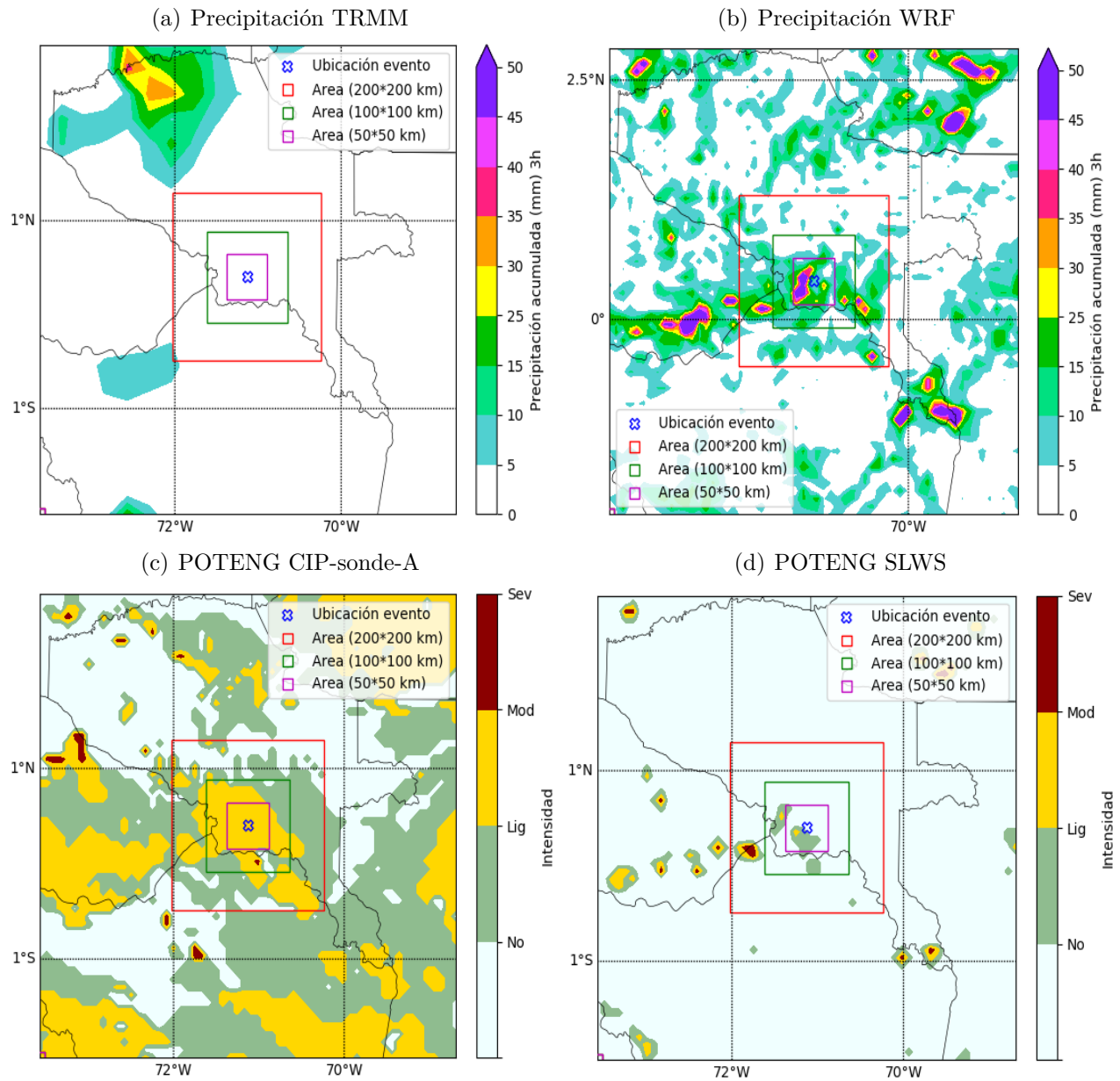


Figura 4.14: Precipitación acumulada entre las 22:00 y 00:00 UTC del 15 de marzo de 2016 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 23:00 UTC (caso 2) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 500 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 13 de marzo a las 18:00 UTC. simulación que más PdE muestra y catalogada como la mejor.

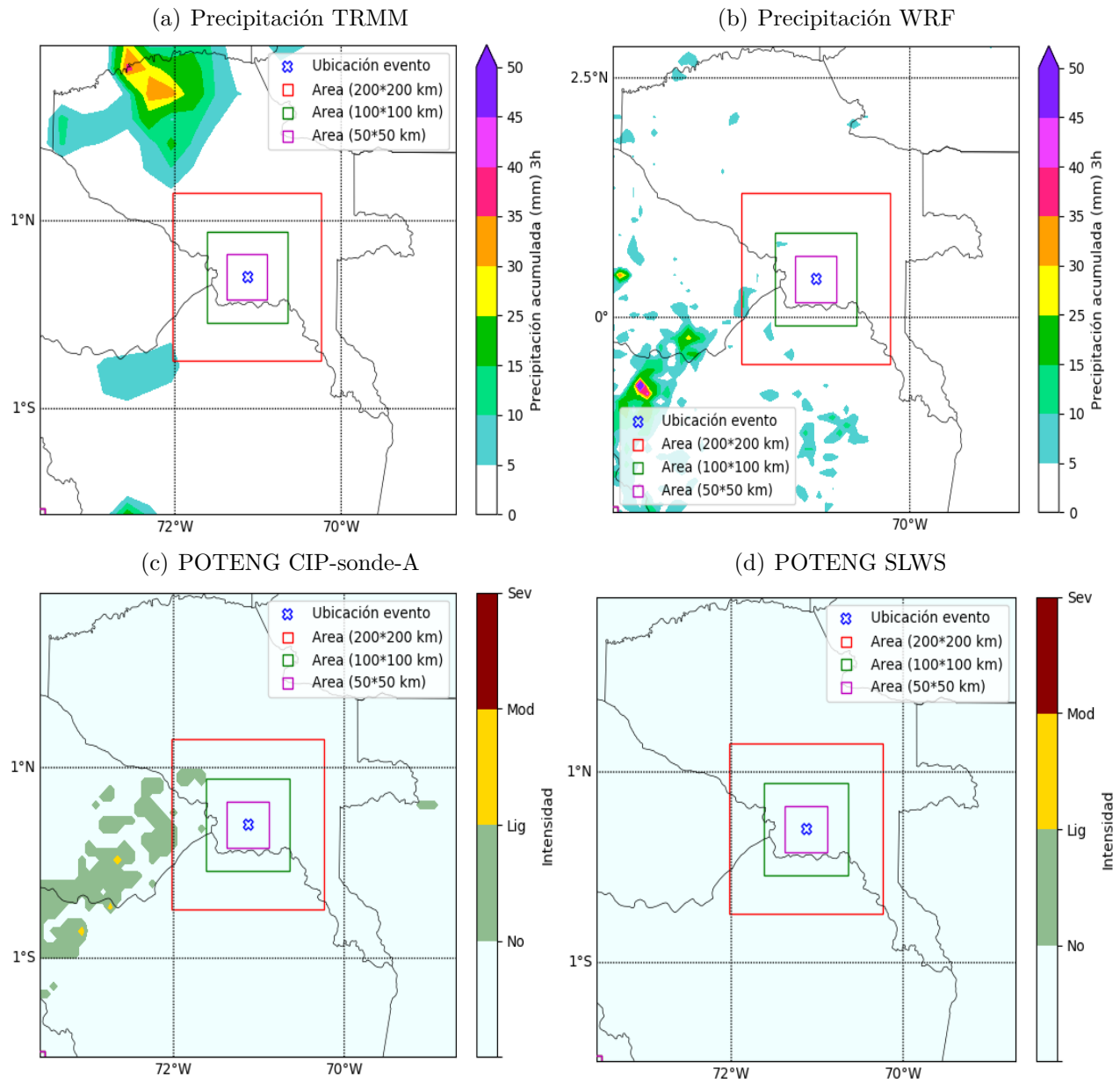


Figura 4.15: Precipitación acumulada entre las 22:00 y 00:00 UTC del 15 de marzo de 2016 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 23:00 UTC (caso 2) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 500 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 15 de marzo a las 06:00 UTC. simulación que menos PdE muestra y catalogada como la peor.

4.2.1.3. Caso 3

Para el caso 3 fueron analizadas las simulaciones para las 19:00 UTC del día 26 de abril de 2016. En la Figura 4.16 se observa que el algoritmo CIP-sonde-A detecta un porcentaje de área considerablemente mayor que SLWS. Cuando se calcula PdE para el área 1, la simulación iniciada el día 25 de abril a las 18:00 UTC es la que mayor área muestra cuando se aplican los dos algoritmos; en cambio, para la simulación del día 24 a las 18:00 UTC no hay detección de POTENG.

La simulación del día 26 a las 12:00 UTC, hora de inicio más cercana al suceso, logra detectar PdE con el algoritmo SLWS para el área 1 con un valor aproximado de 0.5 %. Al contrario, CIP-sonde-A no detecta PdE para el área 1, no obstante, logra detectar PdE para las áreas 2 y 3 con valores de 2 % y 4 %, respectivamente.

En la Figura 4.17, se evidencia que generalmente el nivel con mayor PdE para este evento es 500 hPa. En la Figura 4.18 se registra para CIP-sonde-A una disminución de PdE con respecto a las horas anteriores, por su parte, SLWS no exhibe un patrón claro respecto a la evolución temporal.

La simulación con mayor detección de PdE para el área 1 tiene como hora de inicio las 18:00 UTC del 25 de abril, 1 día y 1 hora antes de registrar el evento. La Figura 4.19 indica que tanto de la imagen satelital TRMM como de WRF muestran precipitación en el lugar del evento; sin embargo, WRF subestima la cantidad y la extensión espacial. Los resultados obtenidos para CIP-sonde-A se ajustan a la observación detectando valores altos de POTENG en las áreas 1 y 2, sin embargo, parece sobrestimar los valores fuera de estas áreas. Los resultados para SLWS indican núcleos pequeños de POTENG cerca al lugar del evento, implicando su acierto. Sin embargo, de acuerdo al análisis de las observaciones y la cantidad de precipitación que se presentó según TRMM, SLWS tiende a subestimar POTENG.

La simulación que menos muestra PdE en el área 1, es la que tiene hora de inicio a las 18:00 UTC del día 24 de abril. En la Figura 4.20, se observa que el modelo subestima la precipitación acumulada de acuerdo a la imagen satelital TRMM. Aunque esta es la simulación que menos PdE registró, CIP-sonde-A detecta una cantidad considerable en el lugar del evento, por el contrario, SLWS para esta simulación presenta núcleos pequeños aislados en las áreas 2 y 3.

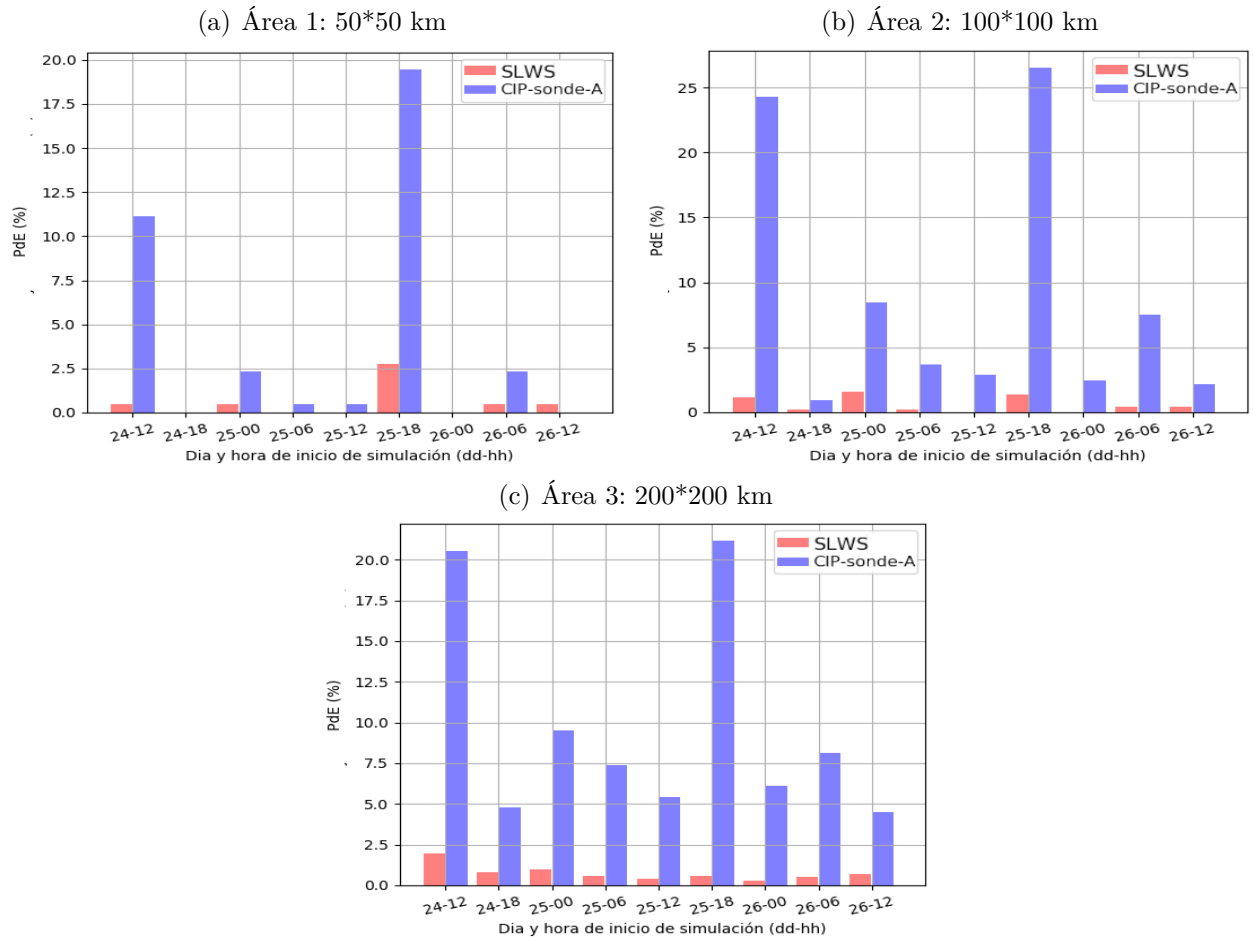


Figura 4.16: PdE para el 26 de abril de 2016 a las 19:00 UTC (caso 3) en función de la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones. PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS para todos los niveles ente 600 y 350 hpa y para el (a) área 1, (b) área 2 y (c) área 3.

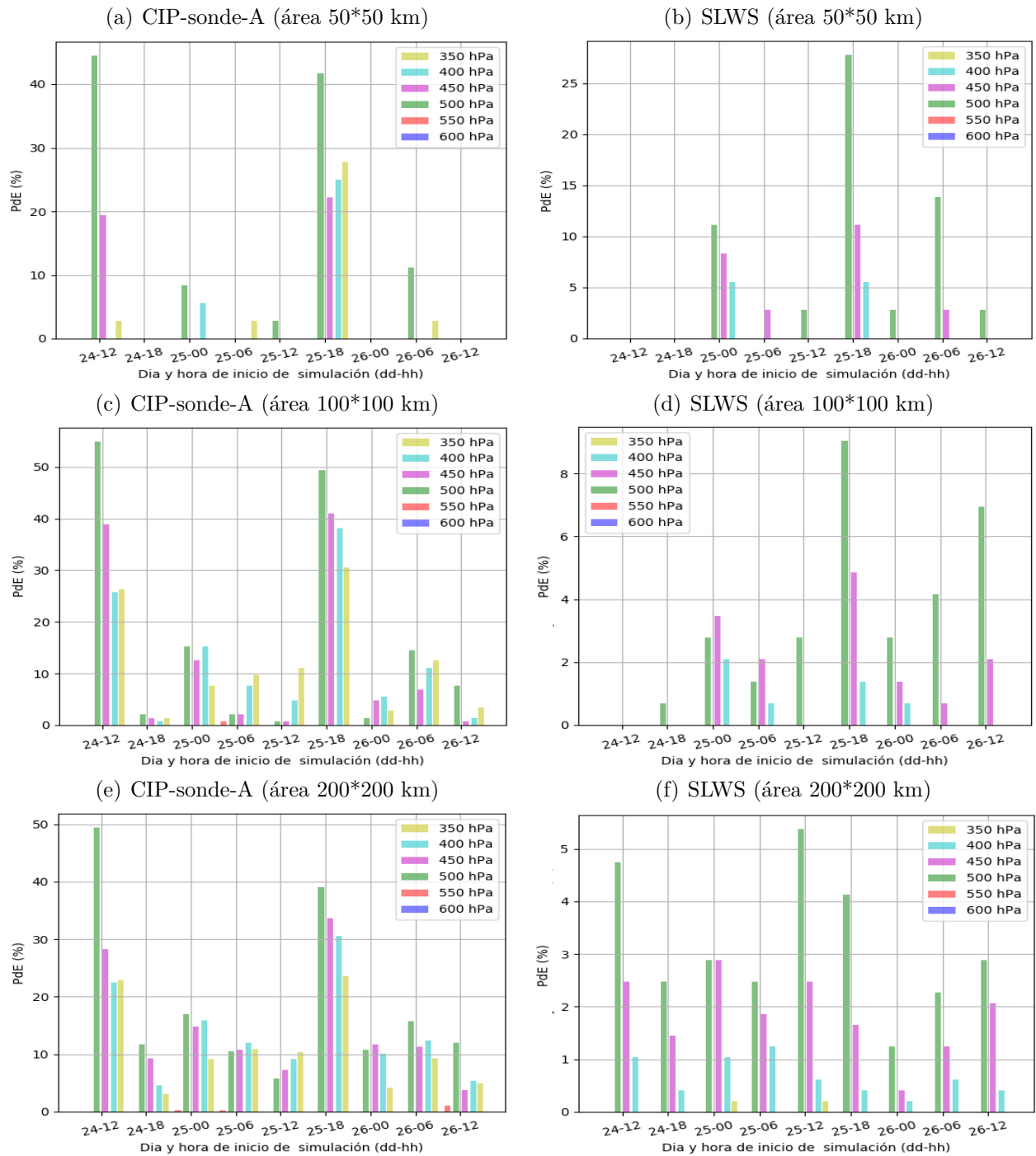


Figura 4.17: PdE para el 26 de abril de 2016 a las 19:00 UTC (caso 3) en función a la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones y el nivel de presión.

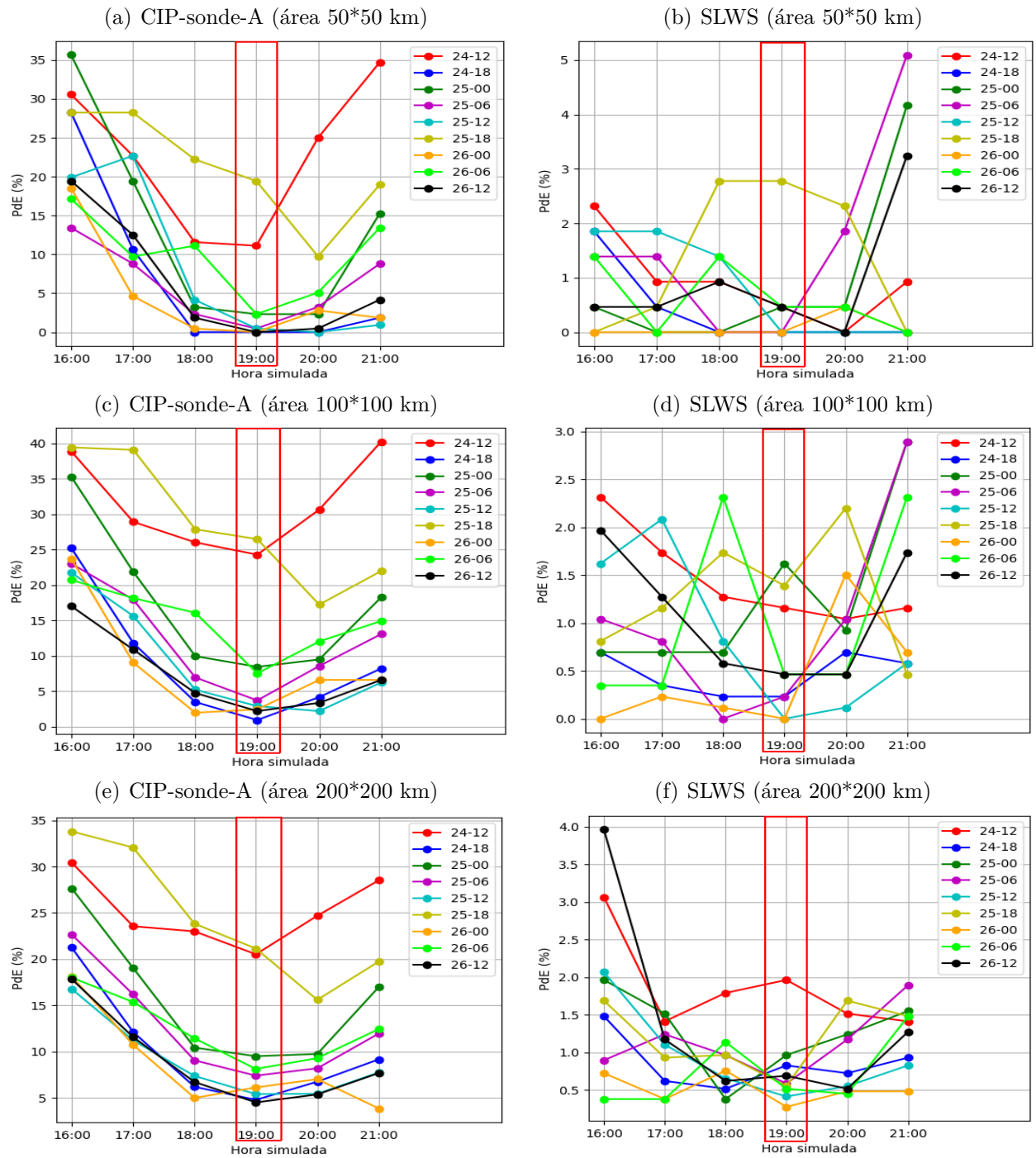


Figura 4.18: Evolución temporal de PdE para el 26 de abril de 2016 (caso 3). El PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS aplicado a las 9 simulaciones para cada una de las tres áreas y todos los niveles entre 600 y 350 hPa.

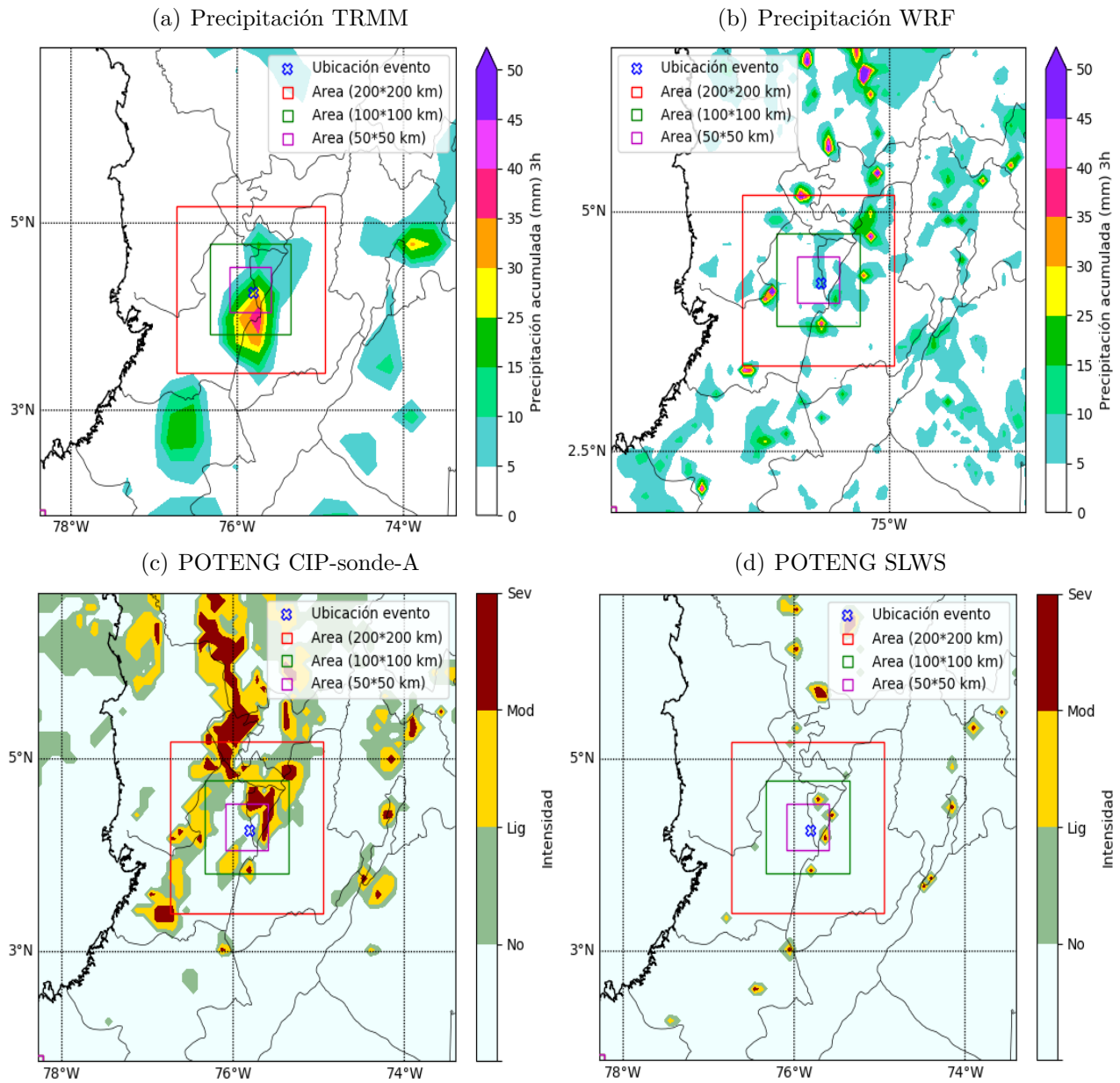


Figura 4.19: Precipitación acumulada entre las 19:00 a 21:00 UTC del 26 de abril de 2016 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 19:00 UTC (caso 3) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 500 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 23 de abril a las 18:00 UTC. simulación que más PdE muestra y catalogada como la mejor.

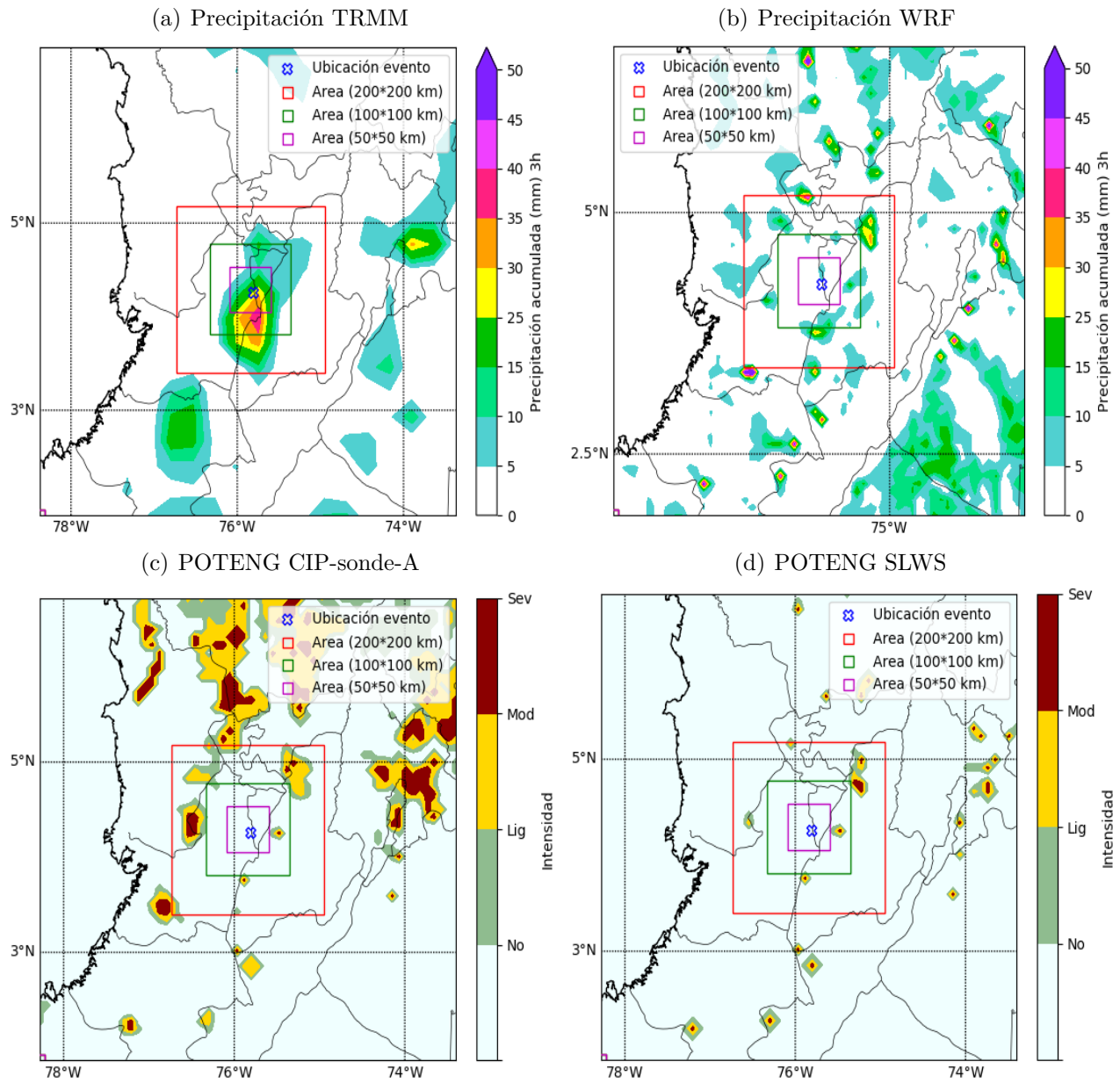


Figura 4.20: Precipitación acumulada entre las 19:00 a 21:00 UTC del 26 de abril de 2016 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 19:00 UTC (caso 3) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 500 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 24 de abril a las 18:00 UTC. simulación que menos PdE muestra y catalogada como la peor.

4.2.1.4. Caso 4

Se analizaron las simulaciones para las 13:00 UTC del día 15 de octubre de 2015. la simulación con hora de inicio más cercana al evento, 06:00 UTC del 15 de octubre, muestra los mejores resultados, tanto CIP-sonde-A como para SLWS, pues muestran altos porcentajes de cobertura de POTENG, Figura 4.26. Para el área 1 CIP-sonde-A registra 30 % mientras que SLWS registra 8 %.

En la Figura 4.27, se evidencia que el nivel que generalmente muestra mayor PdE para este evento es el nivel de 550 hPa. Por otra parte, en la Figura 4.28, se observa que los dos algoritmos CIP-sonde-A y SLWS, muestran una tendencia de disminución del porcentaje de cobertura.

La simulación de las 06:00 UTC del día 15 de octubre de 2015, 7 horas antes de que sucediera el evento, detecta los mayores valores de PdE para SLWS y el segundo lugar para CIP-sonde-A. Como se observa en la Figura 4.29 no se presenta precipitación acumulada de acuerdo a la imagen TRMM. Sin embargo, los resultados del modelo WRF muestran precipitación acumulada de hasta 25 mm al noroeste del lugar donde se reportó el evento. El algoritmo CIP-sonde-A detecta un PdE del 40 % aproximadamente, mientras que SLWS muestra menor área cobertura e intensidad.

De acuerdo al análisis de precipitación de las imágenes de TRMM, GOES 13 y demás observaciones del capítulo anterior, se evidencia que existía nubosidad de tipo estratiforme en disipación sin presencia de sistemas de convección profunda. Teniendo en cuenta esto, se puede inferir una sobreestimación de POTENG por parte de WRF, sin embargo, si se tiene como referencia el reporte del piloto, podemos afirmar que los algoritmos junto al modelo detectaron satisfactoriamente el evento.

Finalmente, la simulación que menos detecta PdE en las áreas 1 y 2, tiene inicio a las 12:00 UTC del día 14 de octubre. En la Figura 4.30, se observa que, para esta simulación CIP-sonde-A detecta 38 % del área 3 y tan solo un 3 % en el área 1; SLWS no detecta POTENG en las áreas 1 y 2, y detecta tan sólo un 3 % en el área 3.

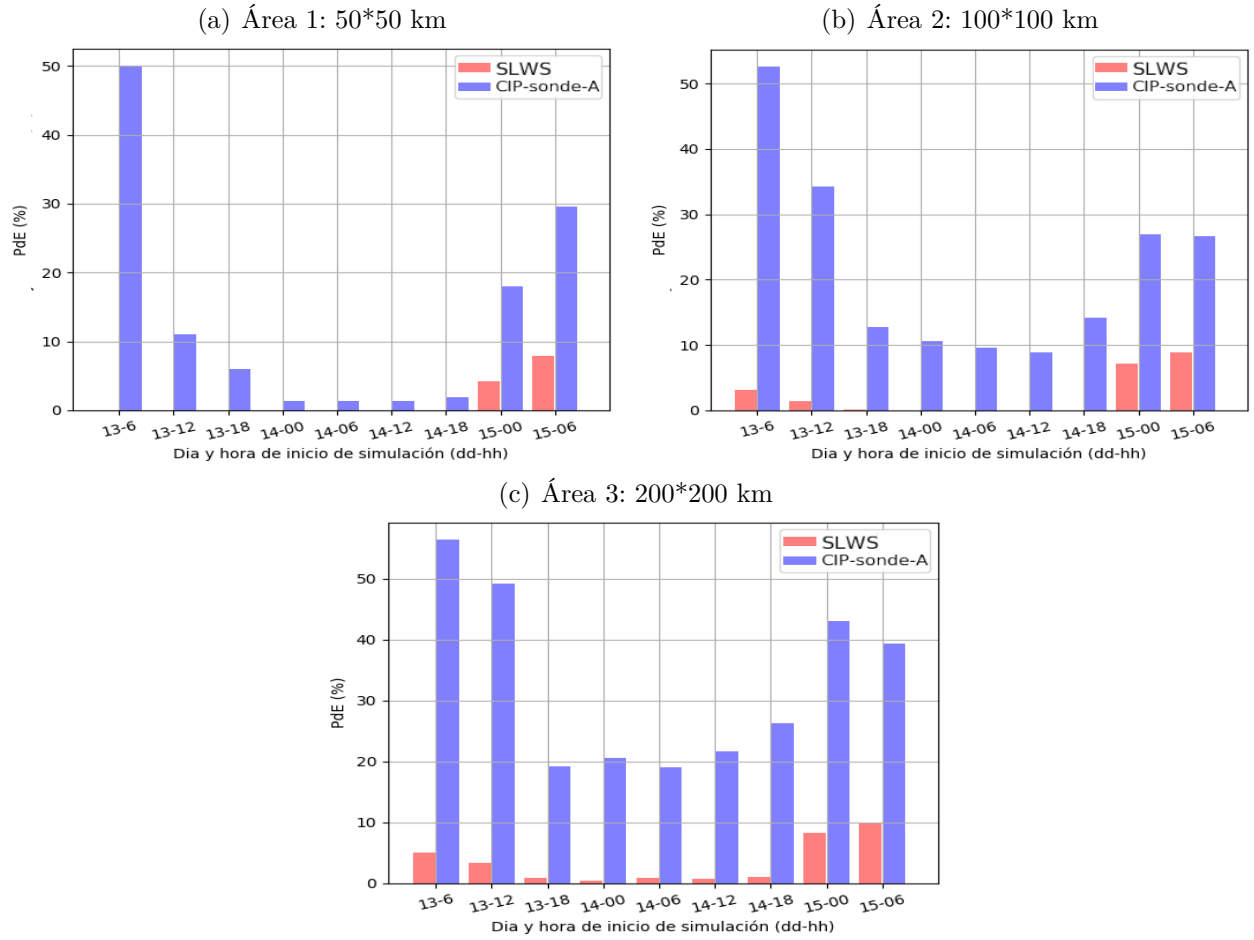


Figura 4.21: PdE para el 15 de octubre de 2015 a las 13:00 UTC (caso 4) en función de la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones. PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS para todos los niveles ente 600 y 350 hpa y para el (a) área 1, (b) área 2 y (c) área 3.

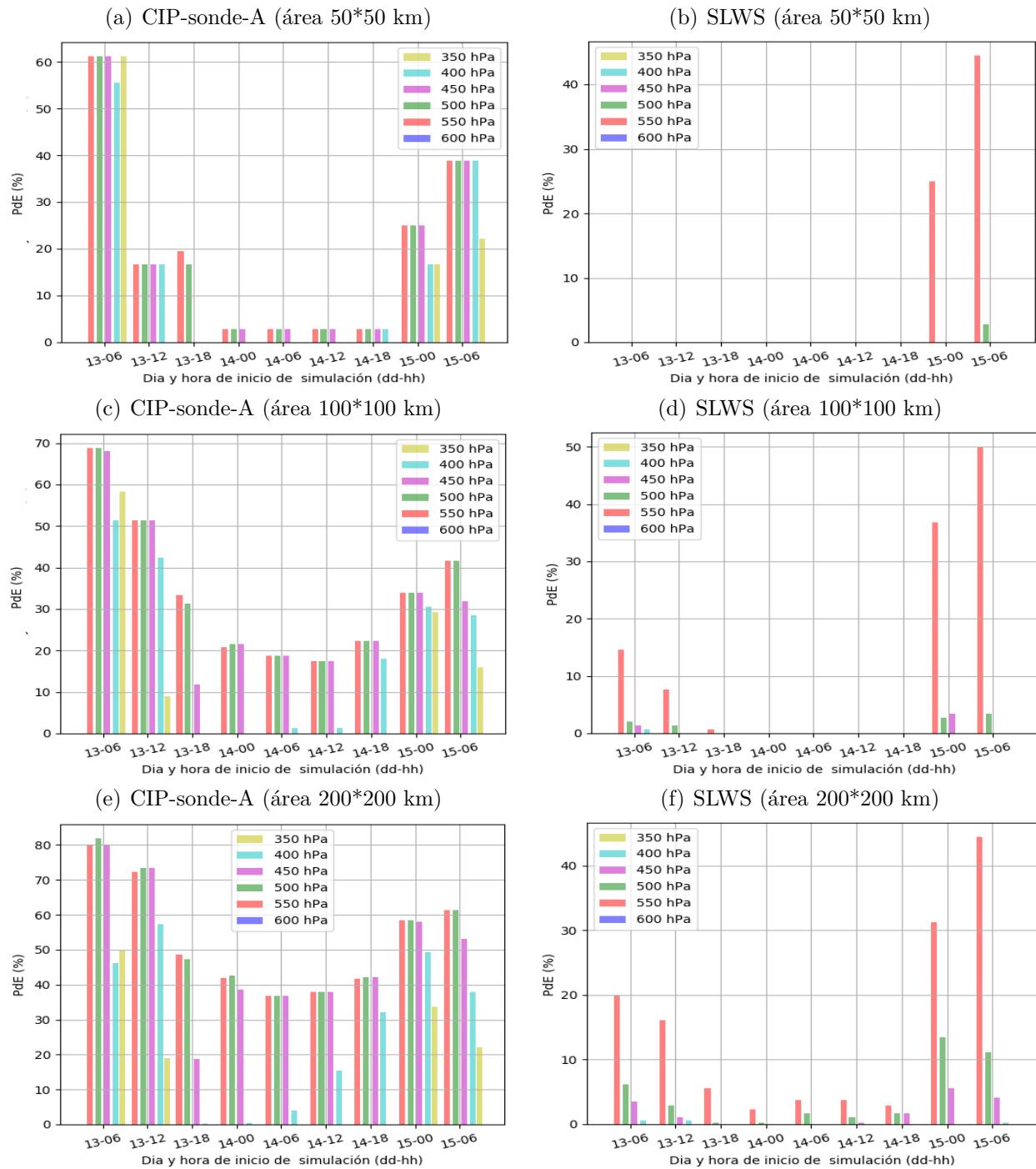


Figura 4.22: PdE para el 15 de octubre de 2015 a las 13:00 UTC (caso 4) en función a la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones y el nivel de presión.

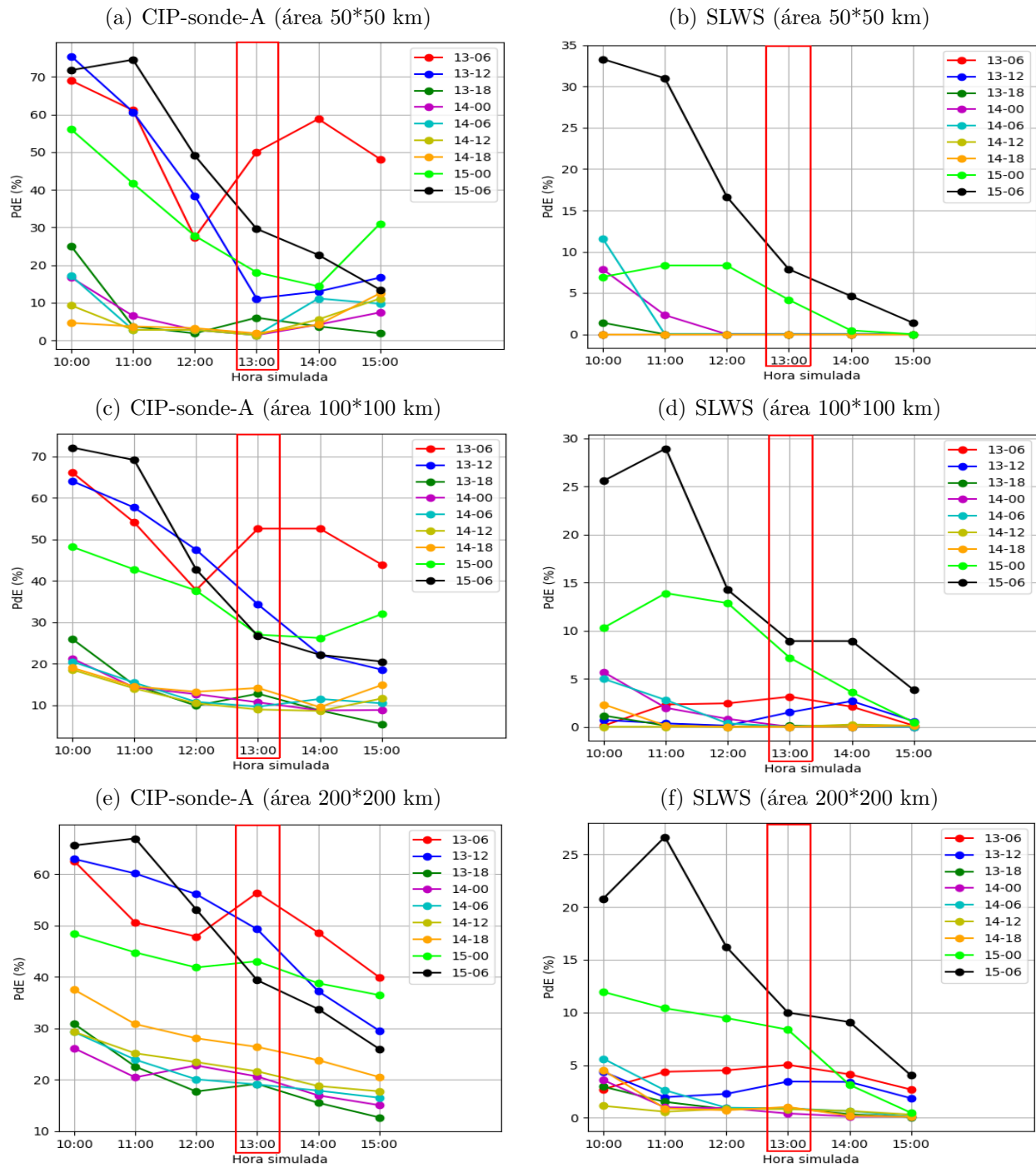


Figura 4.23: Evolución temporal de PdE para el 15 de octubre de 2015 (caso 4). El PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS aplicado a las 9 simulaciones para cada una de las tres áreas y todos los niveles entre 600 y 350 hPa.

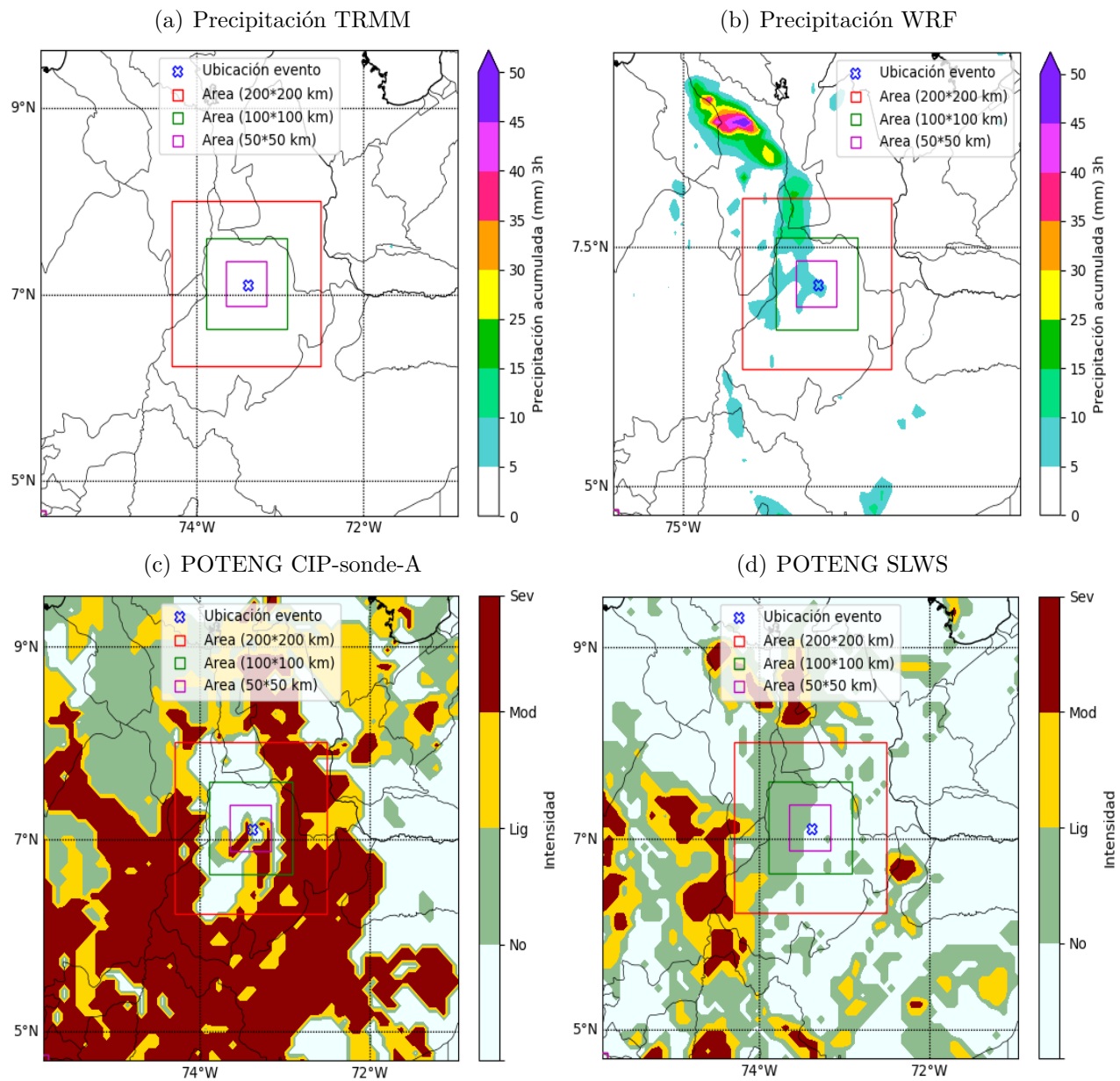


Figura 4.24: Precipitación acumulada entre las 13:00 a 15:00 UTC del 15 de octubre de 2015 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 13:00 UTC (caso 4) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 550 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 15 de octubre a las 06:00 UTC, simulación que ocupó el primer lugar en detectar mayores valores de PdE para SLWS Y el segundo lugar para CIP-sonde-A y es catalogada como la mejor.

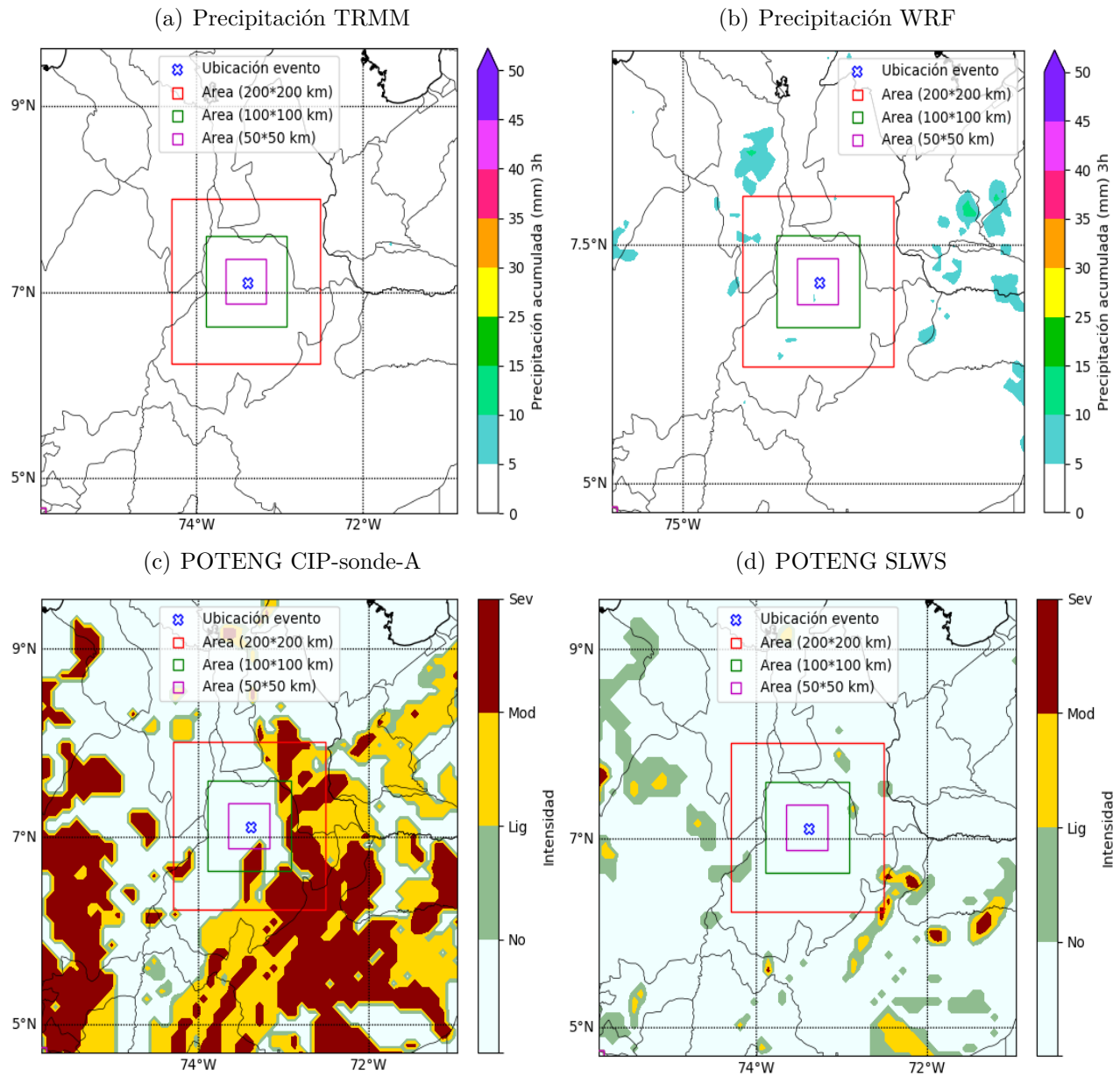


Figura 4.25: Precipitación acumulada entre las 13:00 a 15:00 UTC del 15 de octubre de 2015 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 13:00 UTC (caso 4) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 550 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 14 de octubre a las 12:00 UTC. simulación que menos PdE muestra y catalogada como la peor.

Se analizaron las simulaciones para las 13:00 UTC del día 15 de octubre de 2015. la simulación con hora de inicio más cercana al evento, 06:00 UTC del 15 de octubre, muestra los mejores resultados, tanto CIP-sonde-A como para SLWS, pues muestran altos porcentajes de cobertura de POTENG, Figura 4.26. Para el área 1 CIP-sonde-A registra 30 % mientras que SLWS registra 8 %.

En la Figura 4.27, se evidencia que el nivel que generalmente muestra mayor PdE para este evento es el nivel de 550 hPa. Por otra parte, en la Figura 4.28, se observa que los dos algoritmos CIP-sonde-A y SLWS, muestran una tendencia de disminución del porcentaje de cobertura.

La simulación de las 06:00 UTC del día 15 de octubre de 2015, 7 horas antes de que sucediera el evento, detecta los mayores valores de PdE para SLWS y el segundo lugar para CIP-sonde-A. Como se observa en la Figura 4.29 no se presenta precipitación acumulada de acuerdo a la imagen TRMM. Sin embargo, los resultados del modelo WRF muestran precipitación acumulada de hasta 25 mm al noroeste del lugar donde se reportó el evento. El algoritmo CIP-sonde-A detecta un PdE del 40 % aproximadamente, mientras que SLWS muestra menor área cubertura e intensidad.

De acuerdo al análisis de precipitación de las imágenes de TRMM, GOES 13 y demás observaciones del capítulo anterior, se evidencia que existía nubosidad de tipo estratiforme en disipación sin presencia de sistemas de convección profunda. Teniendo en cuenta esto, se puede inferir una sobreestimación de POTENG por parte de WRF, sin embargo, si se tiene como referencia el reporte del piloto, podemos afirmar que los algoritmos junto al modelo detectaron satisfactoriamente el evento.

Finalmente, la simulación que menos detecta PdE en las áreas 1 y 2, tiene inicio a las 12:00 UTC del día 14 de octubre. En la Figura 4.30, se observa que, para esta simulación CIP-sonde-A detecta 38 % del área 3 y tan solo un 3 % en el área 1; SLWS no detecta POTENG en las áreas 1 y 2, y detecta tan sólo un 3 % en el área 3.

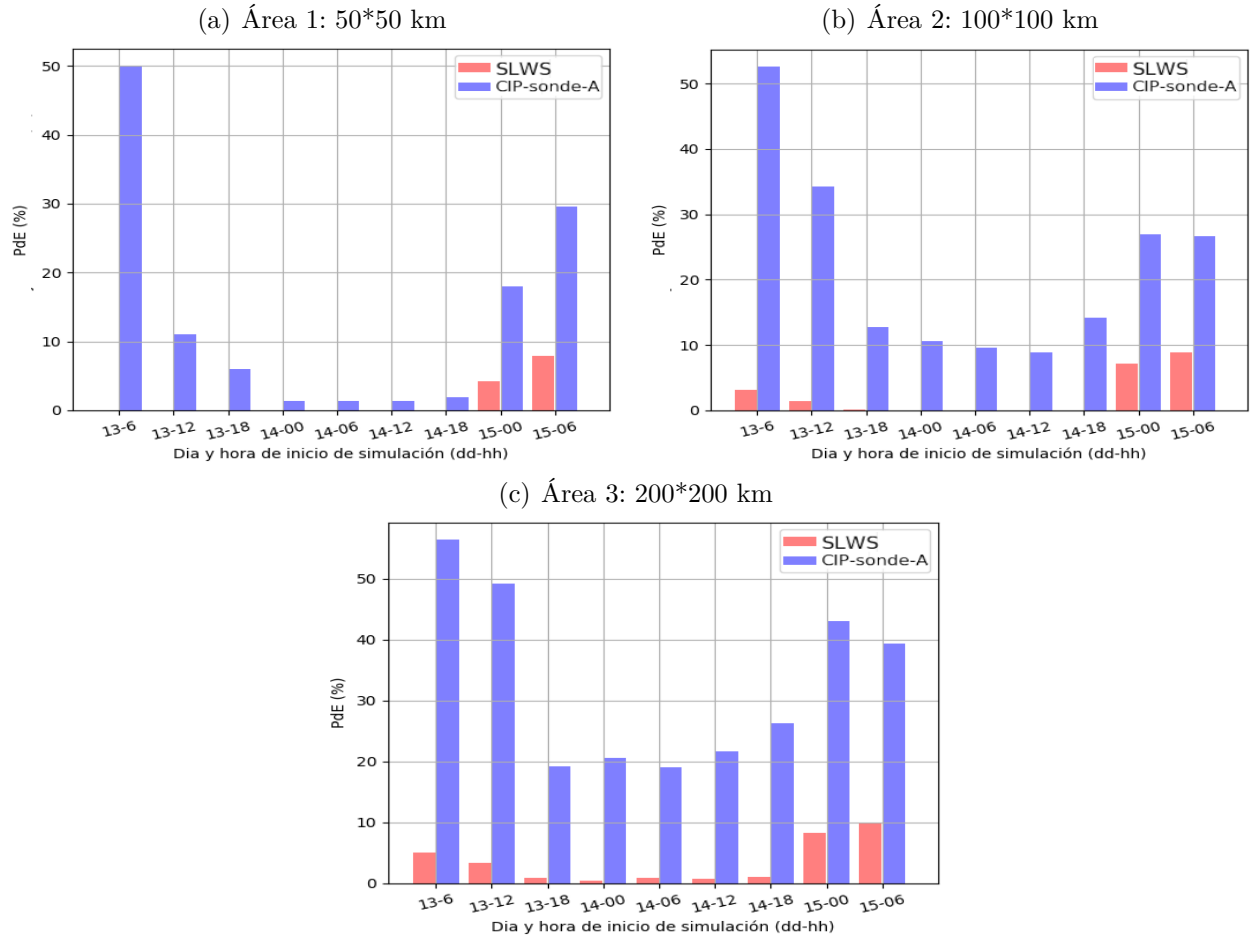


Figura 4.26: PdE para el 15 de octubre de 2015 a las 13:00 UTC (caso 4) en función de la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones. PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS para todos los niveles ente 600 y 350 hpa y para el (a) área 1, (b) área 2 y (c) área 3.

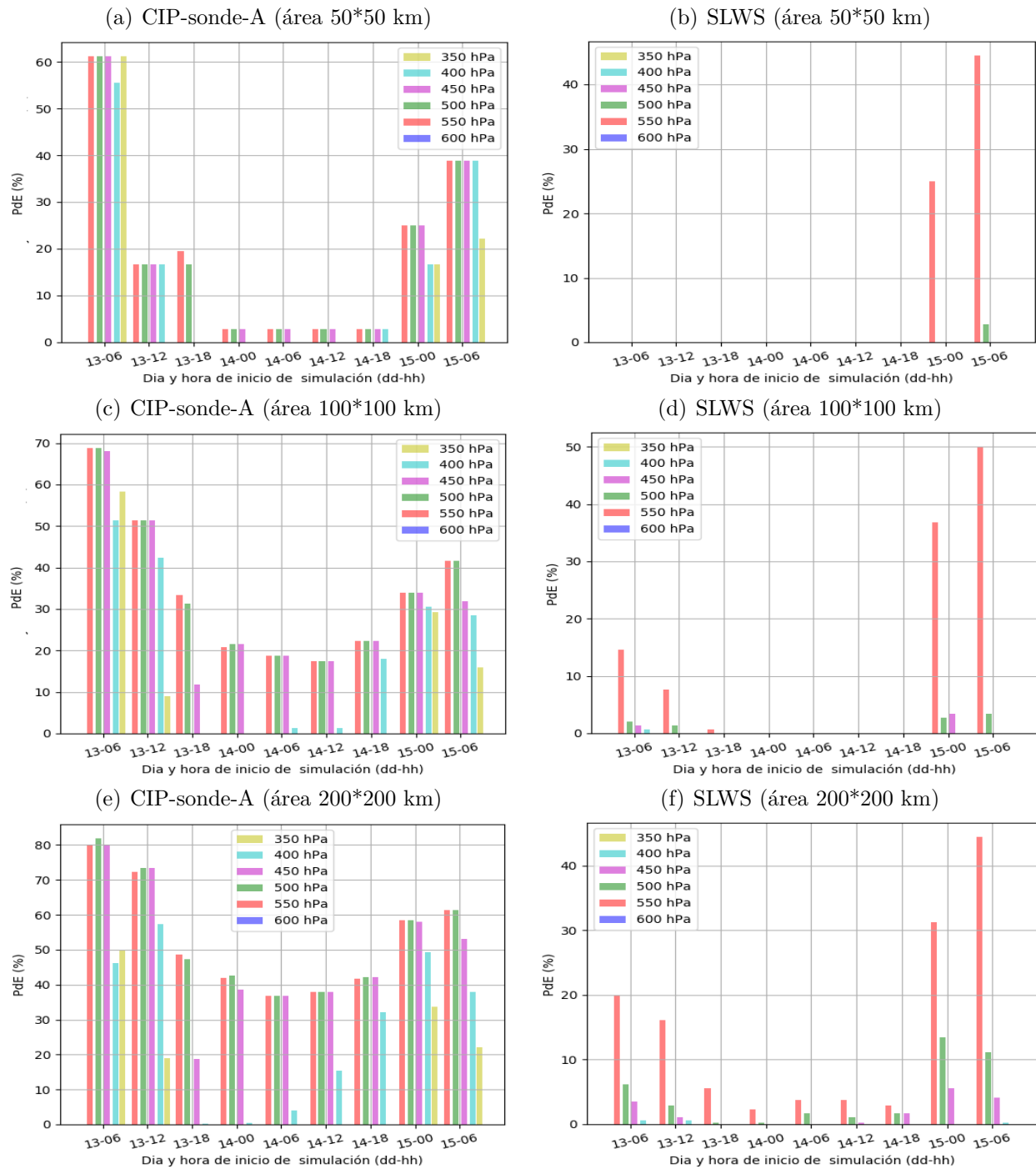


Figura 4.27: PdE para el 15 de octubre de 2015 a las 13:00 UTC (caso 4) en función a la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones y el nivel de presión.

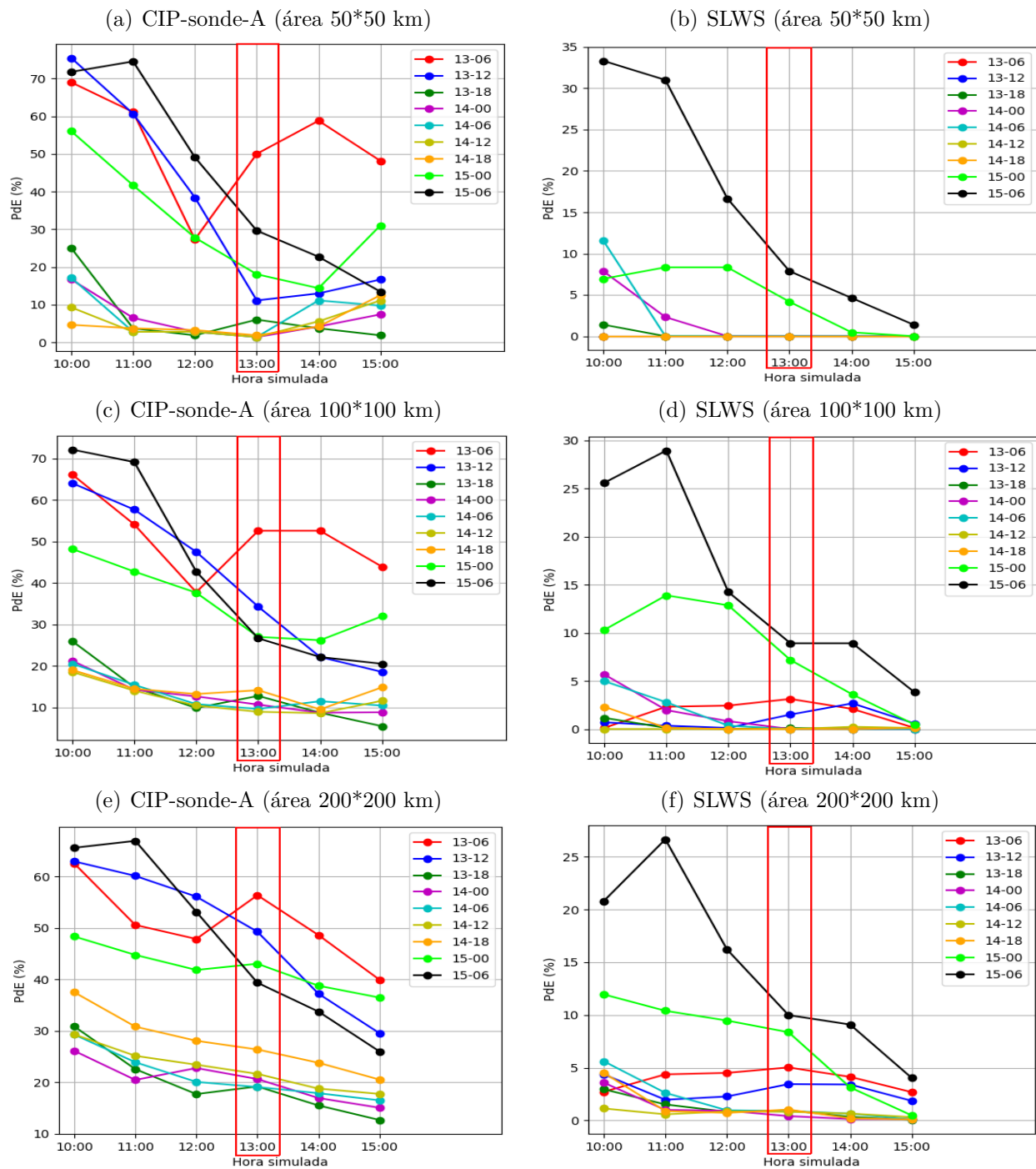


Figura 4.28: Evolución temporal de PdE para el 15 de octubre de 2015 (caso 4). El PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS aplicado a las 9 simulaciones para cada una de las tres áreas y todos los niveles entre 600 y 350 hPa.

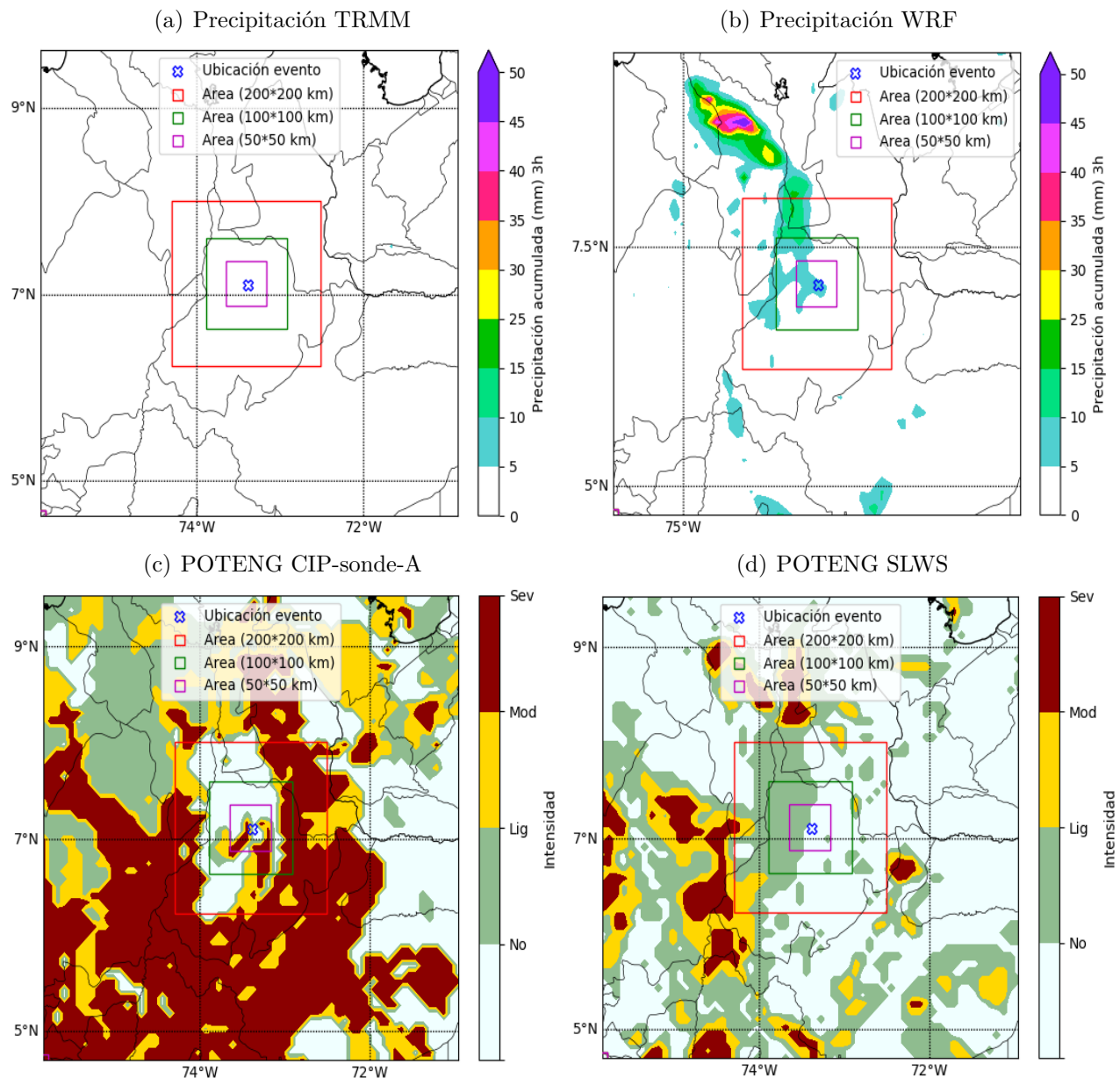


Figura 4.29: Precipitación acumulada entre las 13:00 a 15:00 UTC del 15 de octubre de 2015 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 13:00 UTC (caso 4) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 550 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 15 de octubre a las 06:00 UTC, simulación que ocupó el primer lugar en detectar mayores valores de PdE para SLWS Y el segundo lugar para CIP-sonde-A y es catalogada como la mejor.

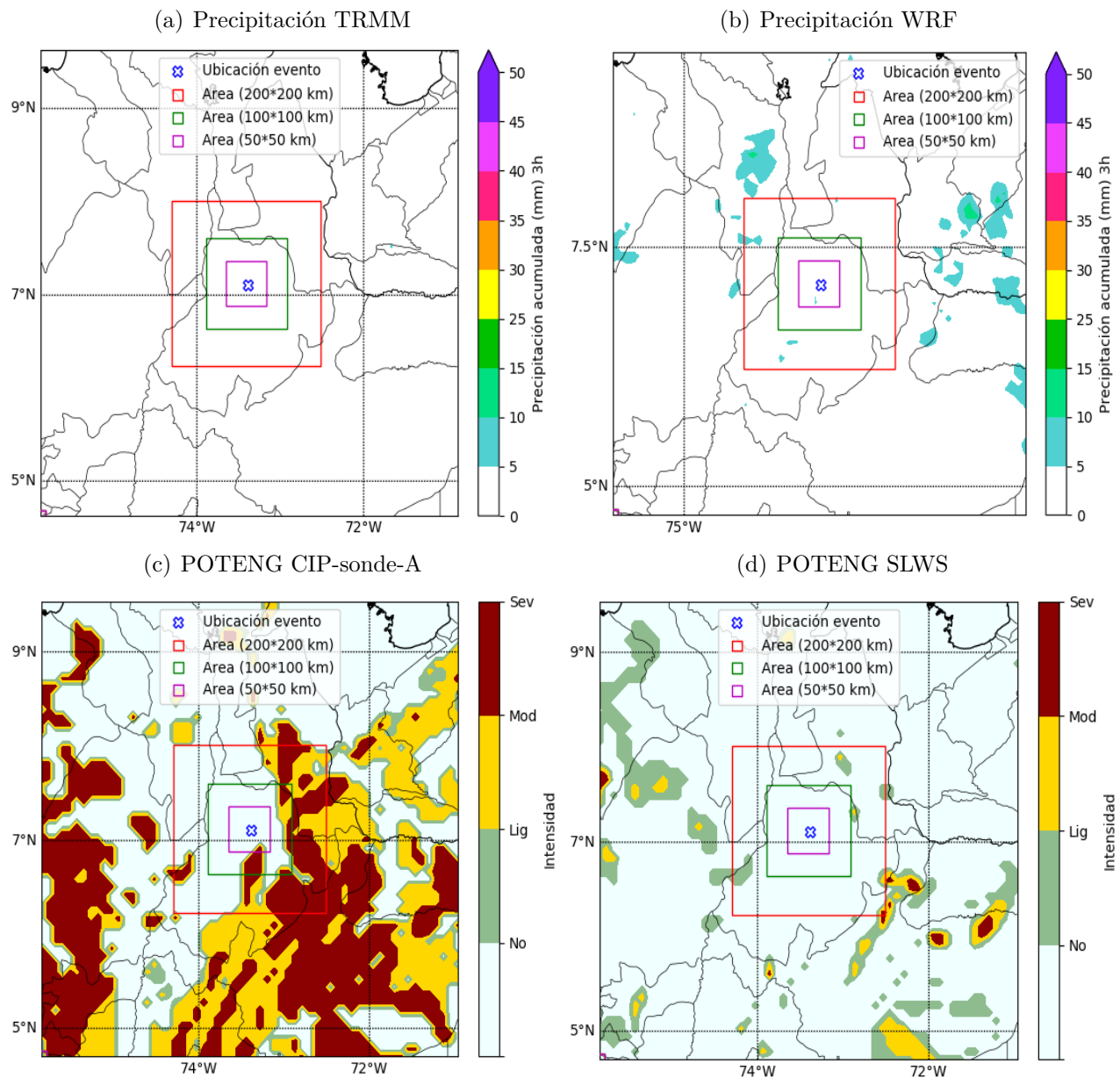


Figura 4.30: Precipitación acumulada entre las 13:00 a 15:00 UTC del 15 de octubre de 2015 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 13:00 UTC (caso 4) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 550 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 14 de octubre a las 12:00 UTC. simulación que menos PdE muestra y catalogada como la peor.

4.2.2. Casos de no engelamiento

4.2.2.1. Caso 5

Este es un caso de no engelamiento, para el cual fueron analizadas las simulaciones de las 15:00 UTC del 24 de junio de 2018. En la Figura 4.31, se observó que la única simulación que obtuvo un PdE fue la del día 24 a las 00:00 UTC, solamente para el algoritmo CIP-sonde-A. Como se ve en la Figura 4.32, los niveles en los que se observó más PdE para este evento son 550 y 500 hPa.

Se observó que sólo la simulación del día 24 a las 00:00, detectó PdE con un porcentaje distinto a cero y no mayor al 3 % para cada área, Figura 4.33.

De acuerdo a la Figura 4.34, se encontró que la simulación más cercana a la hora del evento es la de las 06:00 UTC del día 24. El modelo junto a los algoritmos y las observaciones coinciden en poca presencia de nubes sin precipitación y un PdE igual a 0 en todas las áreas de detección.

La simulación que menos concuerda con las observaciones es aquella iniciada el día 24 a las 00:00 UTC, Figura 4.35. Para esta simulación se registra que CIP-sonde-A detecta 5 % de PdE en el área 1 a 550 hPa, 3.5 % para el área 2 y 1.2 % para el área 3. La situación que muestra la simulación no está lejana a las condiciones que se presentaron, ya que para ese día se observó nubosidad en disipación en el sector sin precipitación.

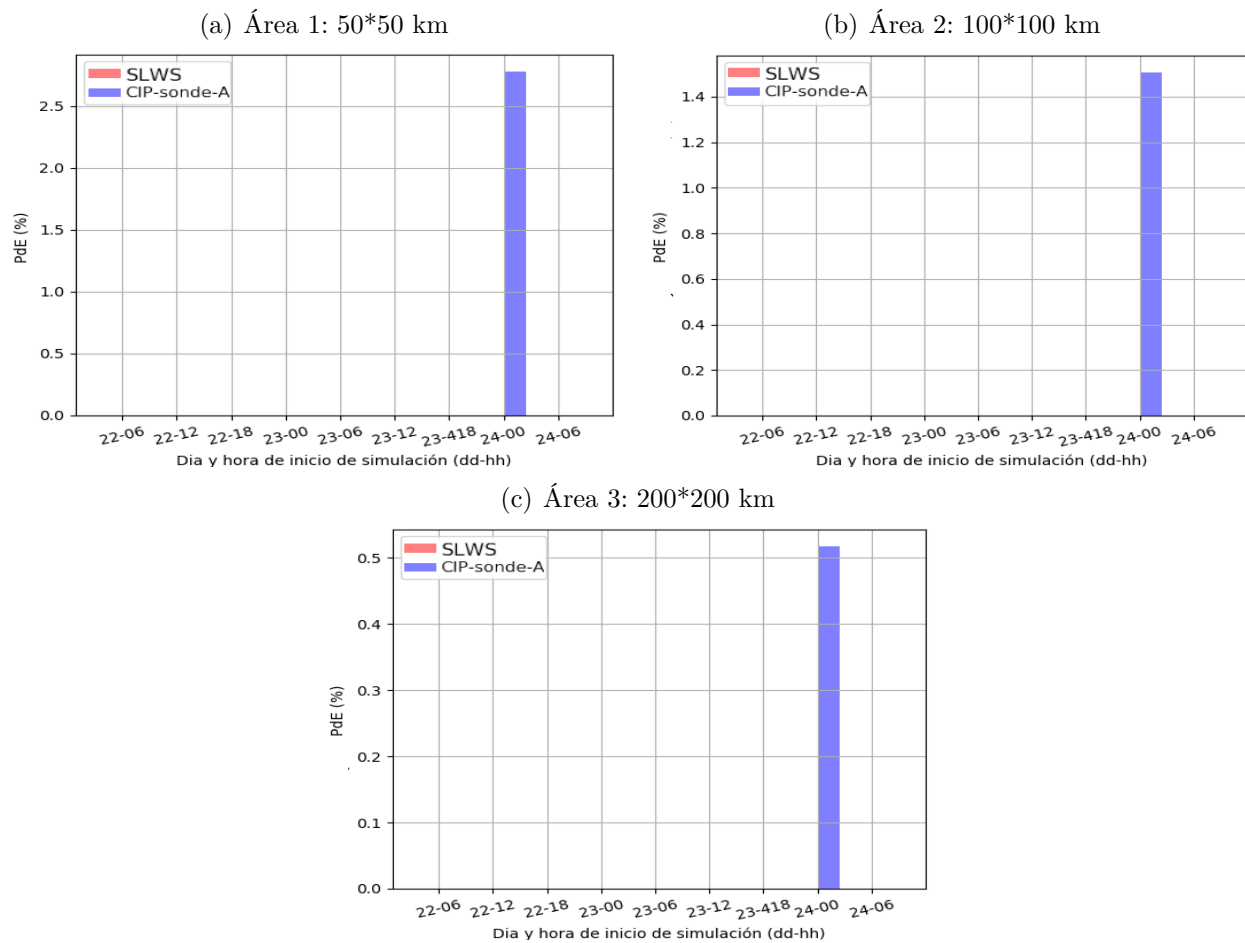


Figura 4.31: PdE para el 24 de junio de 2018 a las 15:00 UTC (caso 5) en función de la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones. PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS para todos los niveles ente 600 y 350 hpa y para el (a) área 1, (b) área 2 y (c) área 3.

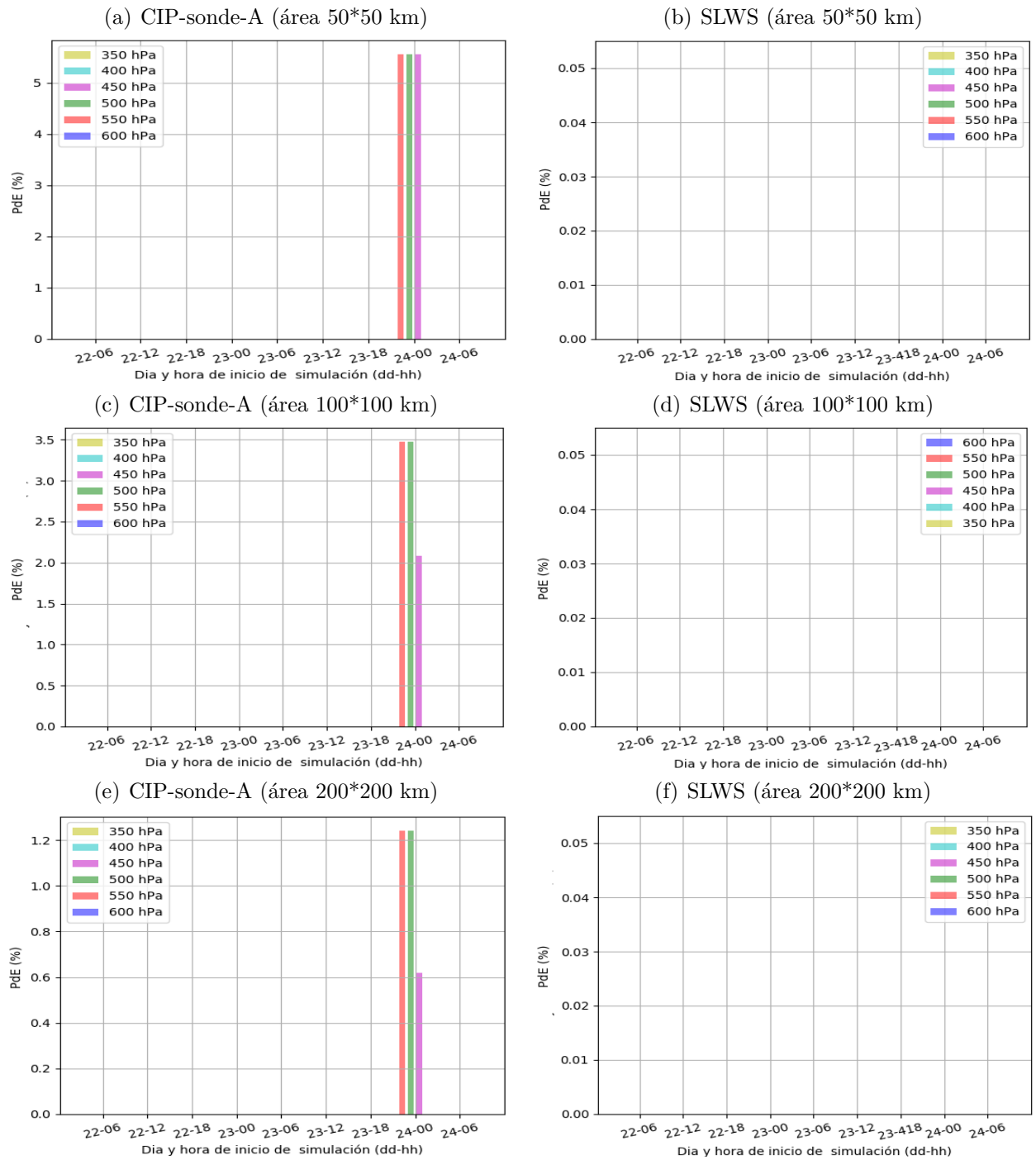


Figura 4.32: PdE para el 24 de junio de 2018 a las 15:00 UTC (caso 5) en función a la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones y el nivel de presión.

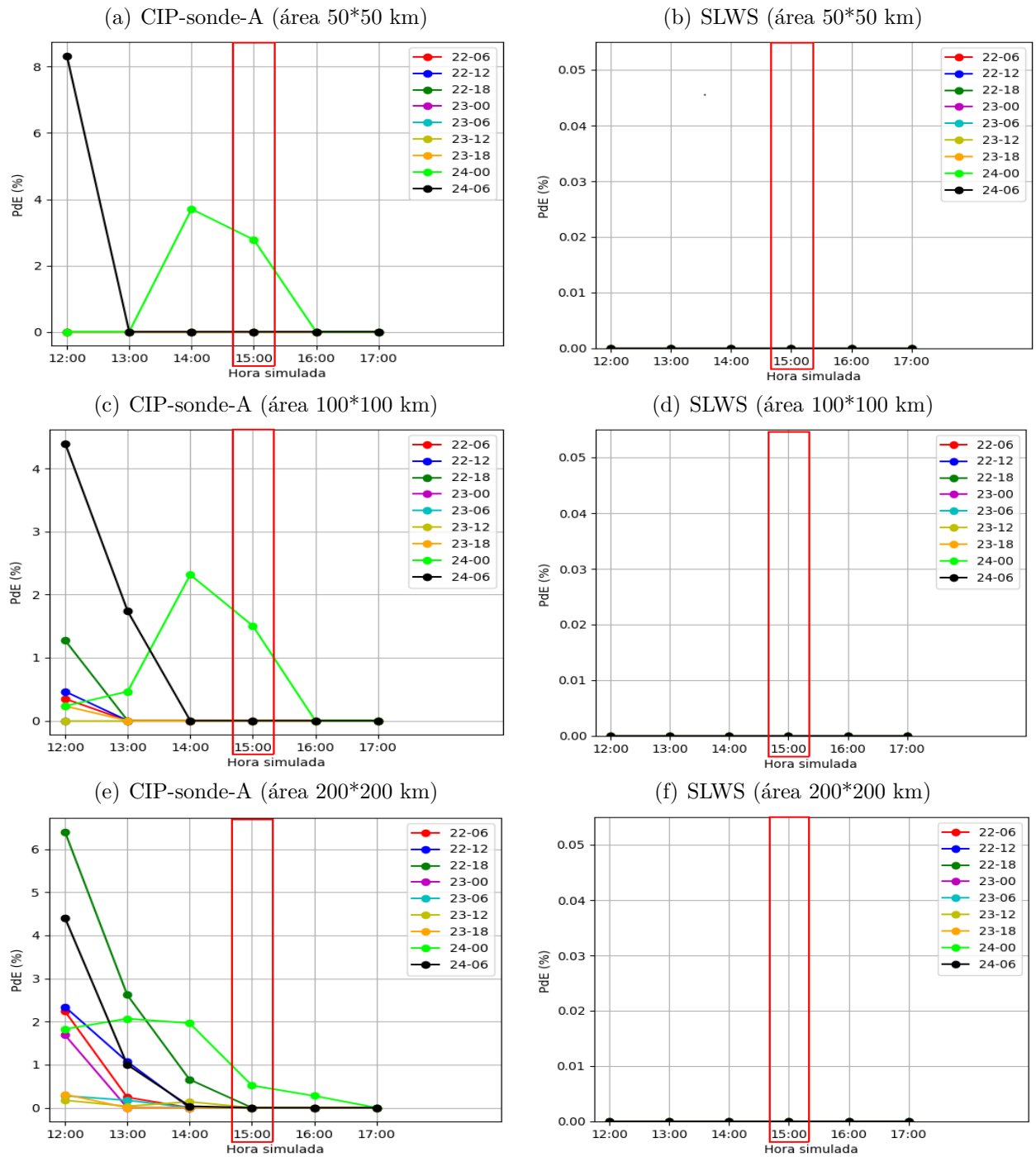


Figura 4.33: Evolución temporal de PdE para el 24 de junio de 2018 (caso 5). El PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS aplicado a las 9 simulaciones para cada una de las tres áreas y todos los niveles entre 600 y 350 hPa.

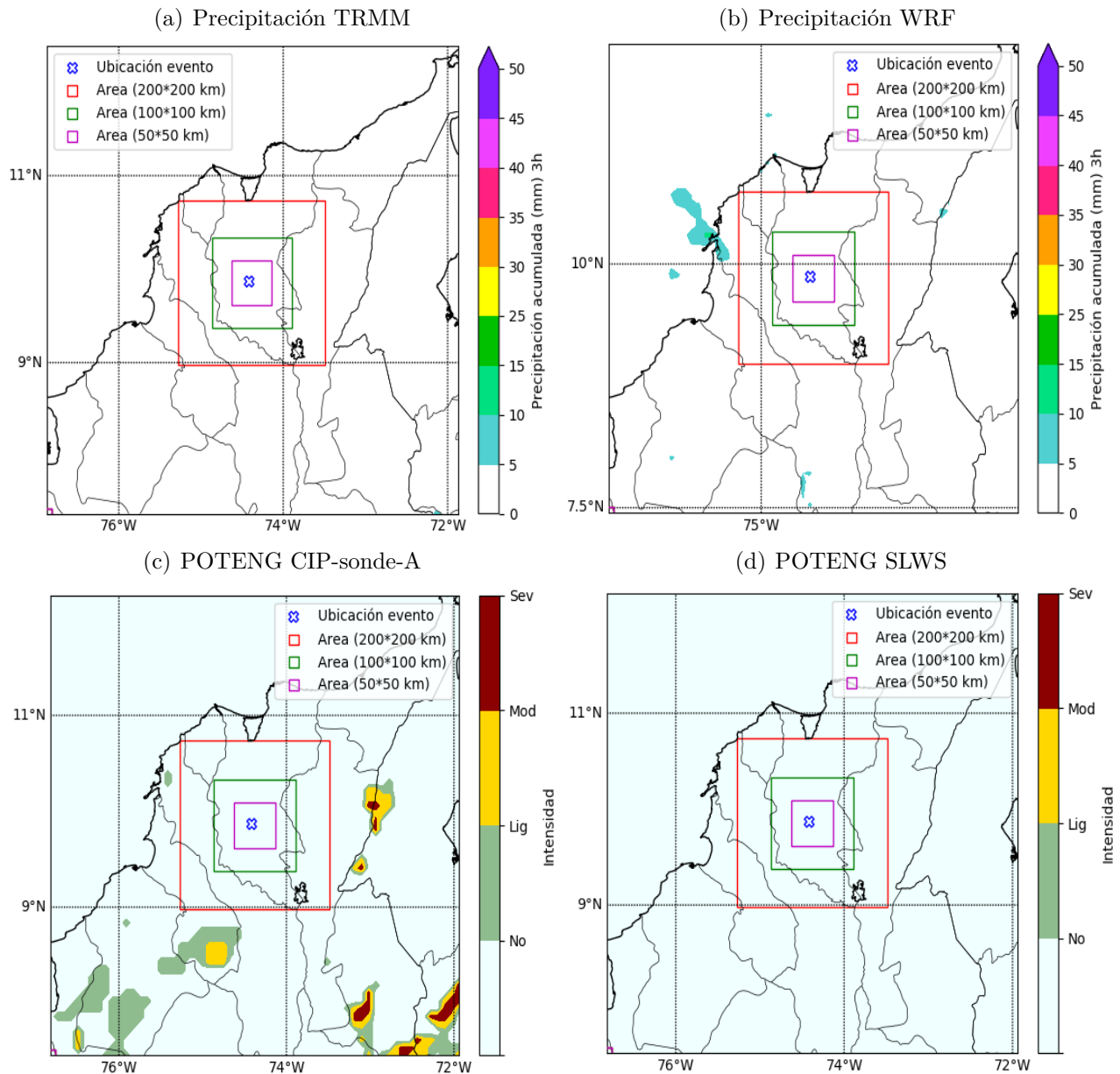


Figura 4.34: Precipitación acumulada entre las 13:00 a 15:00 UTC del 24 de junio de 2018 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 15:00 UTC (caso 5) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 500 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 24 de junio a las 06:00 UTC. simulación que más PdE muestra y catalogada como la mejor.

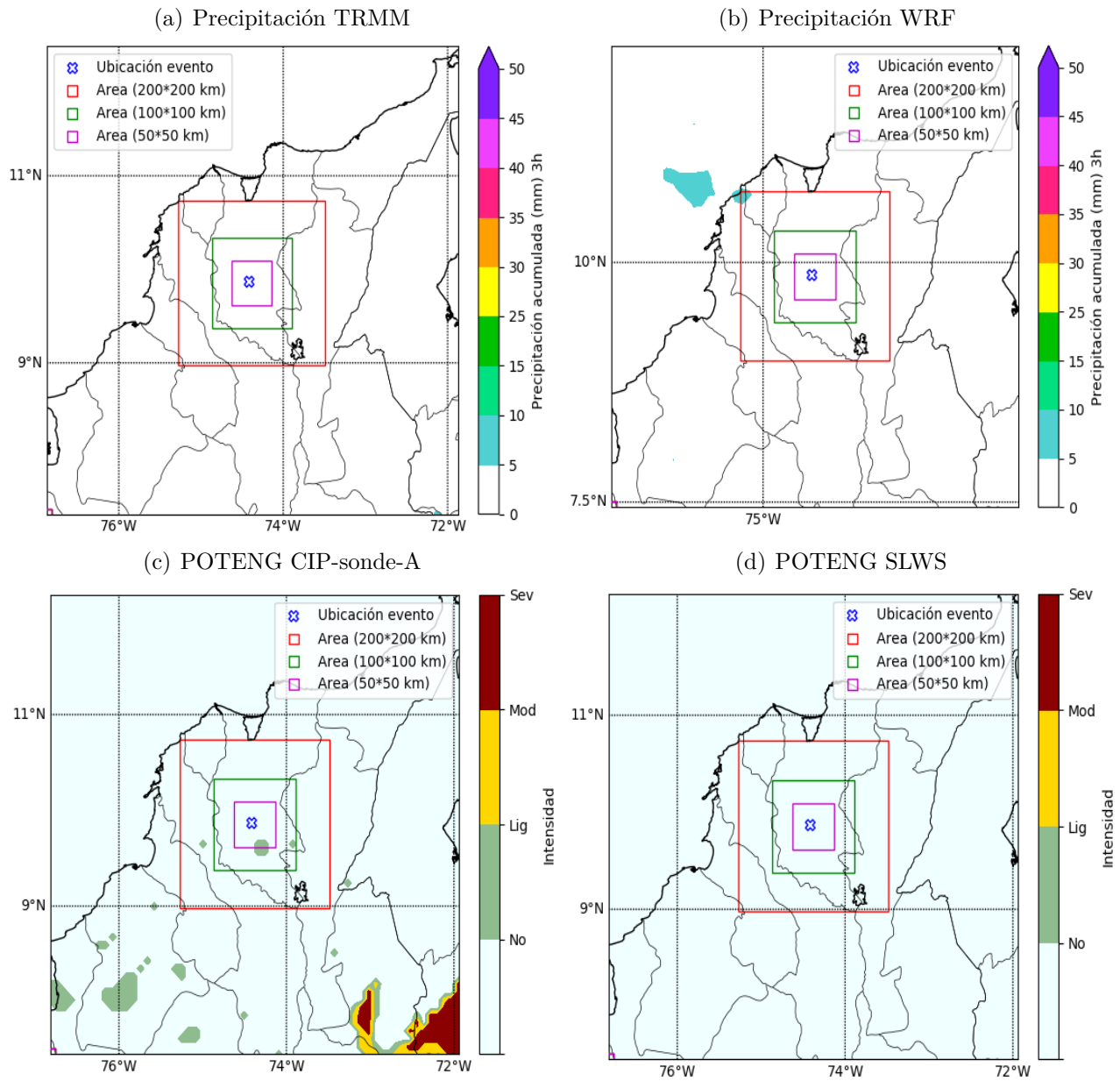


Figura 4.35: Precipitación acumulada entre las 13:00 a 15:00 UTC del 24 de junio de 2018 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 15:00 UTC (caso 5) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 500 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 24 de junio a las 00:00 UTC. simulación que menos PdE muestra y catalogada como la peor.

4.2.2.2. Caso 6

Se analizaron las simulaciones para las 14:00 UTC del día 13 de marzo de 2016. En la Figura 4.36, se observa que los algoritmos detectan PdE en la mayoría de simulaciones, a excepción de la simulación del día 11 a las 06:00 UTC, para la cual SLWS no detecta PdE en el área 1. El nivel isobárico que generalmente muestra mayor PdE es 550 hPa, Figura 4.37.

De acuerdo a la Figura 4.38, se encuentra que a la hora del evento hay valores máximos de PdE para algunos niveles isobáricos. En general los dos algoritmos detectaron PdE en la mayor parte del tiempo entre las 11:00 y las 16:00 UTC del día del evento.

La Figura 4.39, indica la simulación que menos PdE detectó, en esta imagen, TRMM no coincide con la precipitación acumulada mostrada por la simulación con hora de inicio a las 12:00 UTC del día 11 de marzo. Al sureste del punto de interés, los dos algoritmos producen potencial de engelamiento en el área 3 y en el caso de CIP-sonde-A también reporta POTENG en el área 2. Se debe tener en cuenta que las imágenes de satélite de GOES 13 muestran nubosidad al sur-este del lugar del evento, por lo tanto, si existe la probabilidad de la existencia de POTENG en cercanías del evento.

La simulación que más detectó PdE se observa en la Figura 4.40. Para esta, se observa POTENG exactamente en la coordenada para la cual se reportó el caso de no engelamiento. Lo que indica que la simulación sobreestima POTENG, sin embargo, existe la incertidumbre de que en verdad existiera POTENG en el sector, debido a que sí se evidencia la presencia de nubosidad de acuerdo al análisis realizado capítulo 3 para este caso.

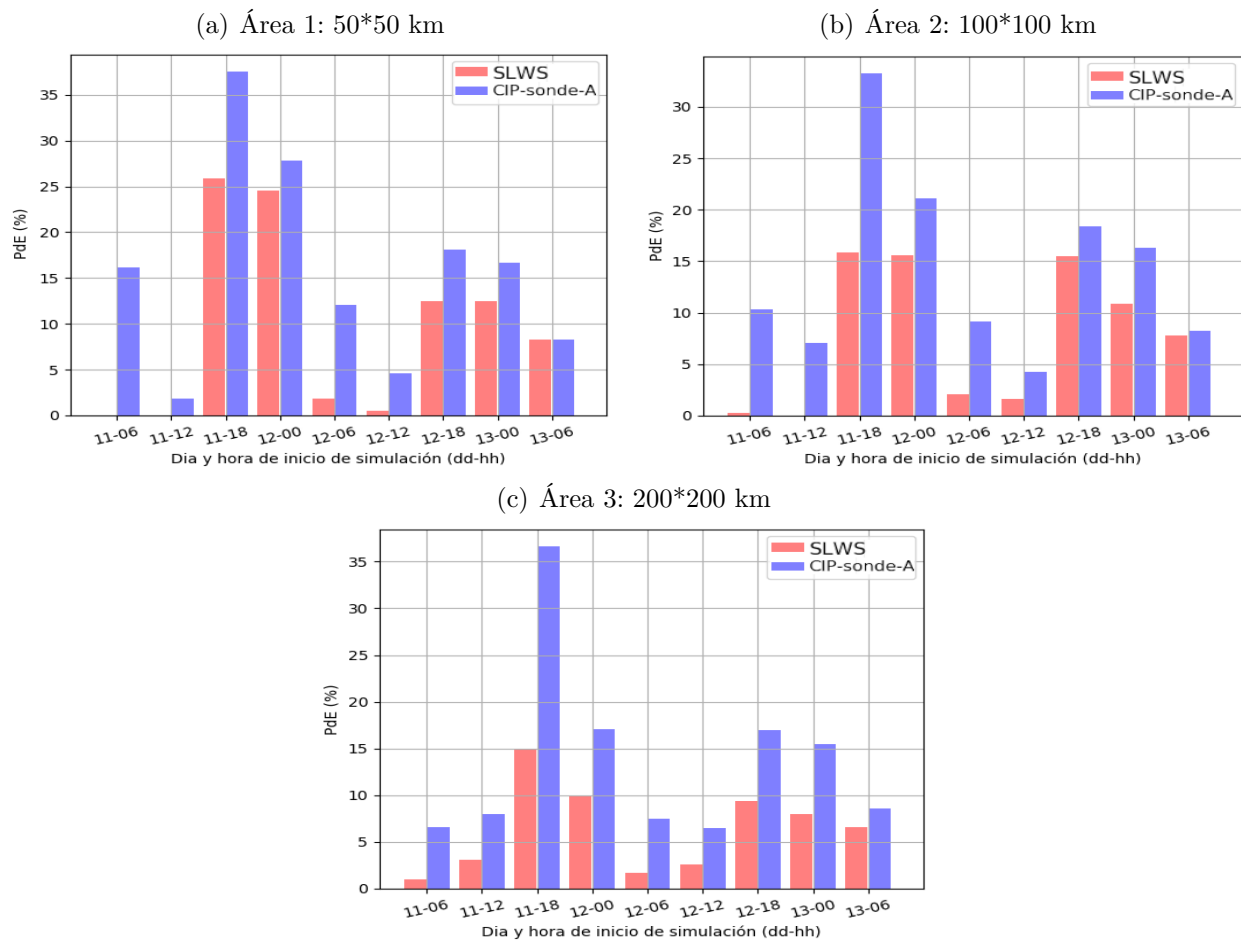


Figura 4.36: PdE para el 13 de marzo de 2016 a las 15:00 UTC (caso 6) en función de la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones. PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS para todos los niveles ente 600 y 350 hPa y para el (a) área 1, (b) área 2 y (c) área 3.

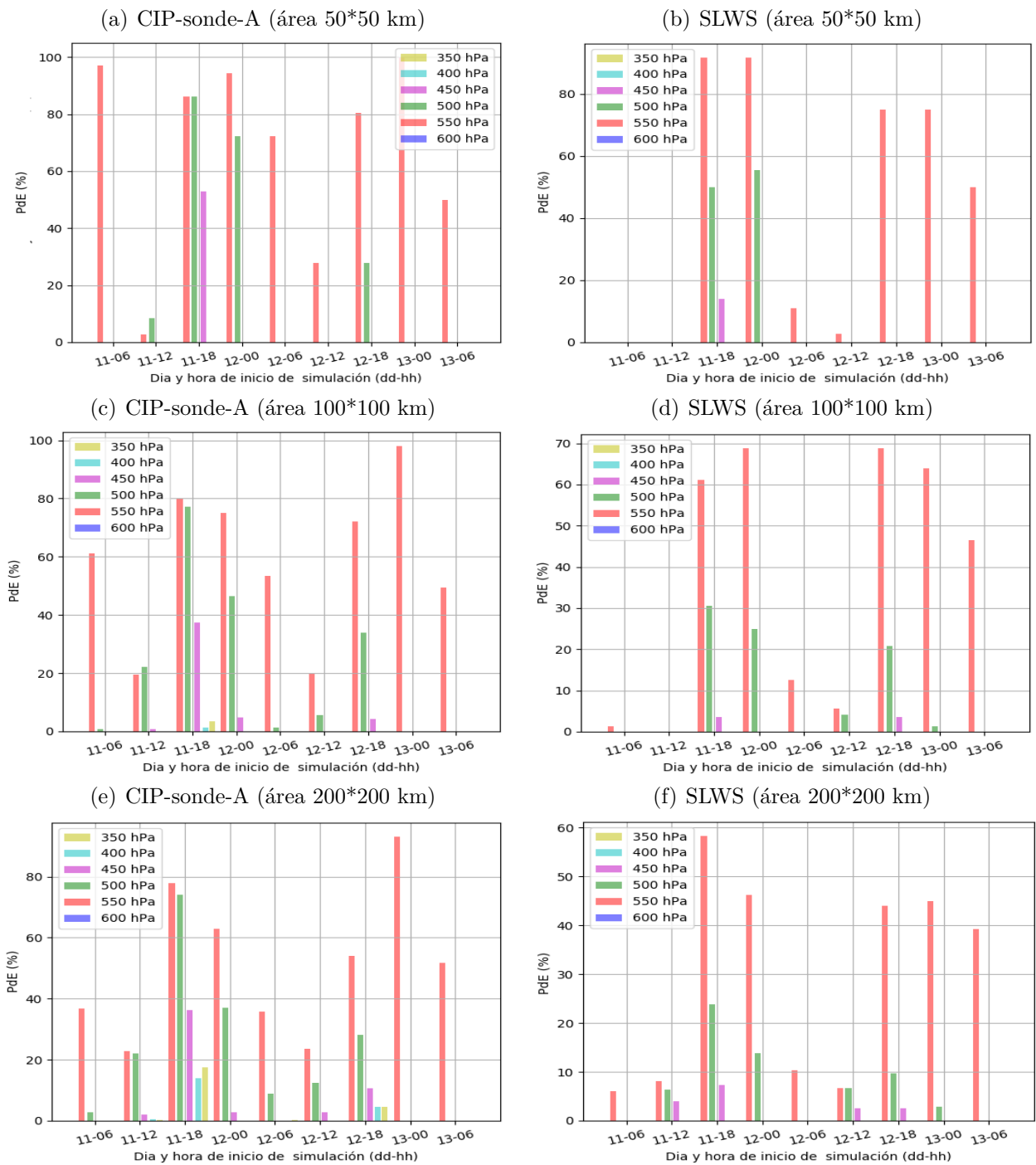


Figura 4.37: PdE para el 13 de marzo de 2016 a las 15:00 UTC (caso 6) en función a la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones y el nivel de presión.

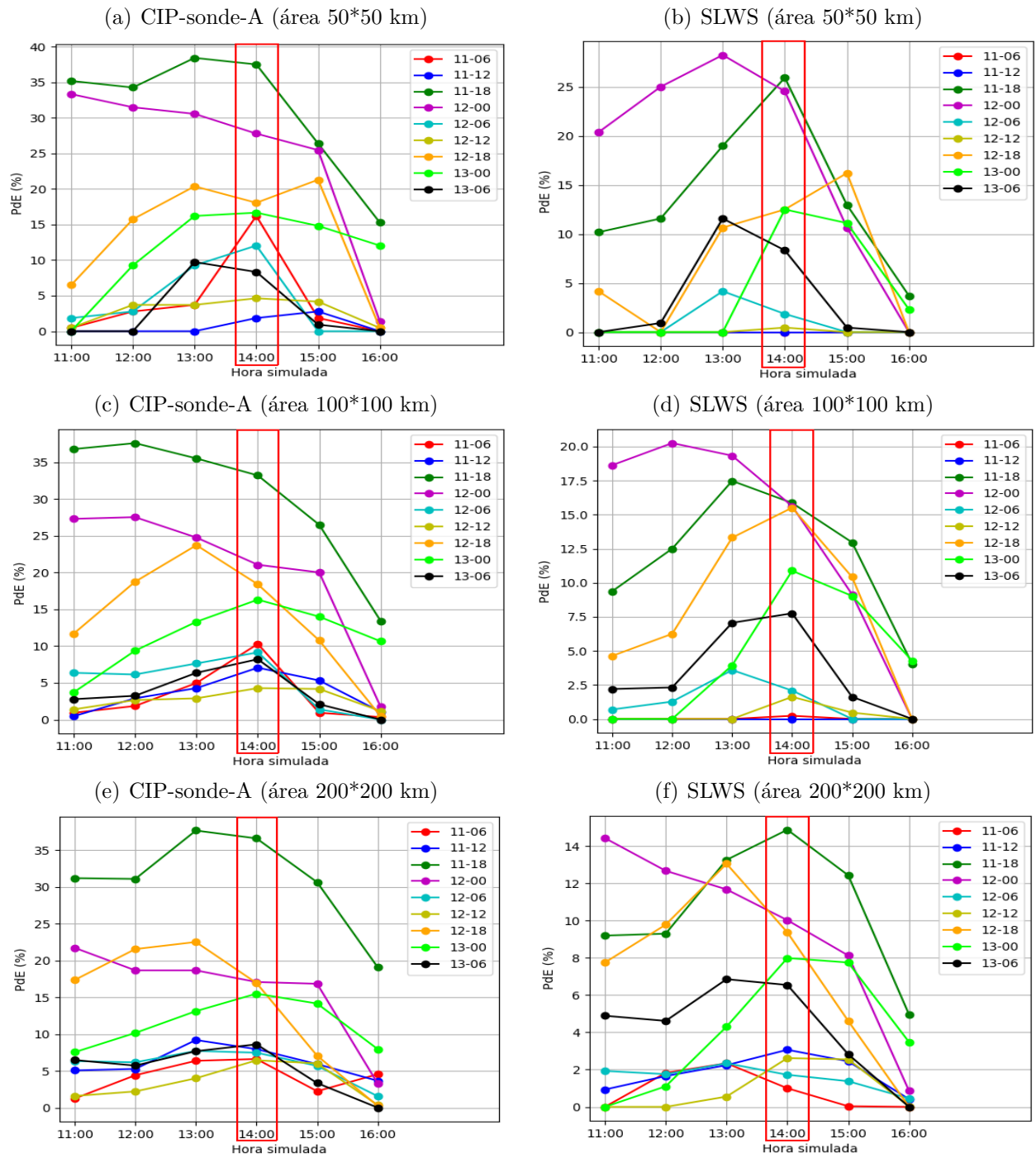


Figura 4.38: Evolución temporal de PdE para el 13 de marzo de 2016 (caso 6). El PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS aplicado a las 9 simulaciones para cada una de las tres áreas y todos los niveles entre 600 y 350 hPa.

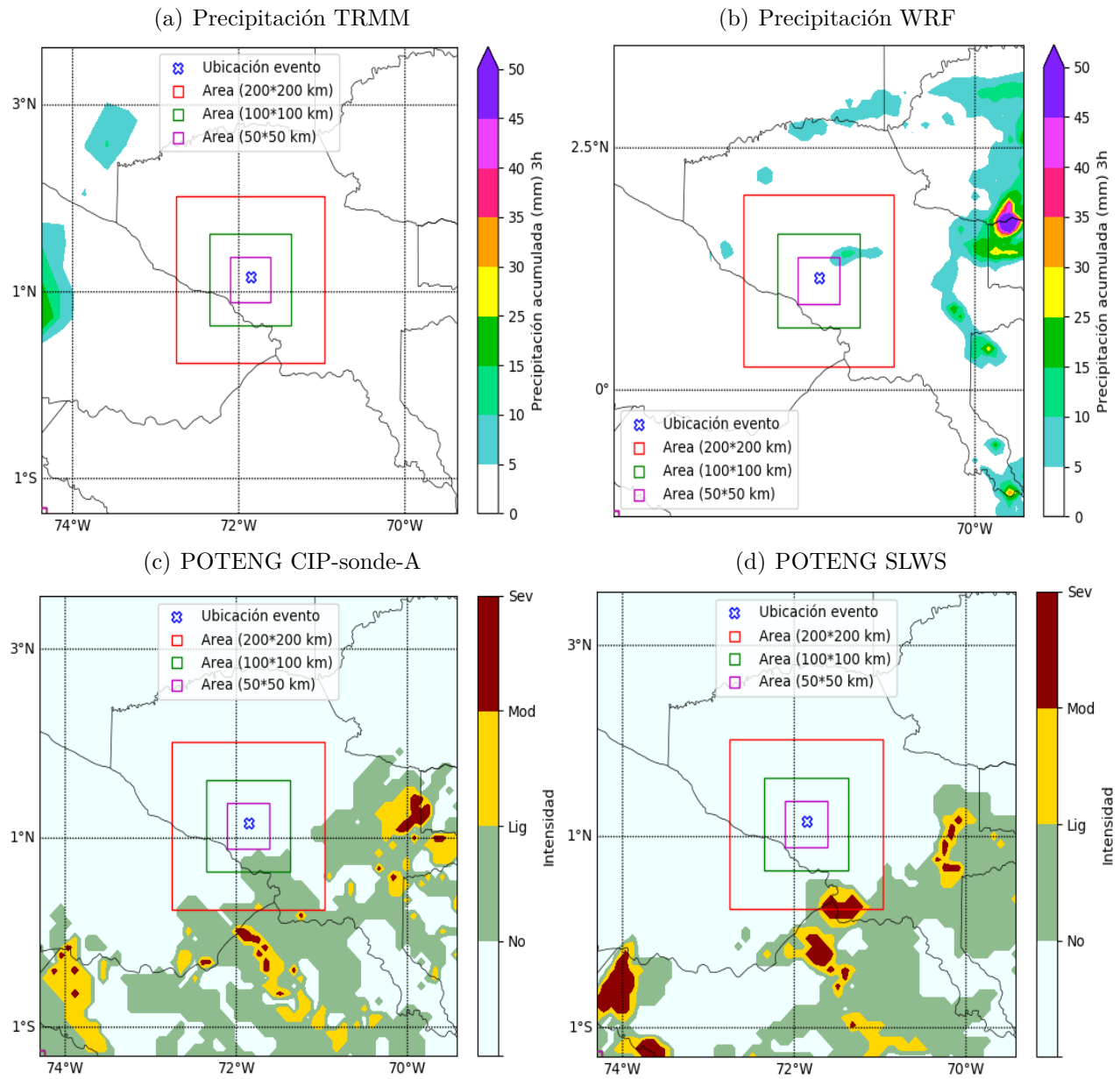


Figura 4.39: Precipitación acumulada entre las 13:00 a 15:00 UTC del 13 de marzo de 2016 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 15:00 UTC (caso 6) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 500 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 11 de marzo a las 12:00 UTC. simulación que más PdE muestra y catalogada como la mejor.

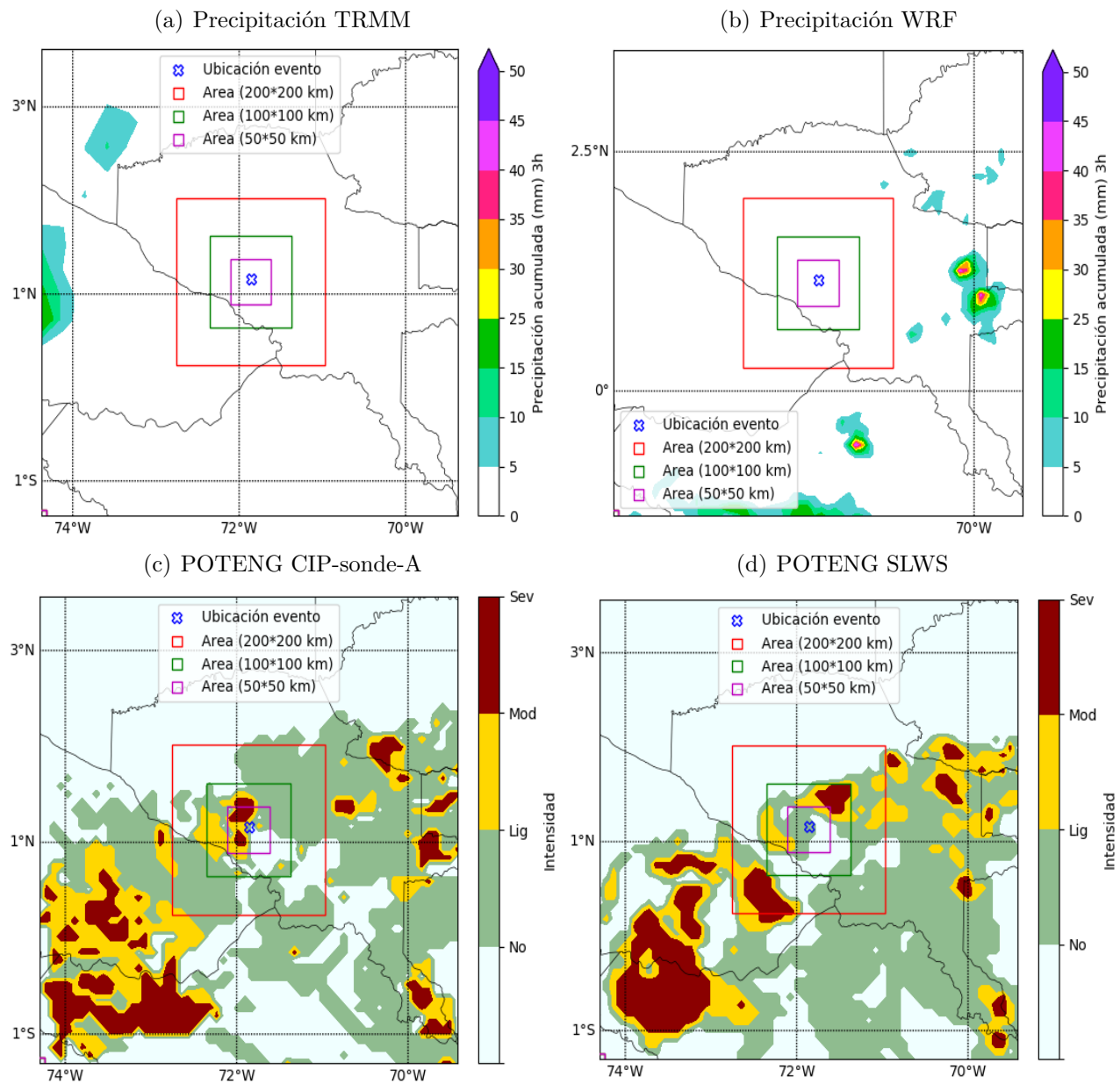


Figura 4.40: Precipitación acumulada entre las 13:00 a 15:00 UTC del 13 de marzo de 2016 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 15:00 UTC (caso 6) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 500 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 11 de marzo a las 18:00 UTC. simulación que menos PdE muestra y catalogada como la peor.

4.2.2.3. Caso 7

Las simulaciones analizadas para este caso, corresponden al 06 de marzo de 2016 a las 04:00 UTC. Se observa que, en las 4 simulaciones con horas de inicio más cercanas al evento, se reporta un PdE entre 0 % y 4 % para las 3 áreas y los dos algoritmos, representando una disminución con respecto al PdE registrado en las simulaciones con horas de inicio antes de las 18:00 UTC del 4 de marzo, Figura 4.41.

La simulación que menor PdE registró fue la iniciada para el día 05 de marzo a las 06:00 UTC y la que mayor PdE detectó fue la simulación del día 03 de marzo a las 18:00 UTC. El nivel isobárico que generalmente muestra mayor PdE es 550 hPa, de acuerdo a la Figura 4.42. En la Figura 4.43, se evidencia que generalmente a la hora en que se registró el evento hay aumento de PdE, con respecto a las horas de pronóstico anteriores a las 04:00 UTC.

La simulación que menos PdE detectó se registra en la Figura 4.44. La imagen de TRMM muestra una zona con precipitación al norte de la coordenada del evento, que concuerda con la nubosidad presentada en las observaciones del GOES-13. La simulación del modelo WRF con hora de inicio a las 06:00 UTC del 5 de marzo, coincide en detectar precipitación en la zona y en algunos puntos pequeños alrededor del evento, sin embargo, este sobrestima la intensidad. Los algoritmos no detectan PdE en las áreas 1 ni 2 y detecta menos de 3 % para el área 3. Este evento evidencia una muy buena aproximación de WRF a las observaciones y al no engelamiento registrado por la aeronave.

La simulación que más detectó PdE se observa en la Figura 4.45. En esta se observa sobrestimación de precipitación por parte del modelo al este y sur del lugar en el que se registró el evento, así como, CIP-sonde-A muestra en el nivel de 550 hPa un gran valor de PdE, obteniendo en el área 1 un 52 %. Por su parte, SLWS muestra un 5 % para la misma área. La mayoría de las simulaciones muestran para las tres áreas PdE con valores menores al 10 % para CIP-sonde-A y 5 % para SLWS. Las imágenes satelitales de GOES-13 y TRMM no muestran nubosidad dominante en el sector, por lo cual de existir POTENG la aeronave pudo tener alta capacidad de maniobra para no entrar en estas condiciones.

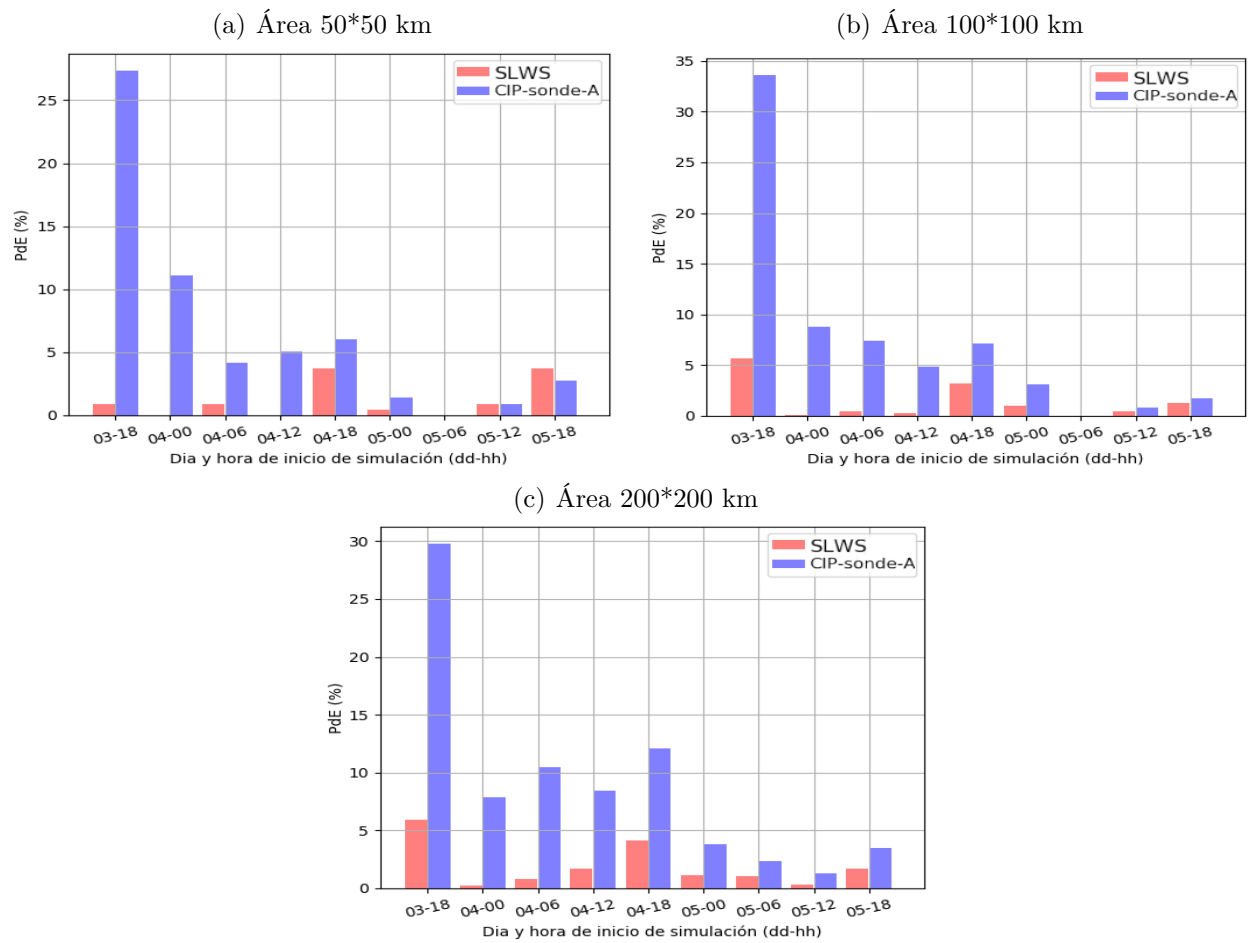


Figura 4.41: PdE para el 6 de marzo de 2016 a las 04:00 UTC (caso 7) en función de la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones. PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS para todos los niveles ente 600 y 350 hPa y para el (a) área 1, (b) área 2 y (c) área 3.

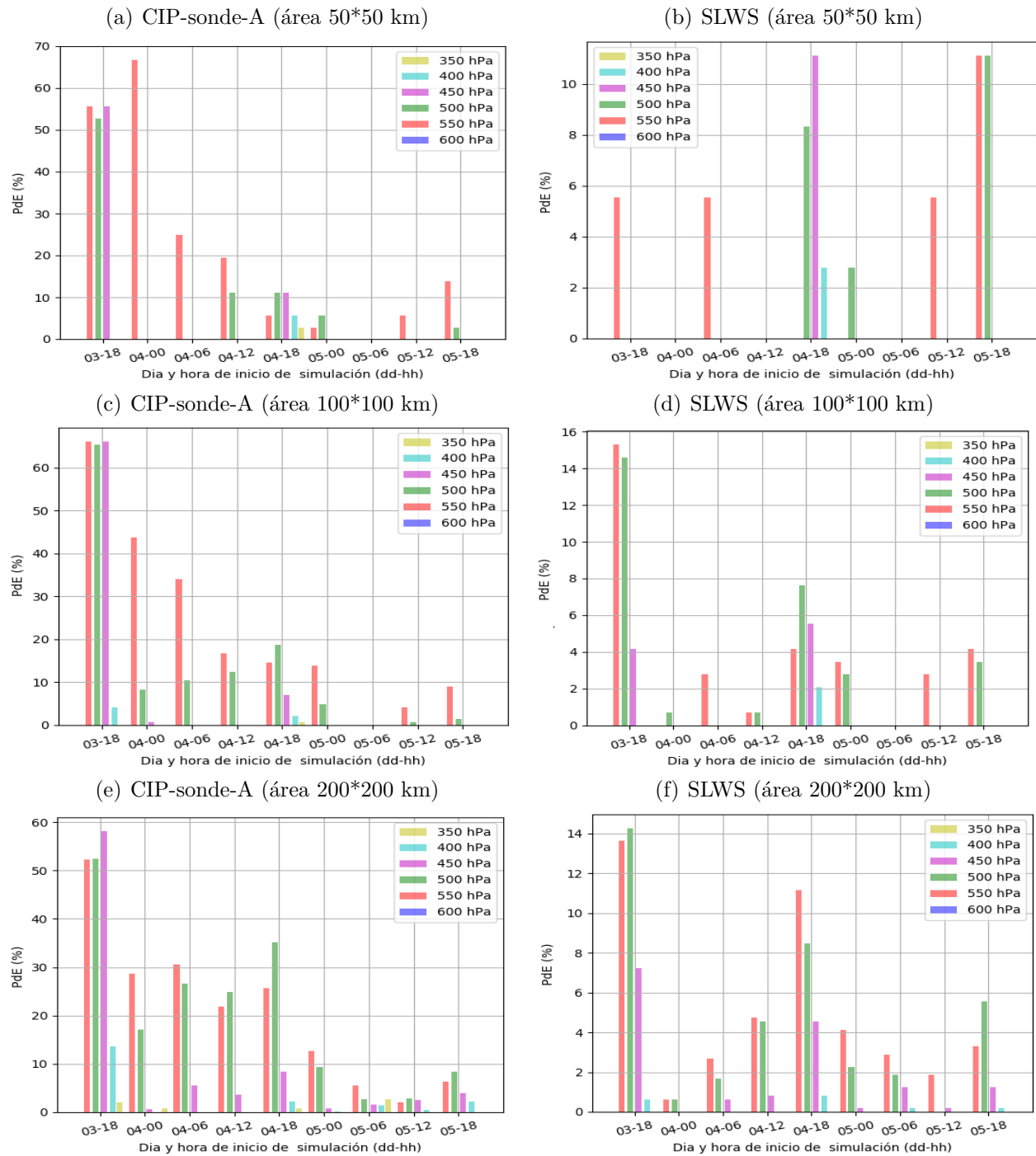


Figura 4.42: PdE para el 6 de marzo de 2016 a las 04:00 UTC (caso 7) en función a la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones y el nivel de presión.

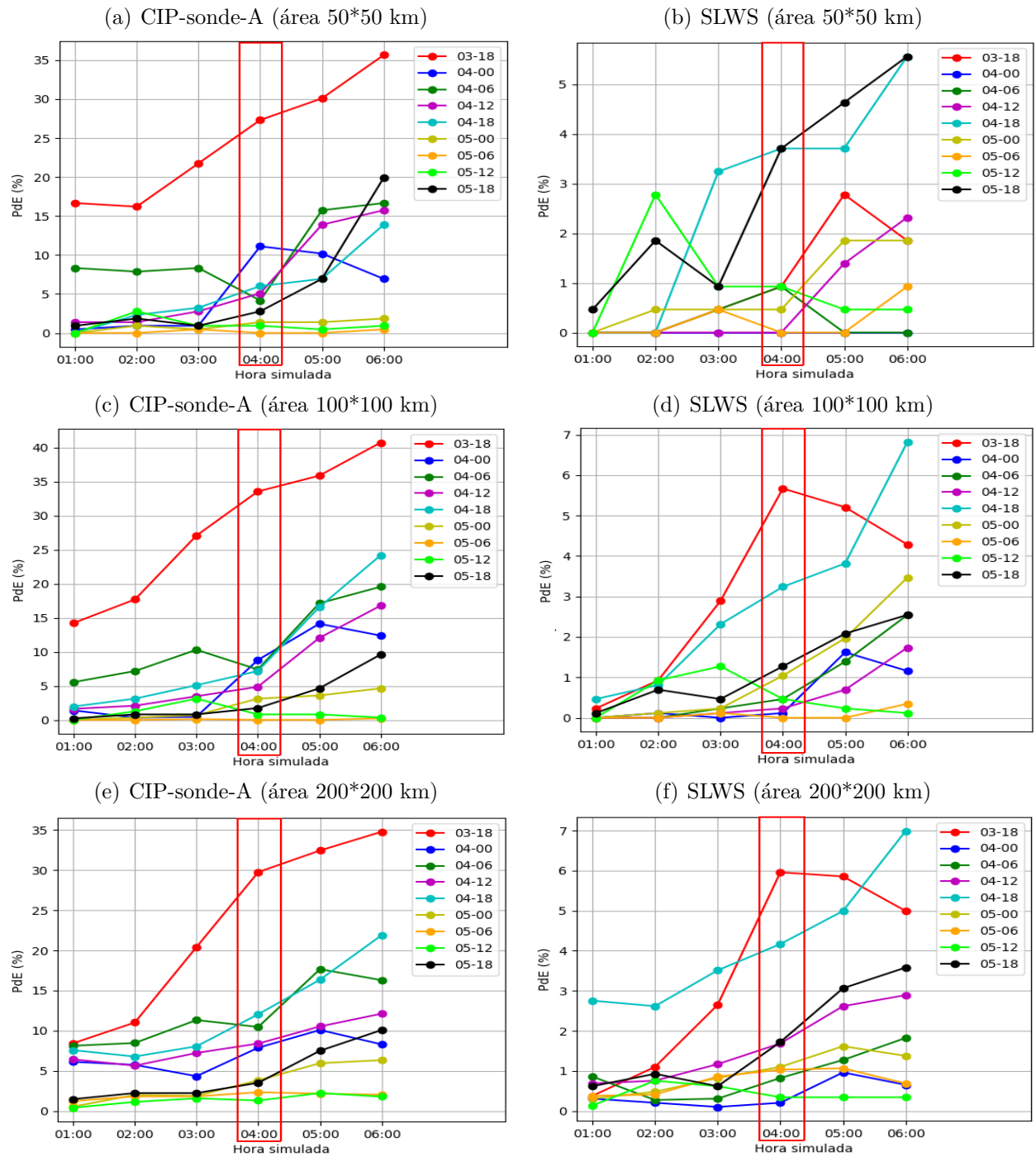


Figura 4.43: Evolución temporal de PdE para el 6 de marzo de 2016 (caso 7). El PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS aplicado a las 9 simulaciones para cada una de las tres áreas y todos los niveles entre 600 y 350 hPa.

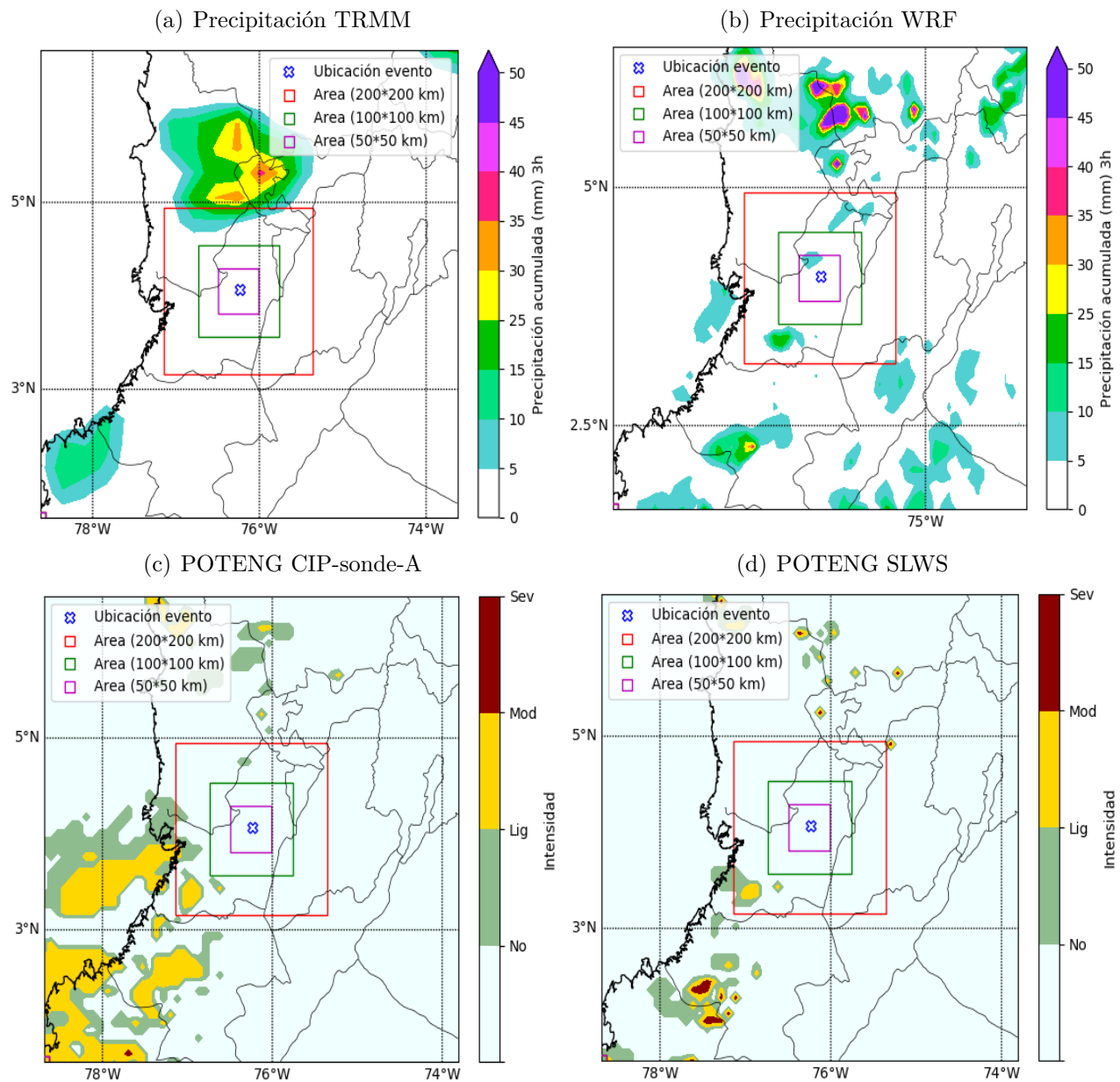


Figura 4.44: Precipitación acumulada entre las 04:00 a 06:00 UTC del 6 de marzo de 2016 según (a) los datos TRMM y (b) según WRF. POTENG para las 04:00 UTC (caso 7) según los algoritmos (c) CIP-sonde-A y (d) SLWS para 500 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 05 de marzo a las 06:00 UTC. Simulación que más PdE muestra y catalogada como la mejor.

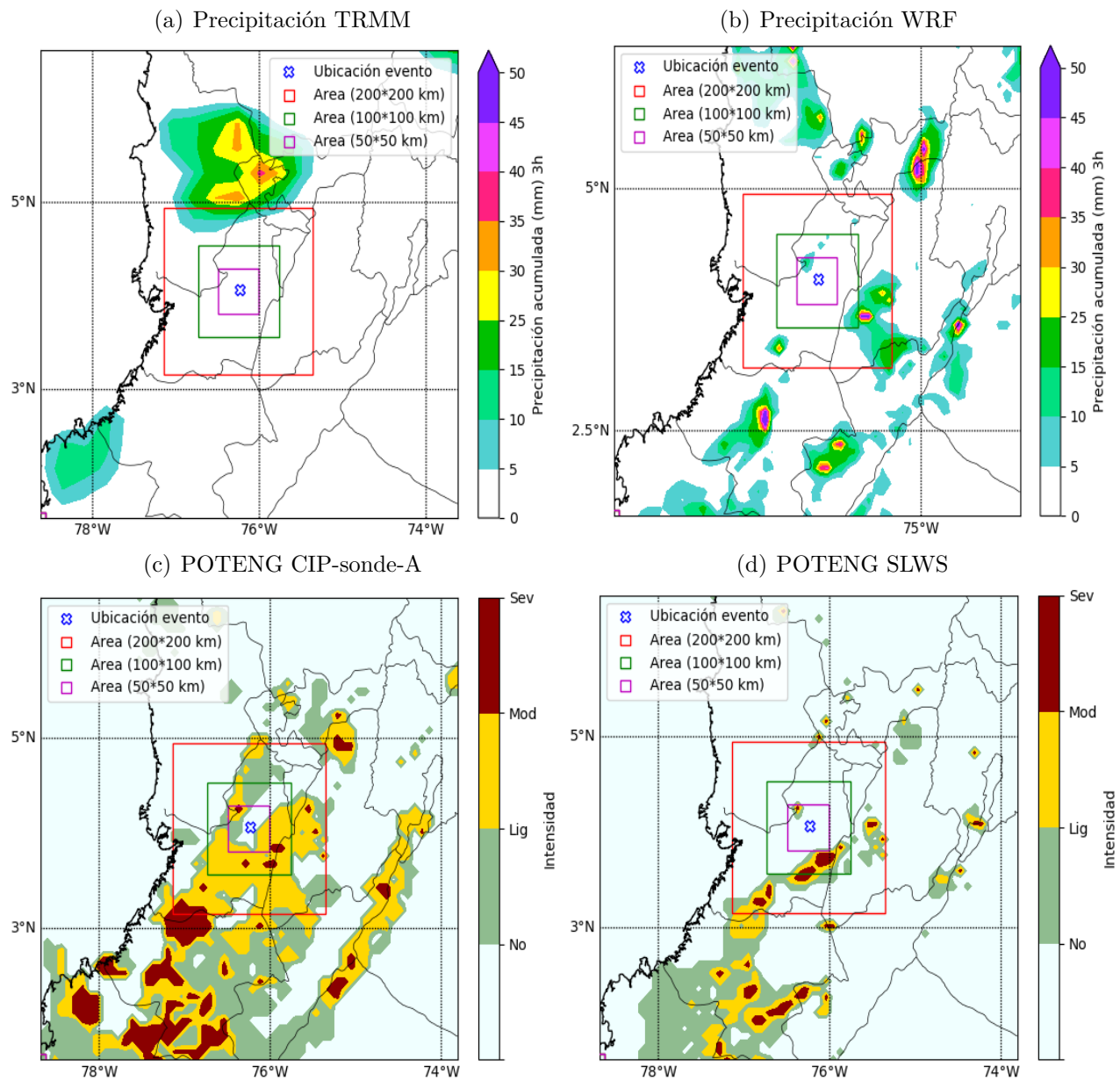


Figura 4.45: Precipitación acumulada entre las 04:00 a 06:00 UTC del 6 de marzo de 2016 según (a) los datos TRMM y b) según WRF. POTENG para las 04:00 UTC (caso 7) según los algoritmos c) CIP-sonde-A y d) SLWS para 500 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 03 de marzo a las 18:00 UTC. simulación que menos PdE muestra y catalogada como la peor.

4.2.2.4. Caso 8

Para este caso, fueron analizadas las simulaciones del día 17 de octubre de 2016 a las 13:00 UTC. En la Figura 4.46, se observa que SLWS no detecta PdE en ninguna simulación ni en ningún área, excepto por la simulación del día 15 a las 18:00 UTC, que muestra un valor de PdE de 0.5 en el área 3. Por el contrario, CIP-sonde-A en las simulaciones del día 16 a las 18:00 UTC y del día 17 a las 00:00 UTC, muestra valores de PdE de 2.7 % y 1.8 % para el área 1 y se mantienen valores similares para las áreas 2 y 3. De acuerdo a la Figura 4.47, el nivel que más reportó POTENG según CIP-sonde-A fueron los niveles de 400 y 450 hPa.

La simulación que menor PdE registró fue la iniciada el día 16 a las 12:00 UTC y la que mayor PdE detectó fue la simulación del día 16 a las 18:00 UTC. En la Figura 4.48 se evidencia una disminución del PdE para CIP-sonde-A antes de la hora del evento, en SLWS se mantiene PdE igual a cero.

La Figura 4.49 muestra la precipitación acumulada de acuerdo a las observaciones TRMM y a la simulación que menos PdE detectó. No se evidencia precipitación de acuerdo a las observaciones TRMM; igualmente, el modelo WRF tampoco muestra precipitación en las áreas de interés, no obstante, fuera de estas áreas CIP-sonde-A registra precipitación al norte y noreste del punto de interés, lo cual no se encuentra en las imágenes de TRMM.

La simulación que inicio el día 16 de octubre a las 18:00 UTC, fue la que más detectó PdE, Figura 4.50. Se observa que en las áreas 1, 2 y 3, tanto de TRMM como la simulación, no muestran precipitación acumulada y el algoritmo SLWS no muestra POTENG. Por el contrario, CIP-sonde-A detectó las 3 áreas con valores de 16 % para el área 1 y aproximadamente 12 % para las áreas 2 y 3 en el nivel 400 hPa.

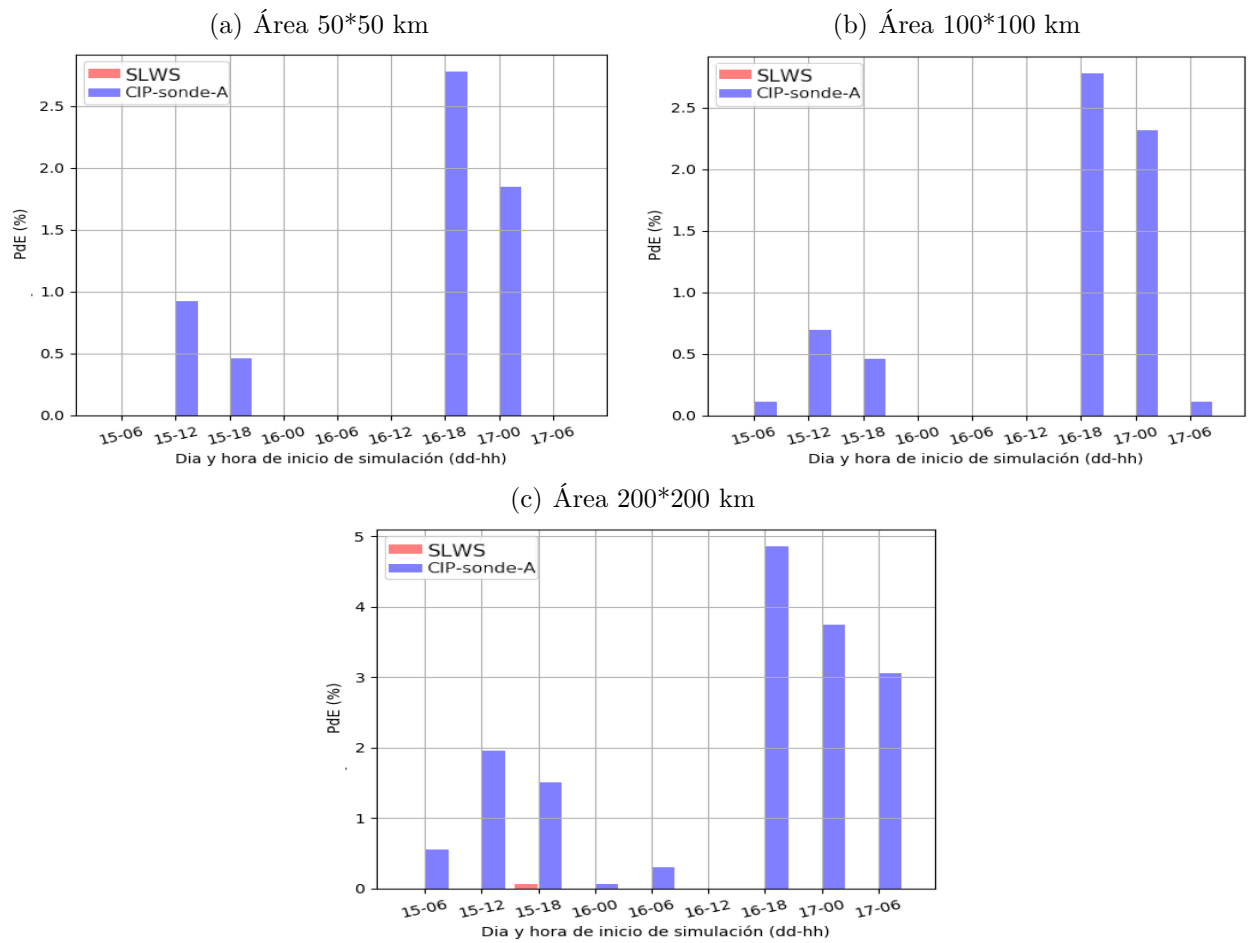


Figura 4.46: PdE para el 17 de octubre de 2016 a las 13:00 UTC (caso 8) en función de la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones. PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS para todos los niveles ente 600 y 350 hpa y para el (a) área 1, (b) área 2 y (c) área 3.

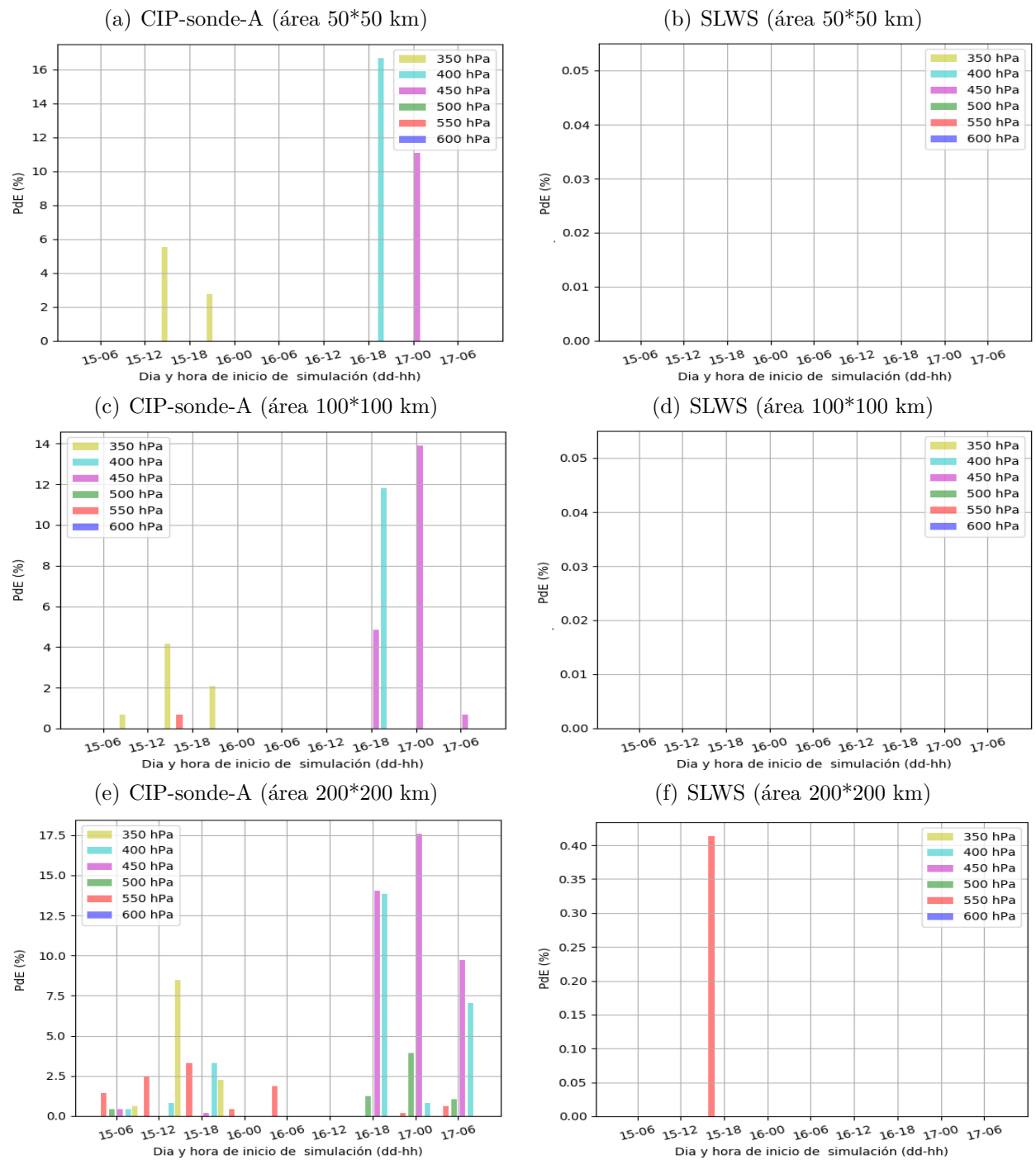


Figura 4.47: PdE para el 17 de octubre de 2016 a las 13:00 UTC (caso 8) en función a la hora de inicio de cada una de las 9 simulaciones y el nivel de presión.

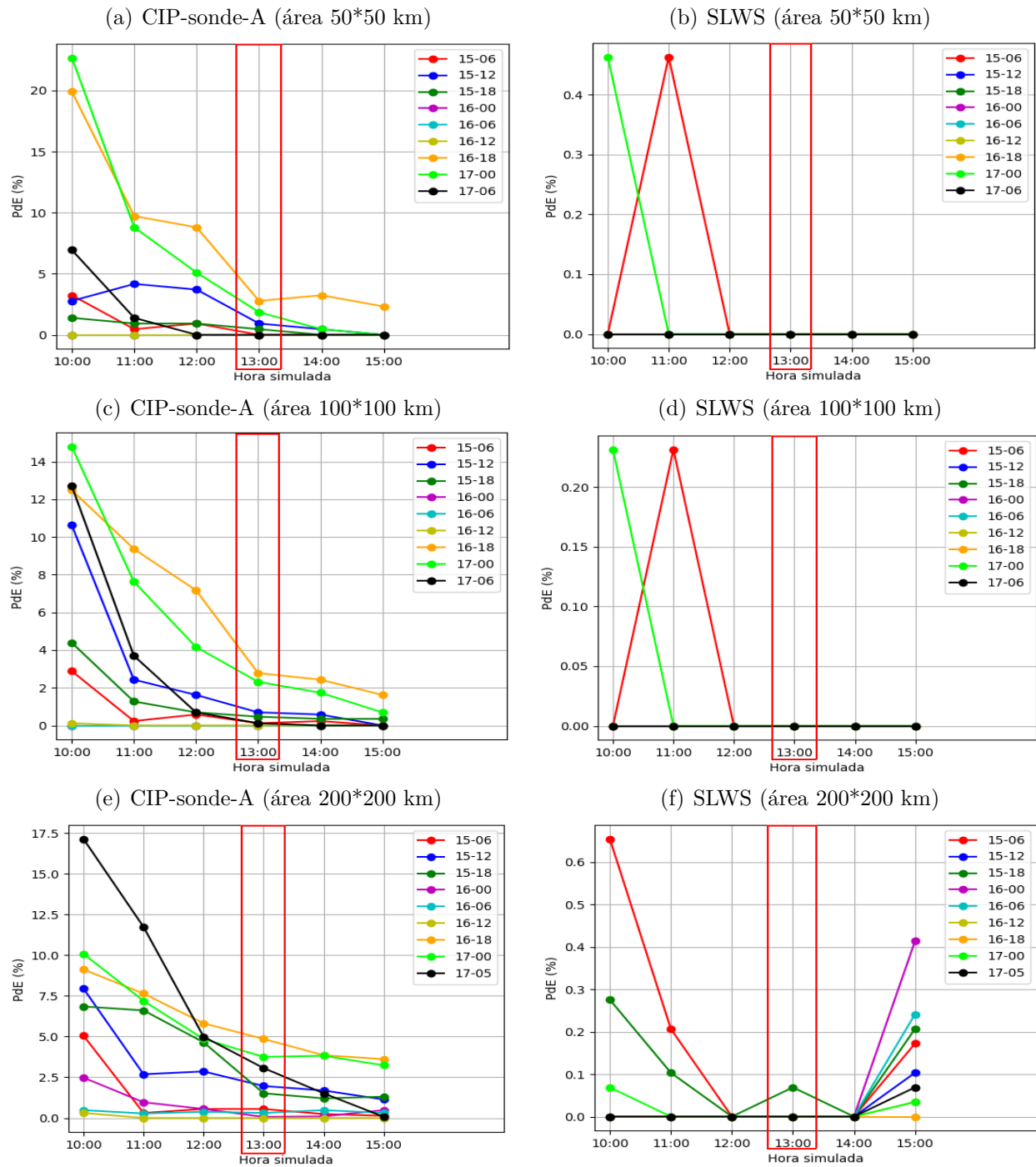


Figura 4.48: Evolución temporal de PdE para el 17 de octubre de 2016 (caso 8). El PdE fue calculado con CIP-sonde-A y SLWS aplicado a las 9 simulaciones para cada una de las tres áreas y todos los niveles entre 600 y 350 hPa.

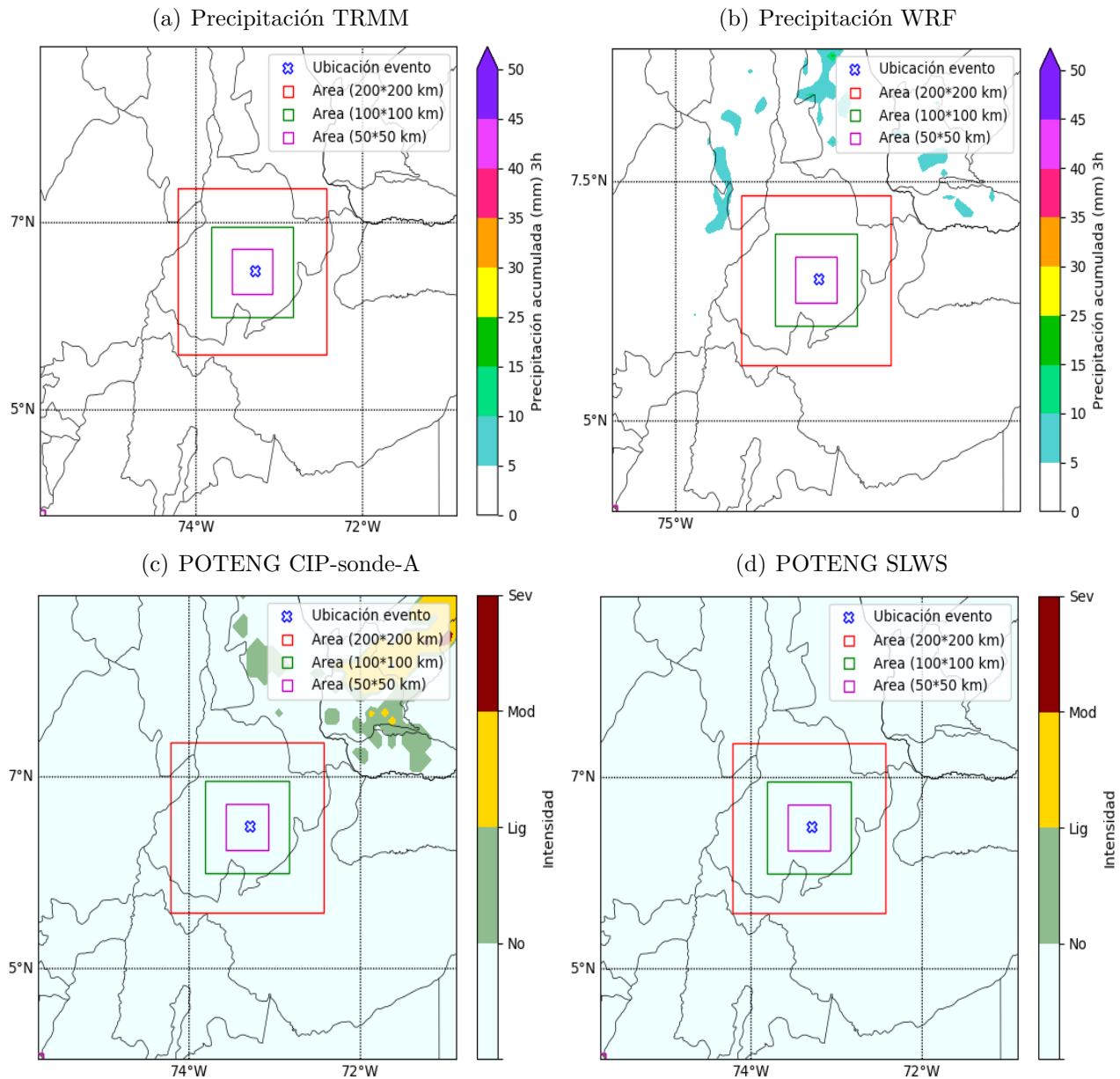


Figura 4.49: Precipitación acumulada entre las 13:00 a 15:00 UTC del 17 de octubre de 2016 según (a) los datos TRMM y b) según WRF. POTENG para las 13:00 UTC (caso 8) según los algoritmos c) CIP-sonde-A y d) SLWS para 400 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 16 de octubre a las 12:00 UTC. simulación que más PdE muestra y catalogada como la mejor.

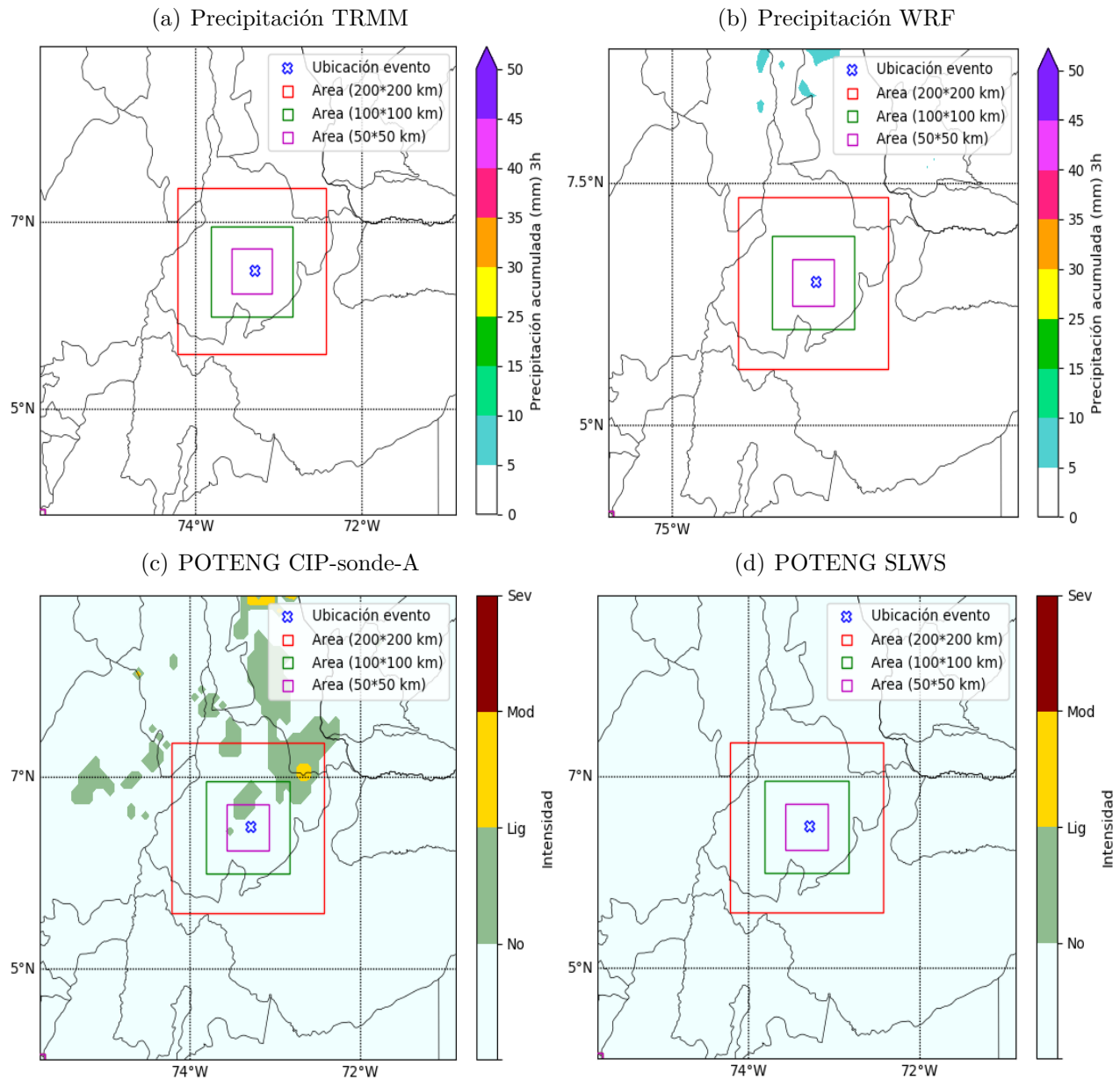


Figura 4.50: Precipitación acumulada entre las 13:00 a 15:00 UTC del 17 de octubre de 2016 según (a) los datos TRMM y b) según WRF. POTENG para las 13:00 UTC (caso 8) según los algoritmos c) CIP-sonde-A y d) SLWS para 400 hPa. Precipitación y POTENG fueron calculados con datos de la simulación con inicio el día 16 de octubre a las 18:00 UTC. simulación que menos PdE muestra y catalogada como la peor.

4.3. Conclusiones y Recomendaciones

El algoritmo CIP-sonde-A a partir de las salidas del modelo WRF de la FAC, demuestra mayor eficiencia para detectar los casos de estudio seleccionados que SLWS en las áreas con menor distancia de detección. Aunque CIP-sonde-A genera mayor cantidad de falsas alarmas, el porcentaje de eventos subestimados por SLWS es mayor que la sobrestimación de CIP-sonde-A.

Teniendo en cuenta los resultados de los algoritmos, se sugiere probar nuevos rangos para cada algoritmo con los eventos disponibles, por ejemplo, que el contenido de agua líquida en SLWS sea mayor a 0, al igual que en CIP-sonde-A se acorte el rango de POTENG no de 0.01 si no mayor a 0.15 o 0.4, con el fin de observar posibles mejoras en las subestimación o sobrestimación en cada caso.

Los niveles que mayor PdE detectados fueron los niveles de 550, 500, 450 Y 400 hPa coincidente con resultados de la climatología.

El modelo no arroja resultados satisfactorios en cuanto a la precipitación acumulada en todos los casos, se evidencian fallas significativas en los casos 2, 4 y 6. En los demás casos, los resultados son satisfactorios y coincidentes con los patrones de precipitación y POTENG. No se observa un patrón claro de la evolución en el tiempo de las mejores simulaciones; aquellas con horas de inicio más cercanas a los eventos no arrojaron los mejores resultados. Esto a pesar de que se tendrían, en principio, unas condiciones iniciales más apropiadas, con base el carácter caótico de la atmósfera.

En 2 de los 4 casos de no engelamiento se generaron alertas de engelamiento por parte de los algoritmos en las áreas de detección, por lo cual se recomienda en futuras investigaciones tener una base de datos observados más robusta en relación a eventos de no engelamiento, ya que estos pueden encontrarse cerca a zonas engelantes y no reportar o registrar el suceso; sin embargo, en este caso se observa baja precipitación alrededor de todos los casos de no engelamiento, lo que puede sugerir fallas de detección por parte de los algoritmos y el modelo WRF.

La metodología propuesta ayuda a generar un diagnóstico de la habilidad del modelo para reproducir casos de engelamiento en eventos reales de aeronaves, metodología que se realiza por primera vez para el territorio colombiano.

El presente estudio es la primera aproximación al uso de datos de aeronaves para validación de pronóstico del tiempo en el país. Aunque los pronósticos no son perfectos tienen utilidad para la toma de decisiones concernientes a la realización de operaciones aéreas. Para generar mayor aprovechamiento y mejora de los algoritmos es necesaria la validación de más

herramientas, teorías y parametrizaciones respecto a sistemas de reportes y datos en vuelo de aeronaves. También es necesario tener mayor disponibilidad de reportes AIREP, SIGMET, informes de seguridad aeronáutica y datos registrados en sistemas como FDR.

Anexos

Apéndice A

Comparación de Algoritmo CIP-sonde-A y Resultados de Algoritmos RAOB

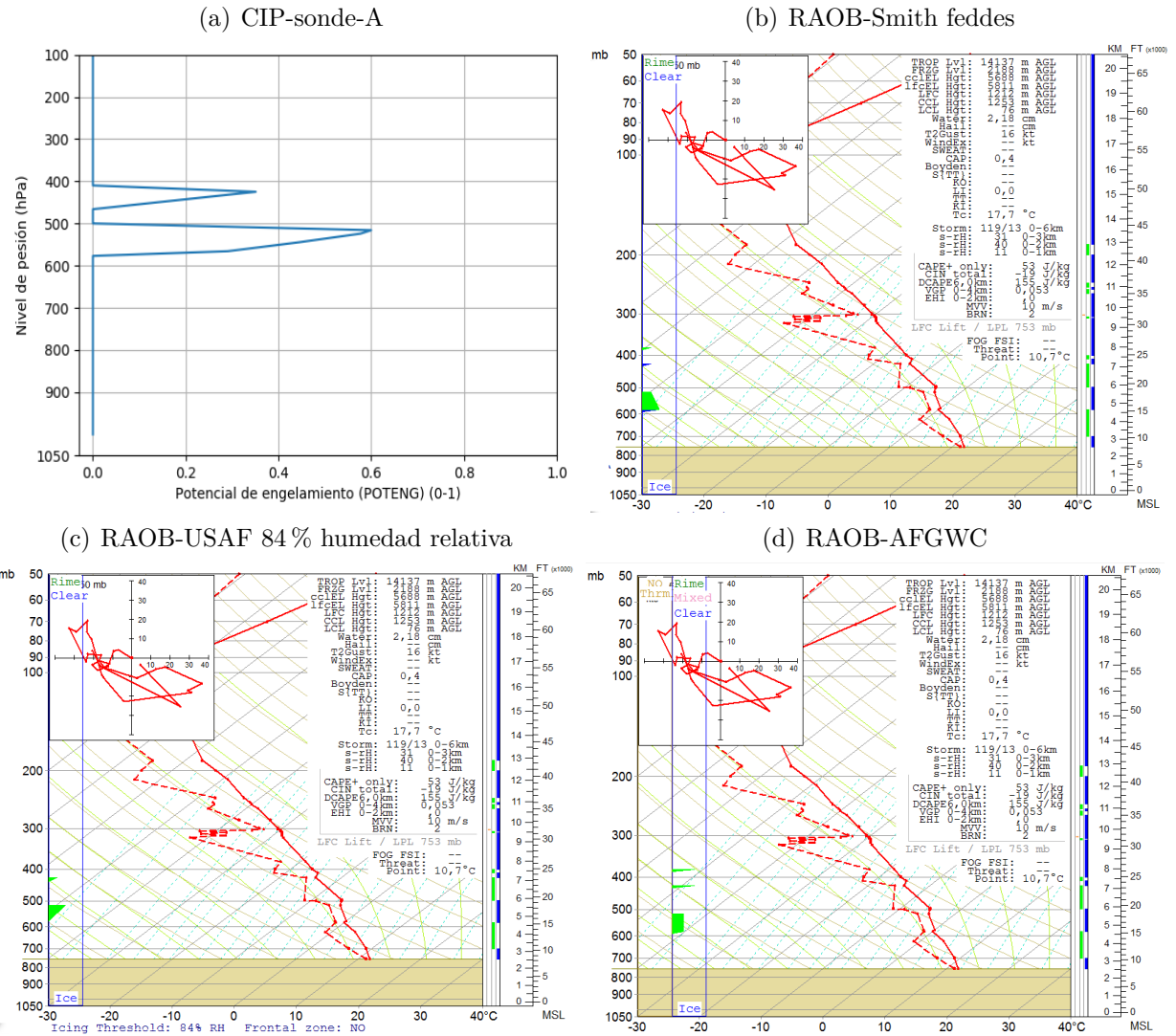


Figura A.1: Comparación potencial de engelamiento estimado por: Algoritmo CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC 01-01-2018.

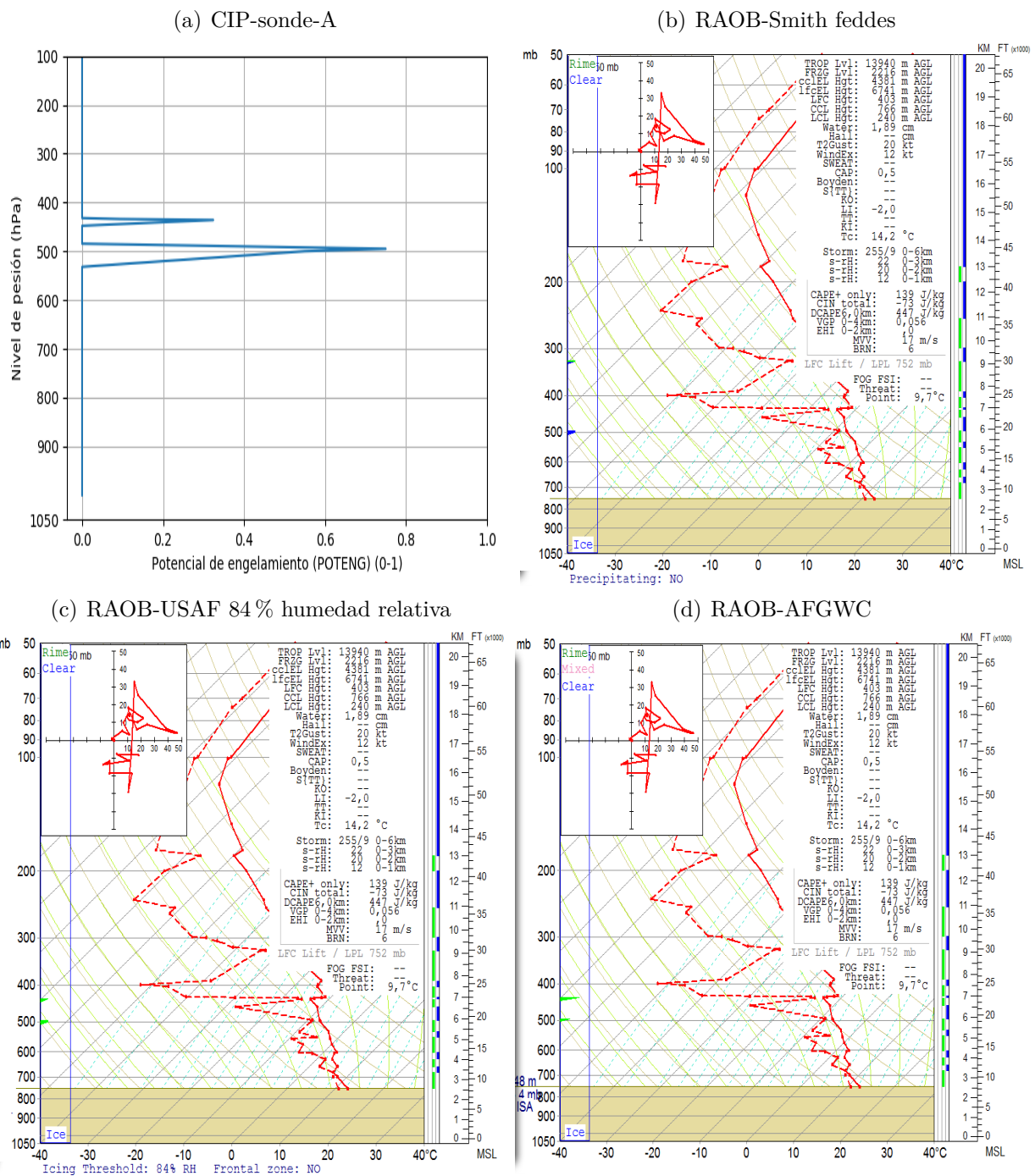


Figura A.2: Comparación potencial de engelamiento estimado por: Algoritmo CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC 01-03-2018.

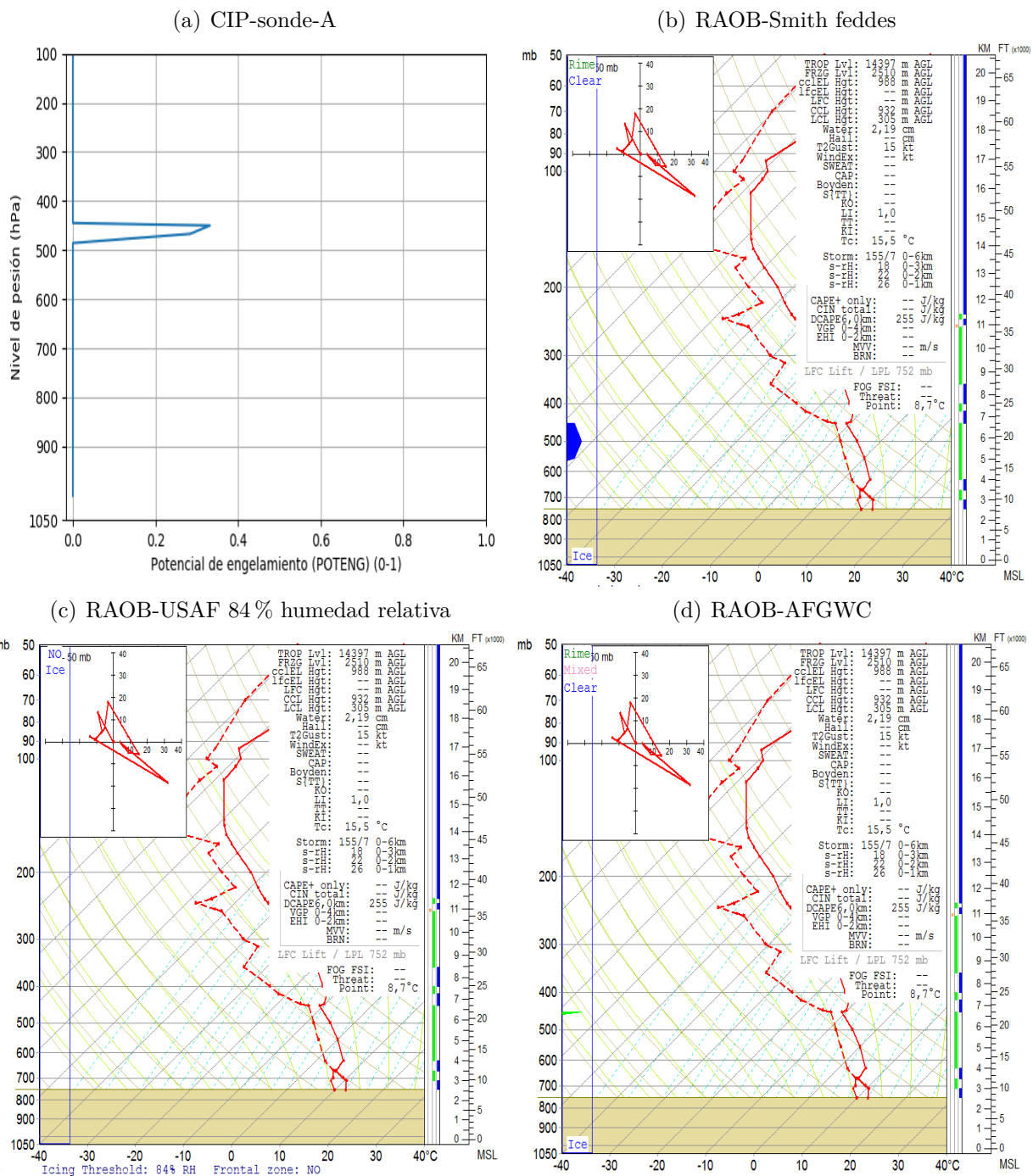


Figura A.3: Comparación potencial de engelamiento estimado por: Algoritmo CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC 01-05-2018.

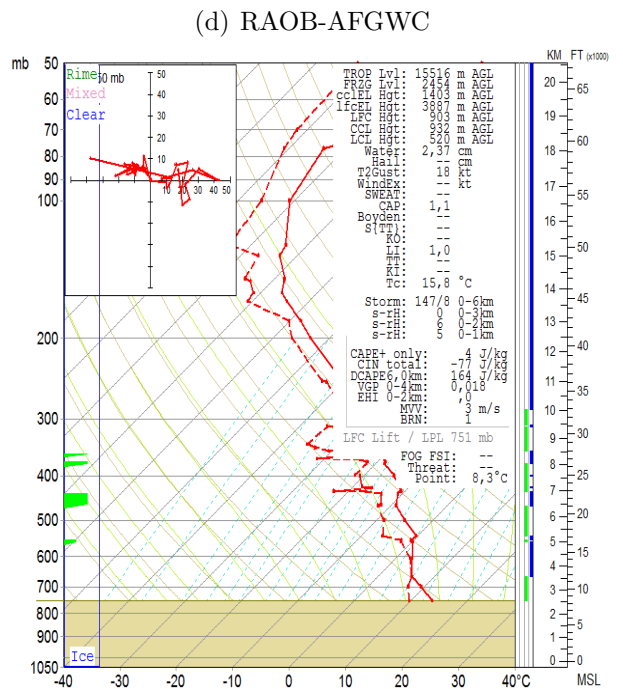
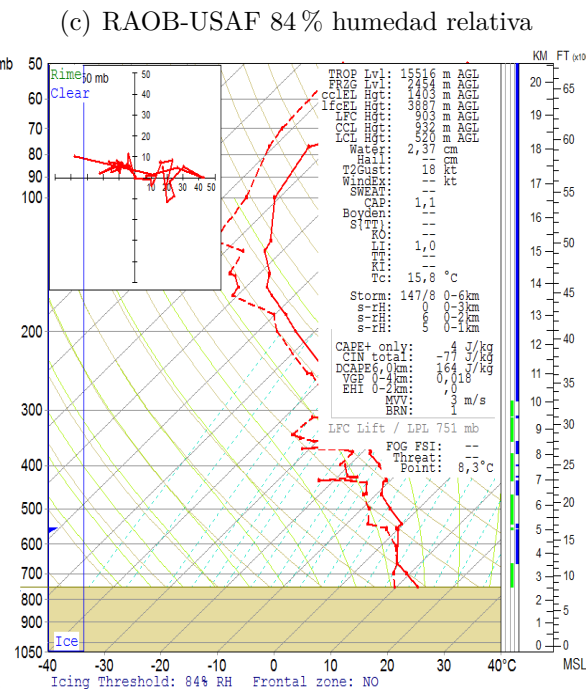
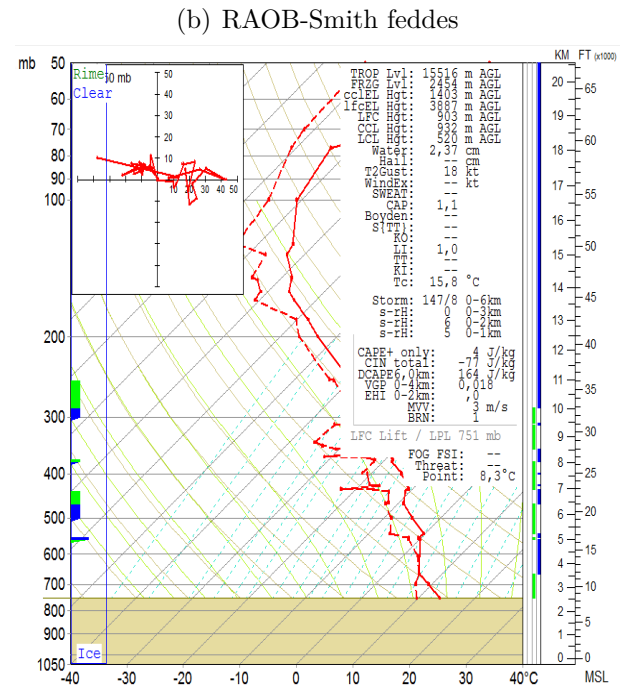
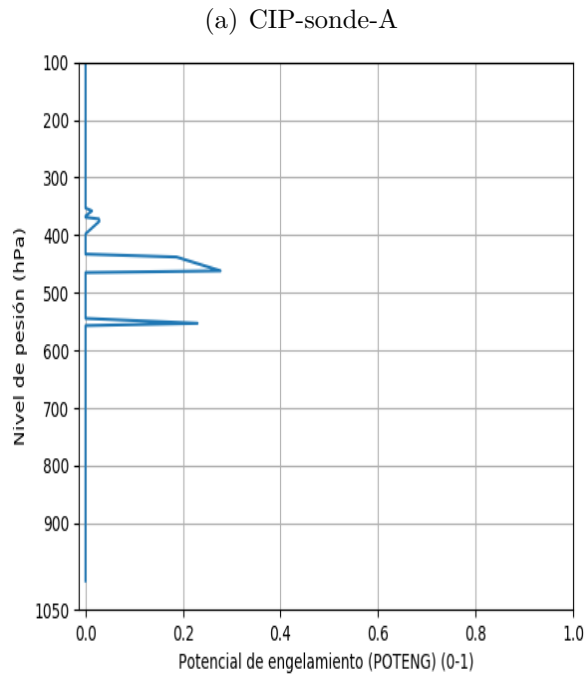


Figura A.4: Comparación potencial de engelamiento estimado por: Algoritmo basado en CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84%HR y AFGWC 01-06-2018.

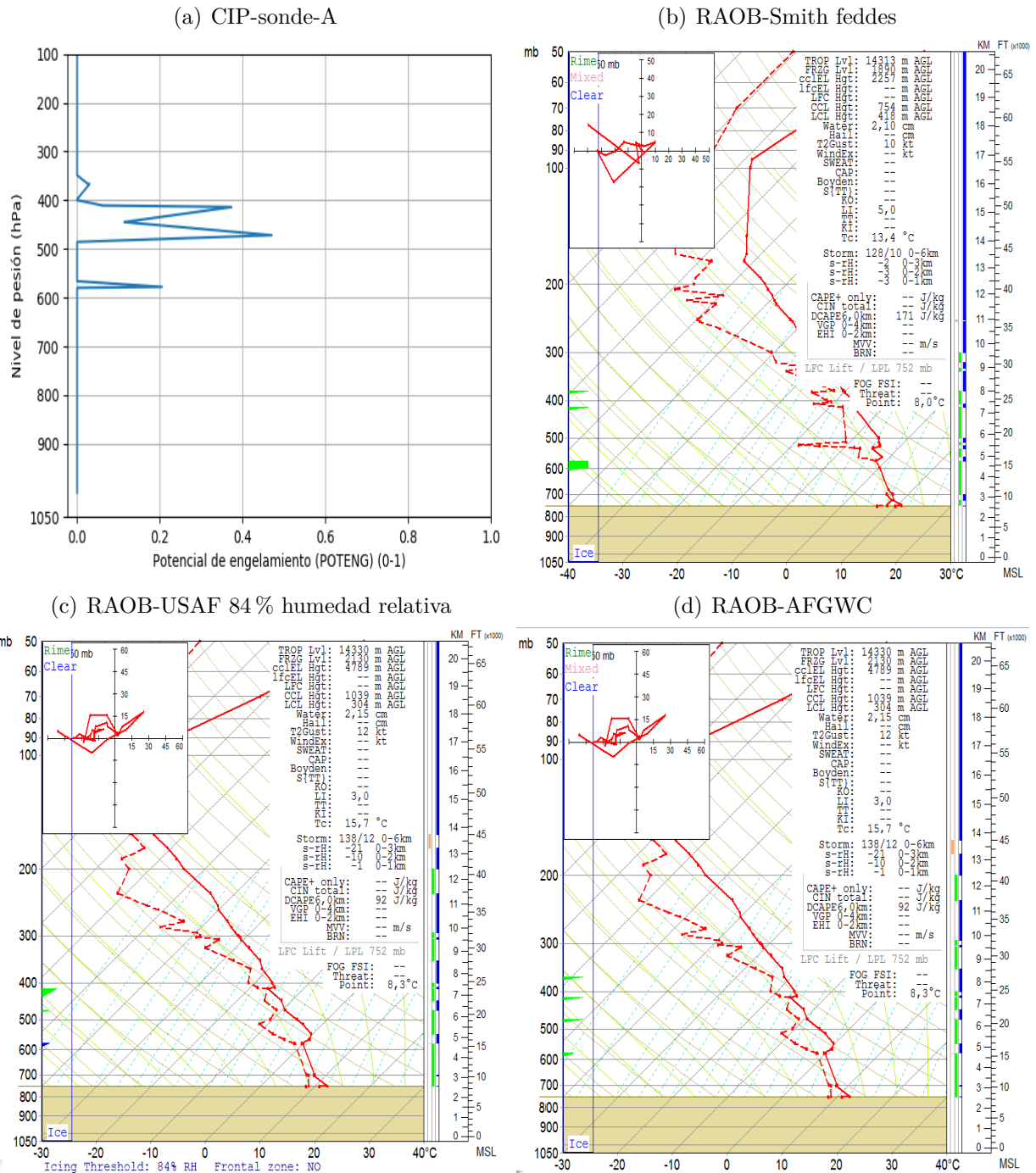


Figura A.5: Comparación potencial de engelamiento estimado por: Algoritmo basado en CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84%HR y AFGWC 01-08-2018.

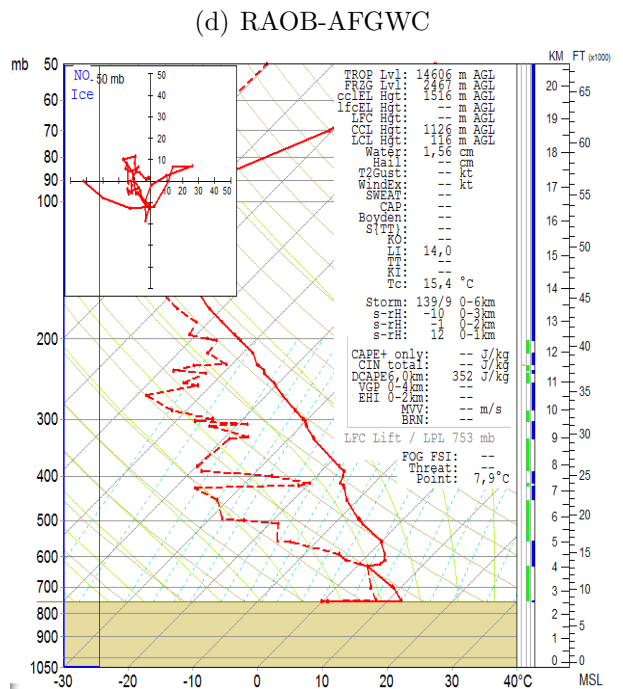
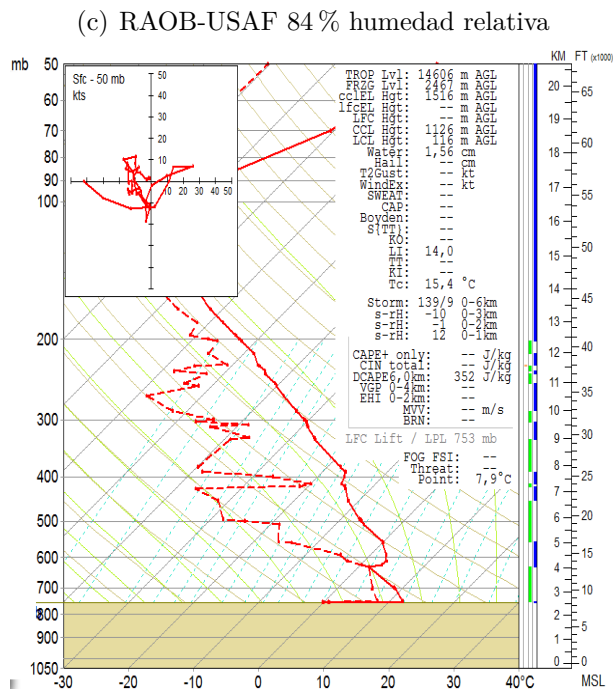
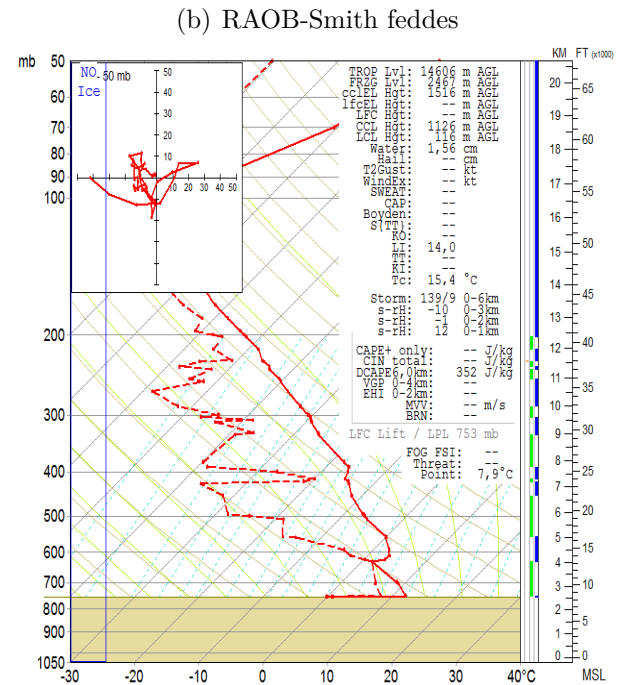
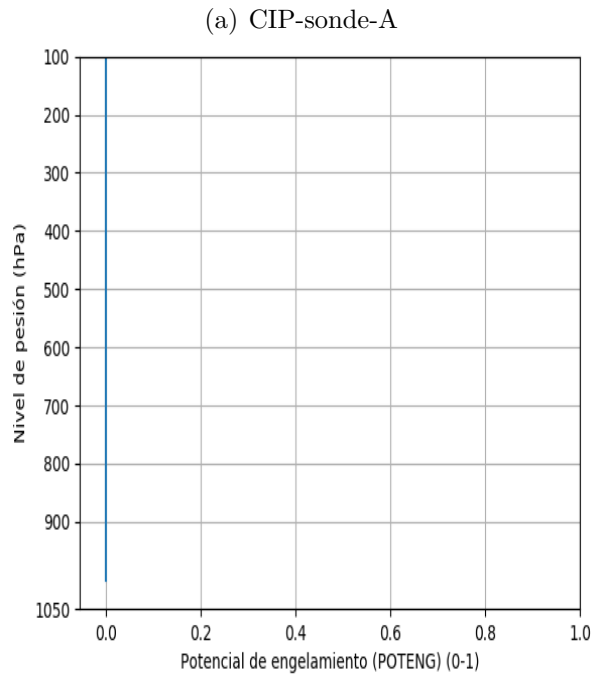


Figura A.6: Comparación potencial de engelamiento estimado por: Algoritmo basado en CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC 01-09-2018.

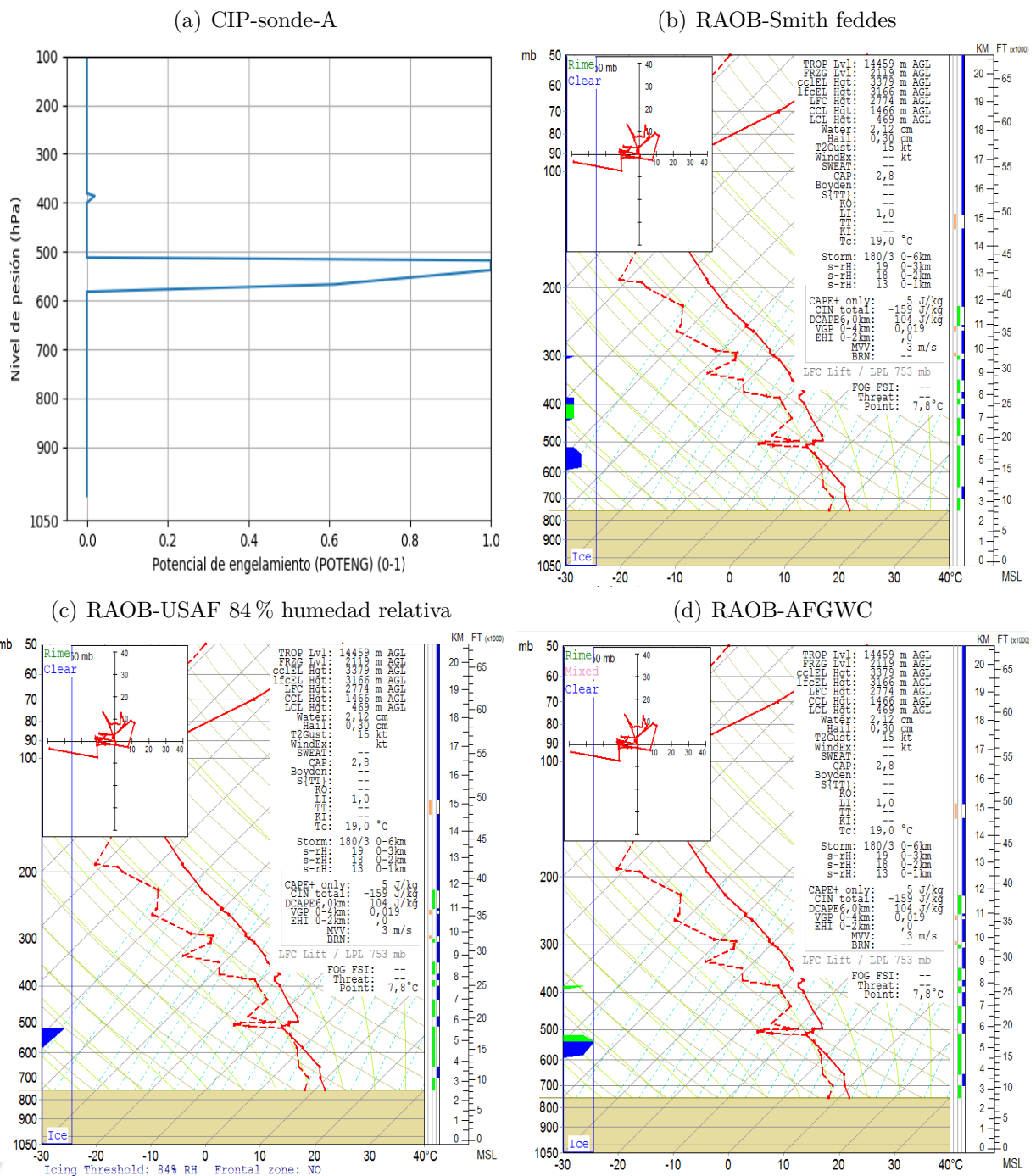


Figura A.7: Comparación potencial de engelamiento estimado por: Algoritmo CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC 01-10-2018.

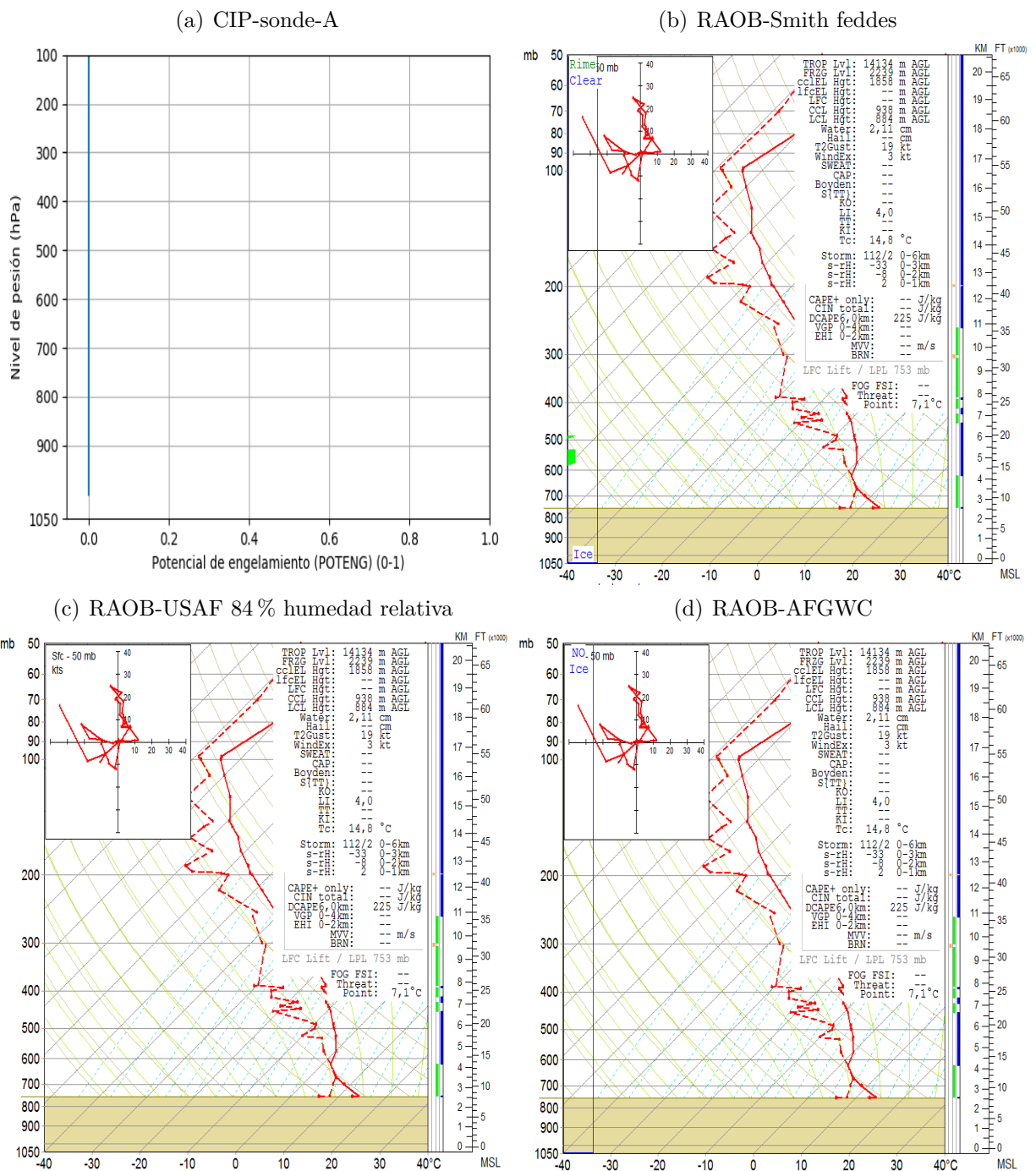


Figura A.8: Comparación potencial de engelamiento estimado por: Algoritmo CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC 01-11-2018.

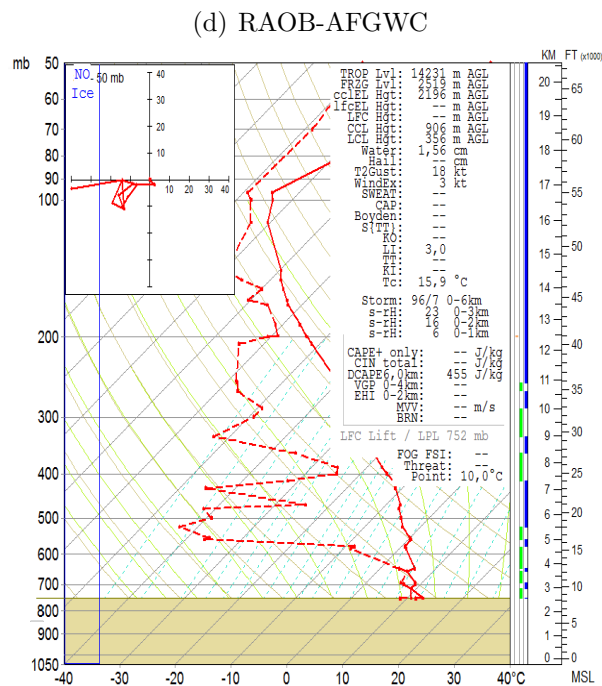
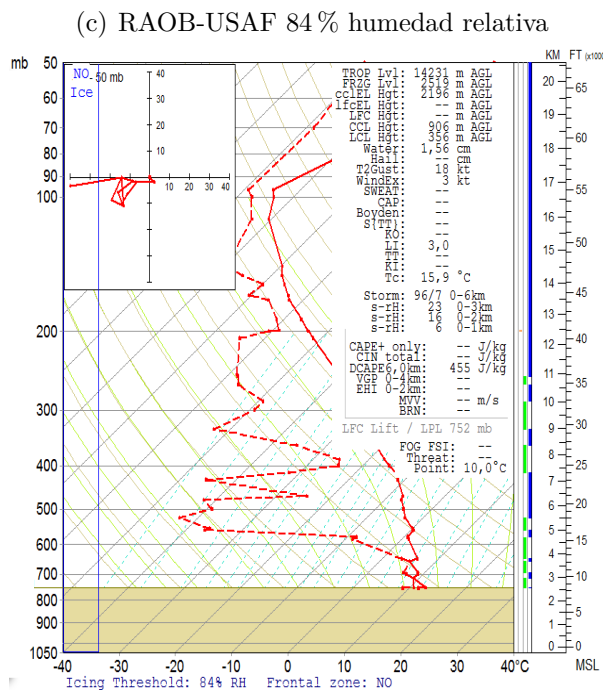
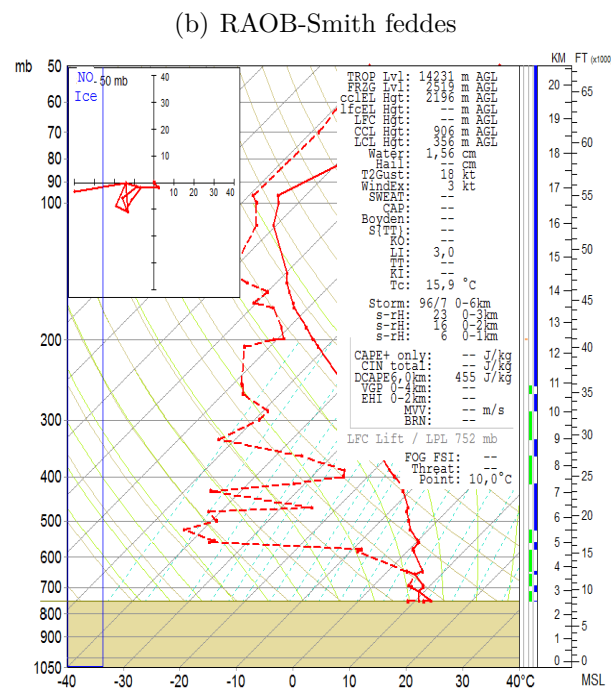
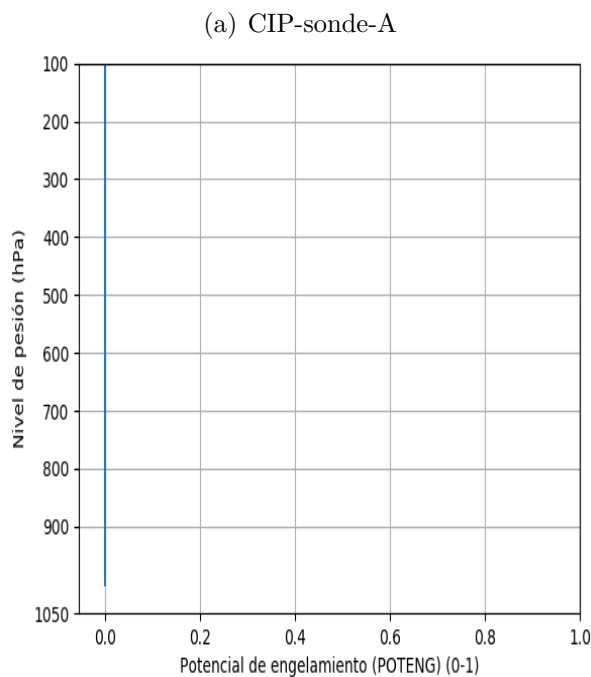


Figura A.9: Comparación potencial de engelamiento estimado por: Algoritmo CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC 01-12-2018.

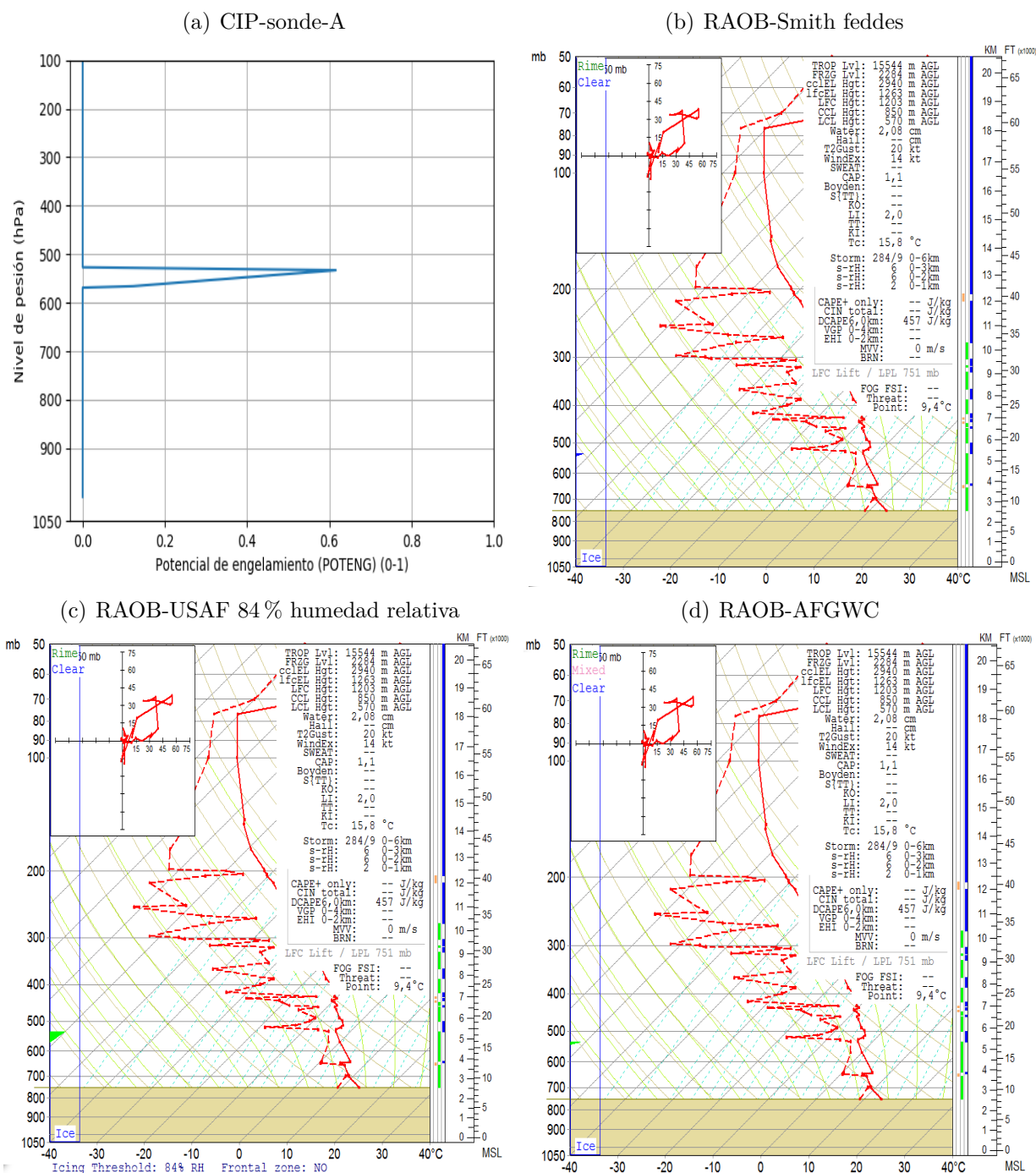


Figura A.10: Comparación potencial de engelamiento estimado por: Algoritmo CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC 02-02-2018.

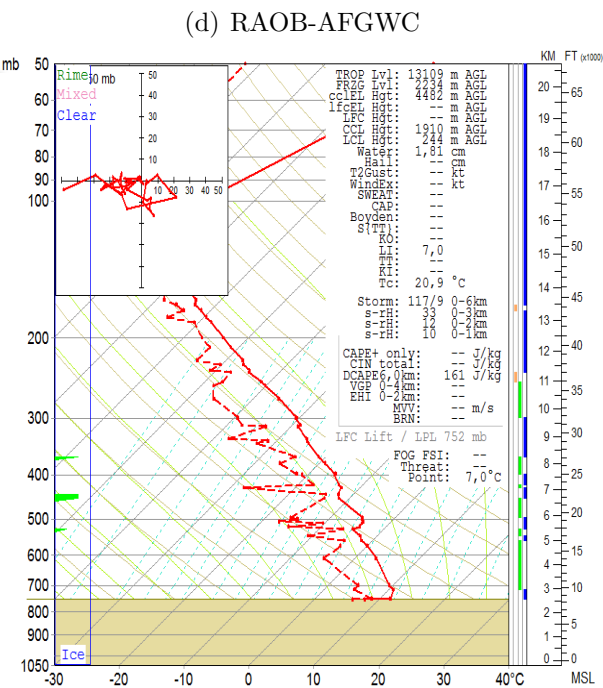
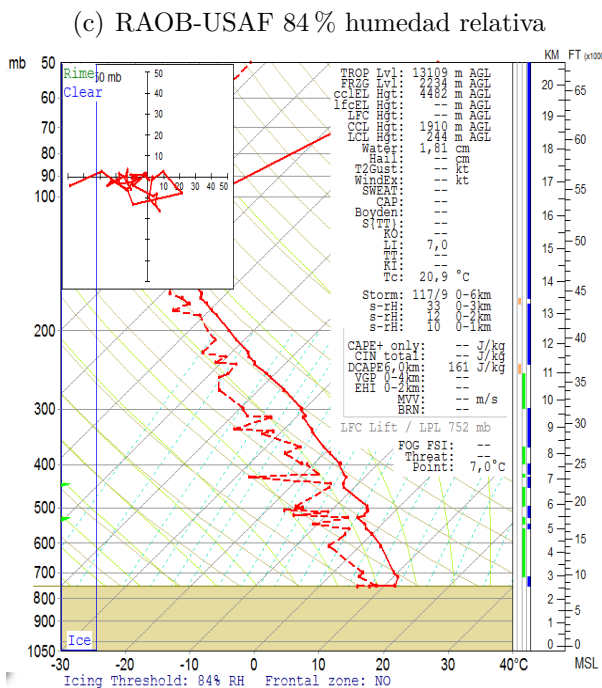
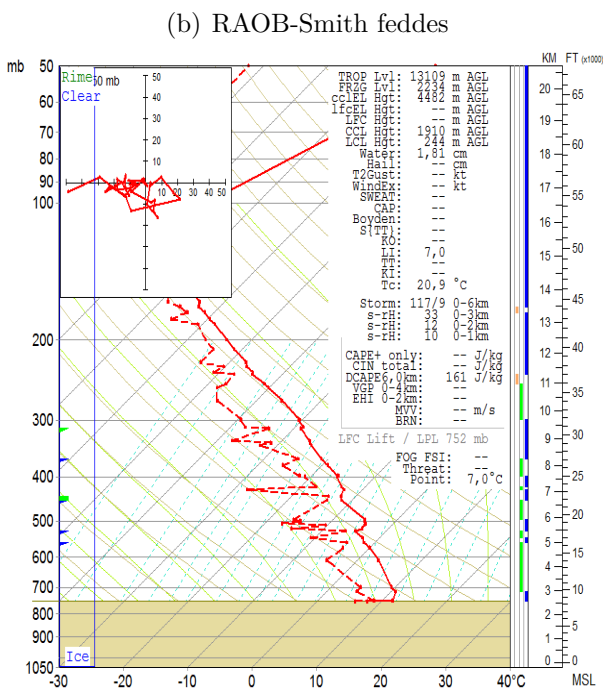
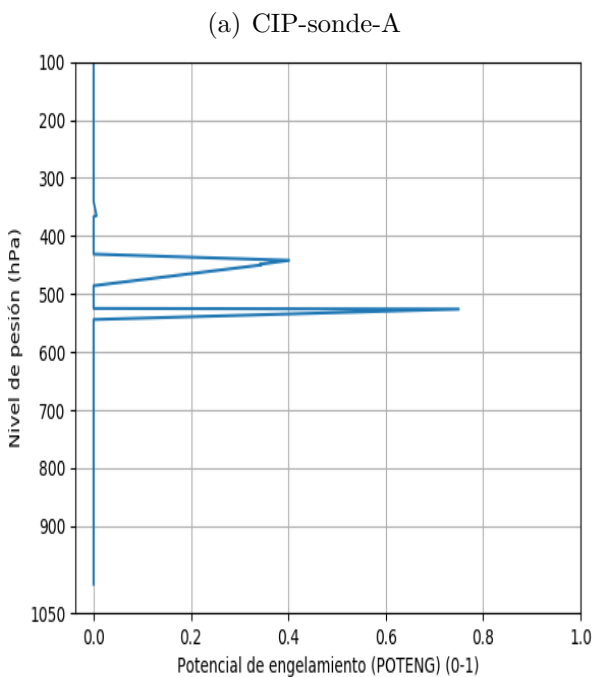


Figura A.11: Comparación potencial de engelamiento estimado por: Algoritmo CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC 02-09-2018.

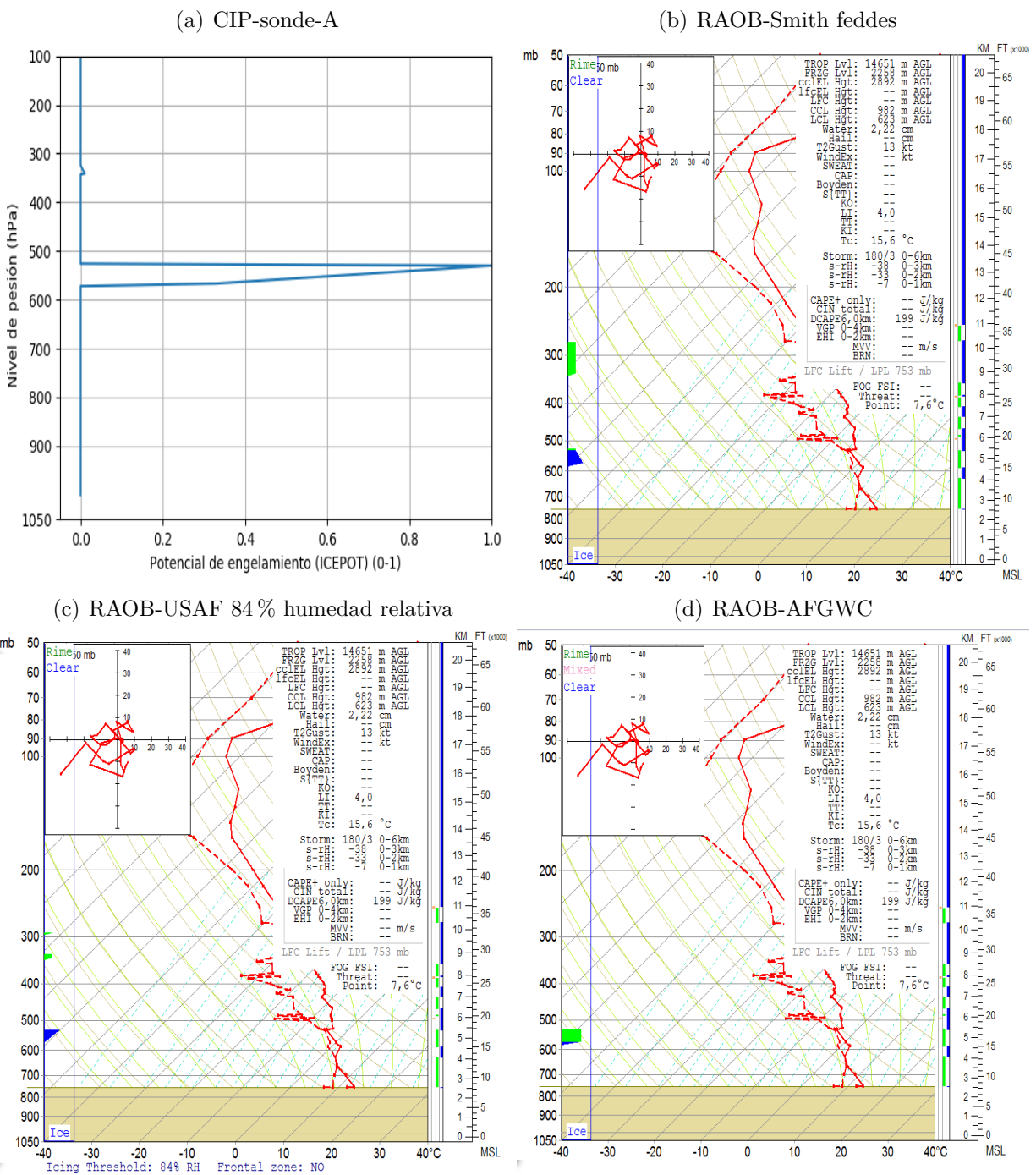


Figura A.12: Comparación potencial de engelamiento estimado por: Algoritmo CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC 02-11-2018.

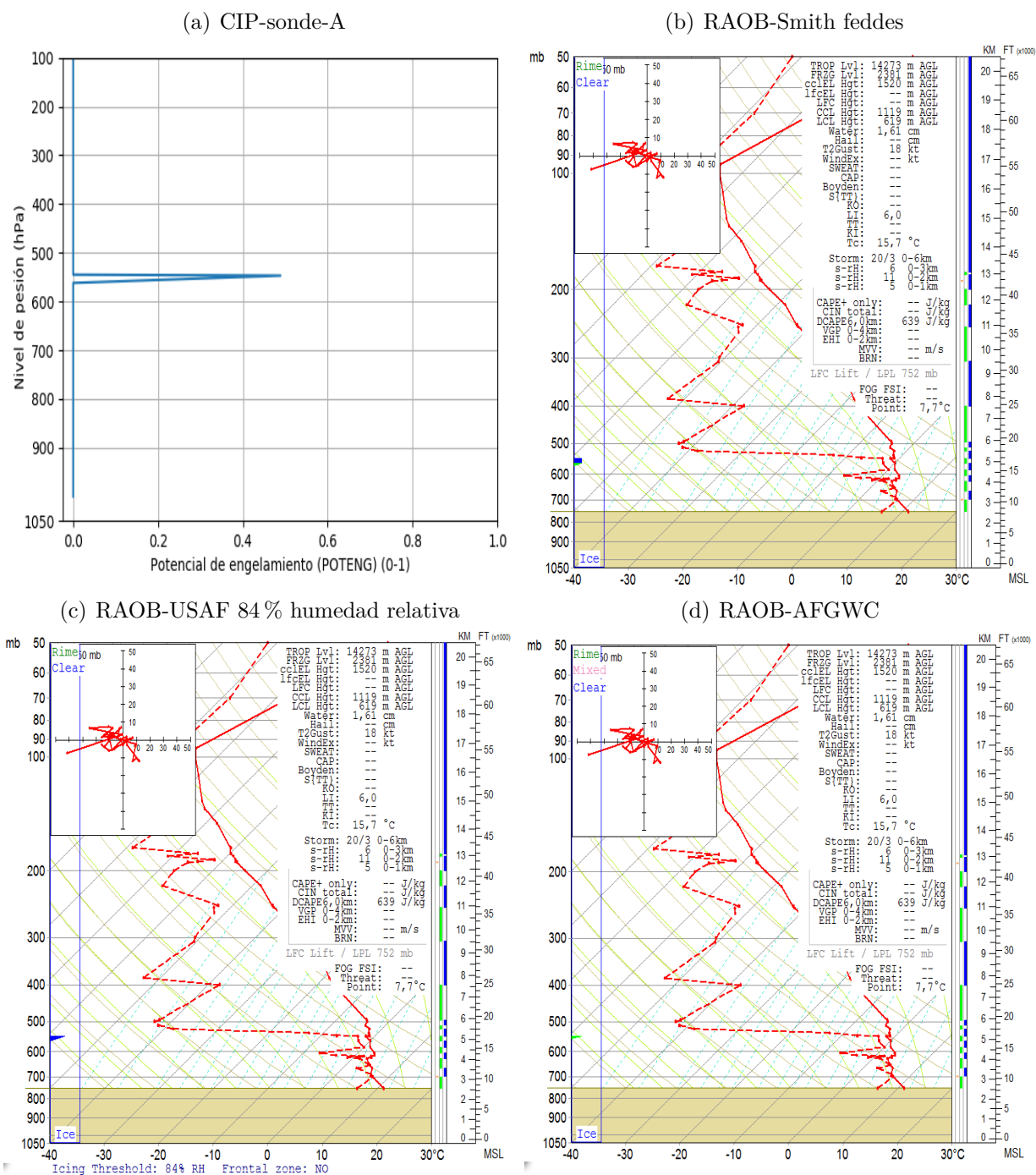


Figura A.13: Comparación potencial de engelamiento estimado por: Algoritmo CIP-sonde-A y resultados RAOB mediante modelos Smith feddes, USAF84 %HR y AFGWC 05-12-2018.

Apéndice B

Datos Disponibles y Faltantes de Observaciones de Radiosondeo y Reportes METAR para Todas las Estaciones

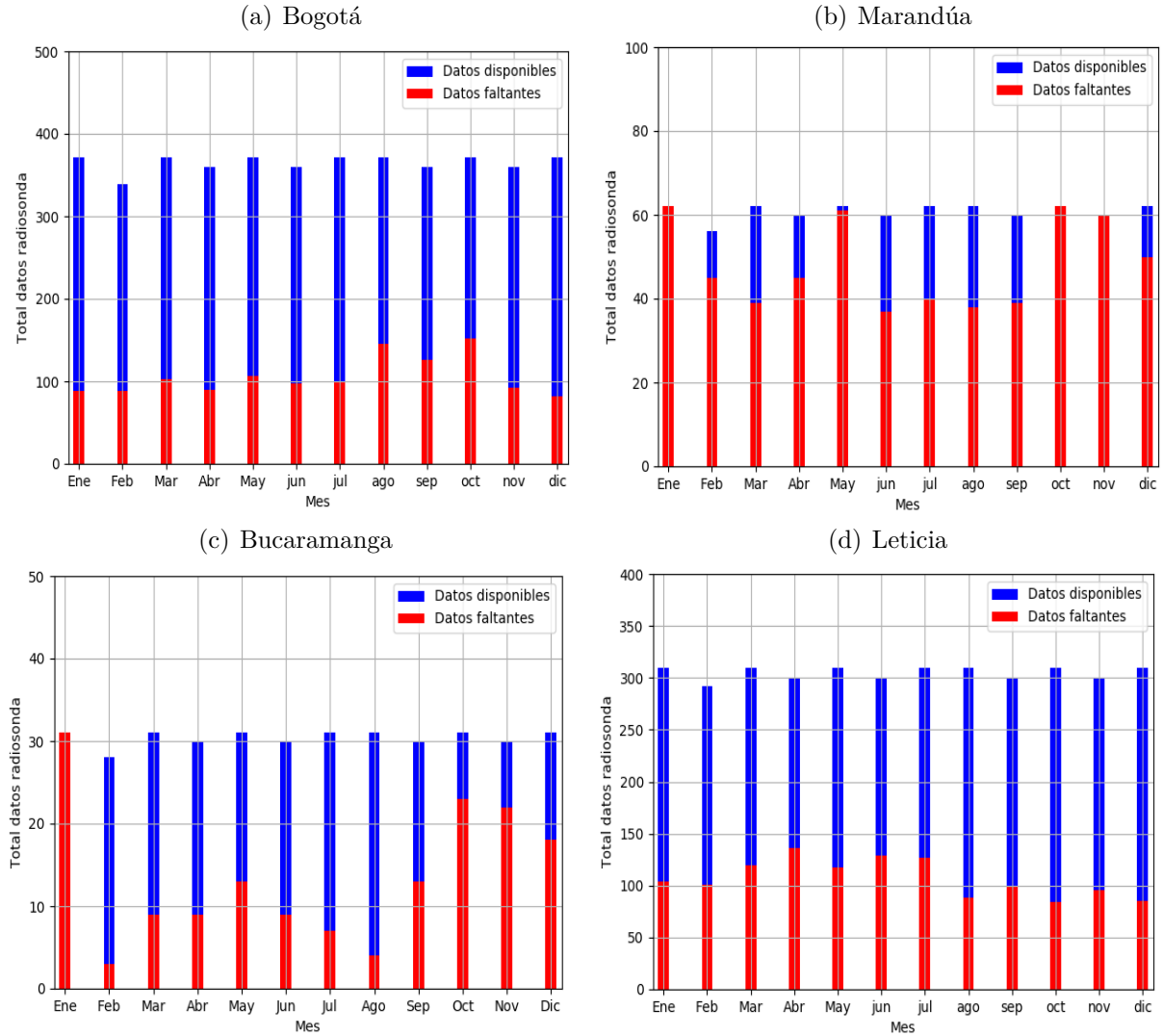


Figura B.1: Datos radiosondeo disponibles (Azul) y faltantes (Rojo) mensual, periodo de tiempo de observaciones para cada estación.

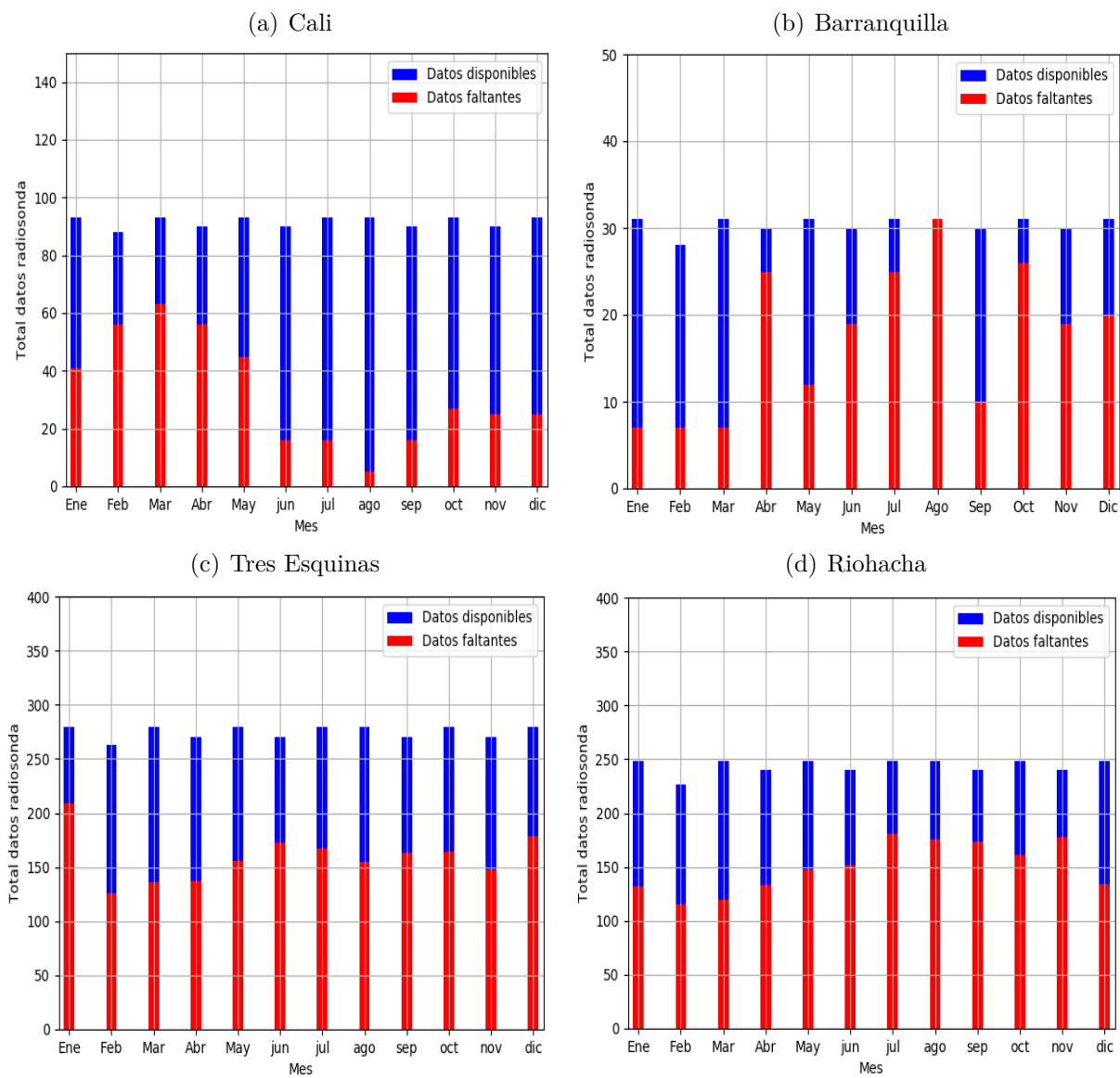


Figura B.2: Datos radiosondeo disponibles (Azul) y faltantes (Rojo) mensual, periodo de tiempo de observaciones para cada estación.

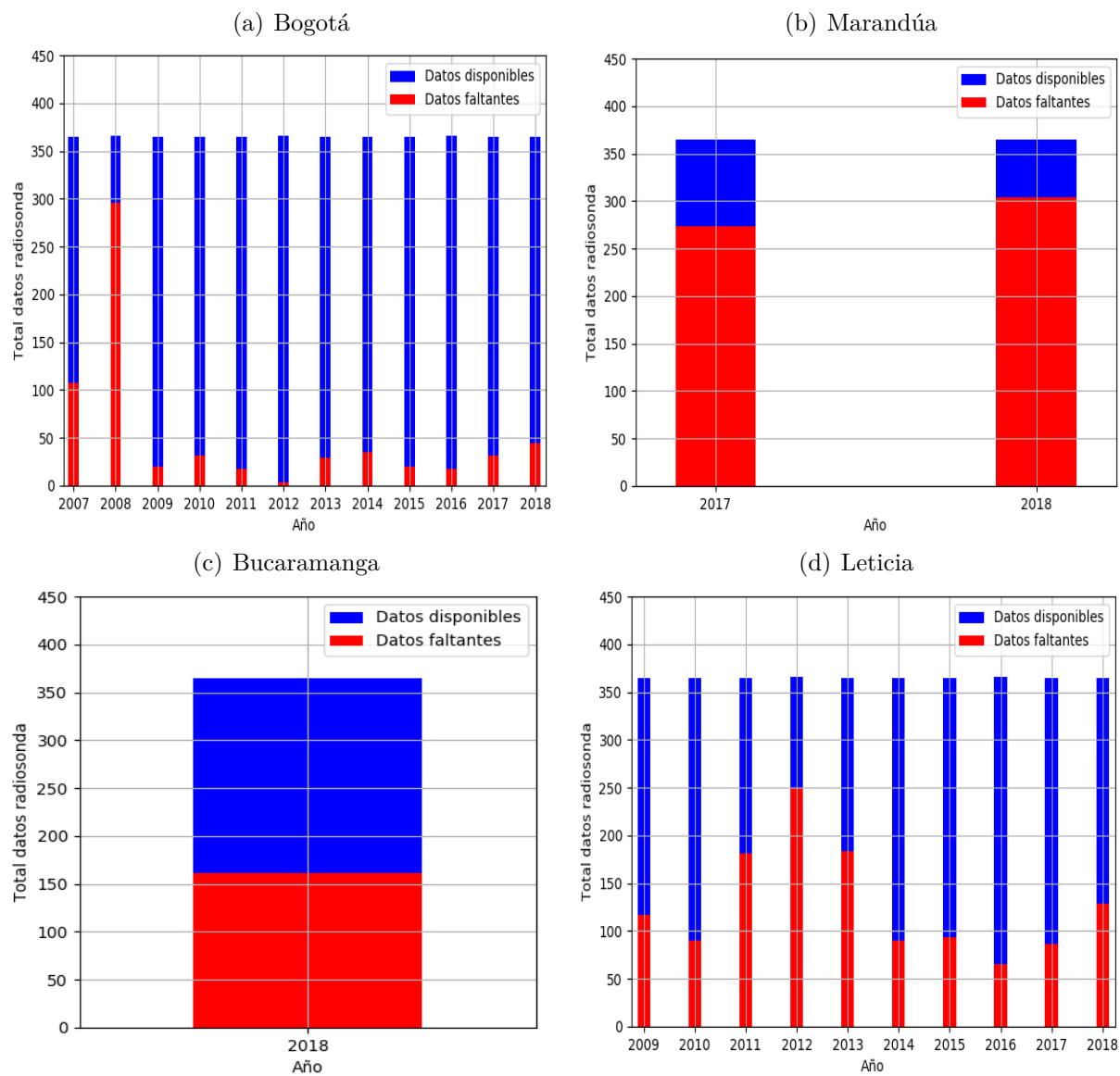


Figura B.3: Datos radiosondeo disponibles (Azul) y faltantes (Rojo) anual, periodo de tiempo de observaciones para cada estación.

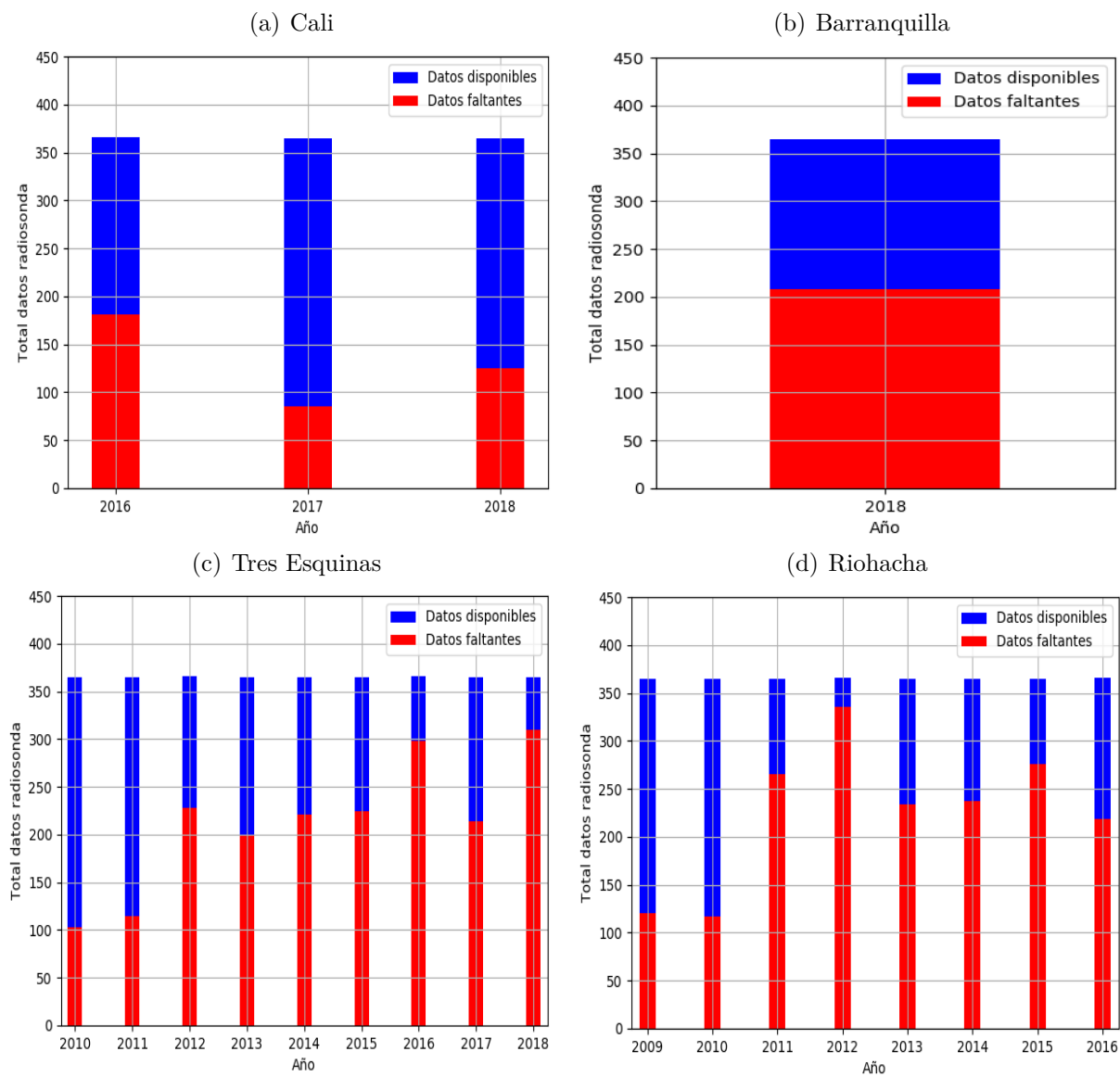


Figura B.4: Datos radiosondeo disponibles (Azul) y faltantes (Rojo) anual, periodo de tiempo de observaciones para cada estación.

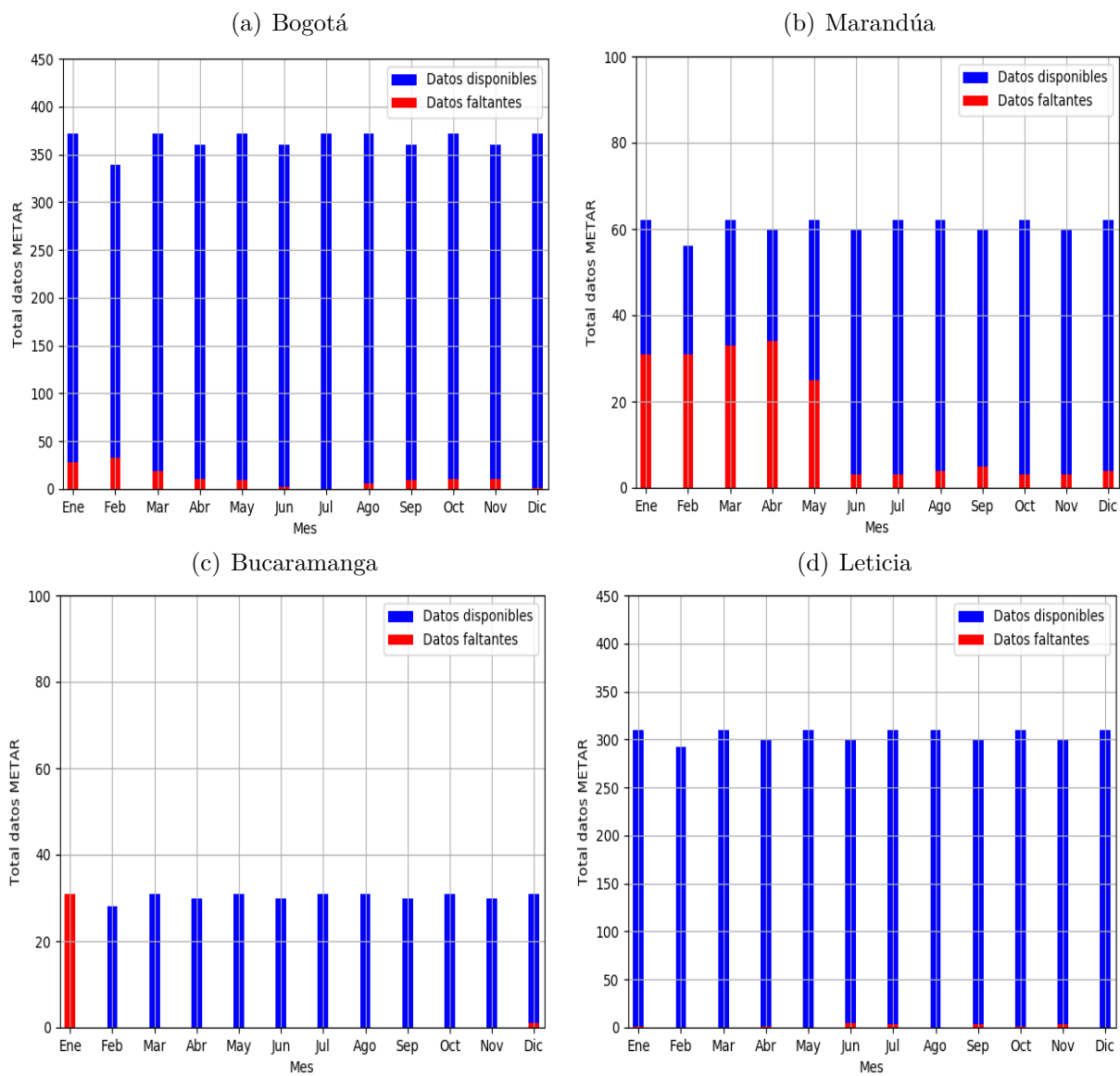


Figura B.5: Datos METAR disponibles (Azul) y faltantes (Rojo) mensual, periodo de tiempo de observaciones para cada estación.

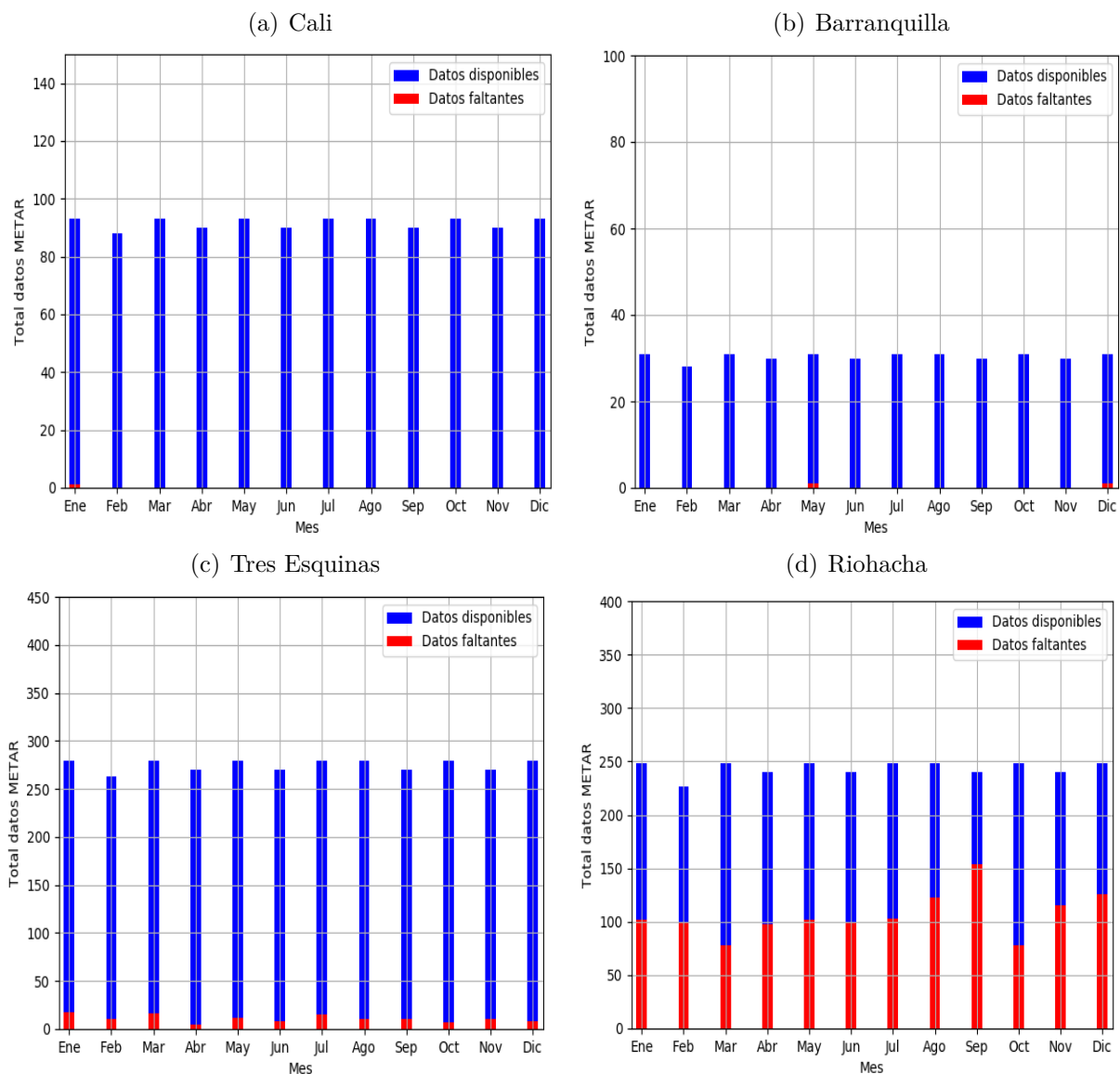


Figura B.6: Datos METAR disponibles (Azul) y faltantes (Rojo) mensual, periodo de tiempo de observaciones para cada estación.

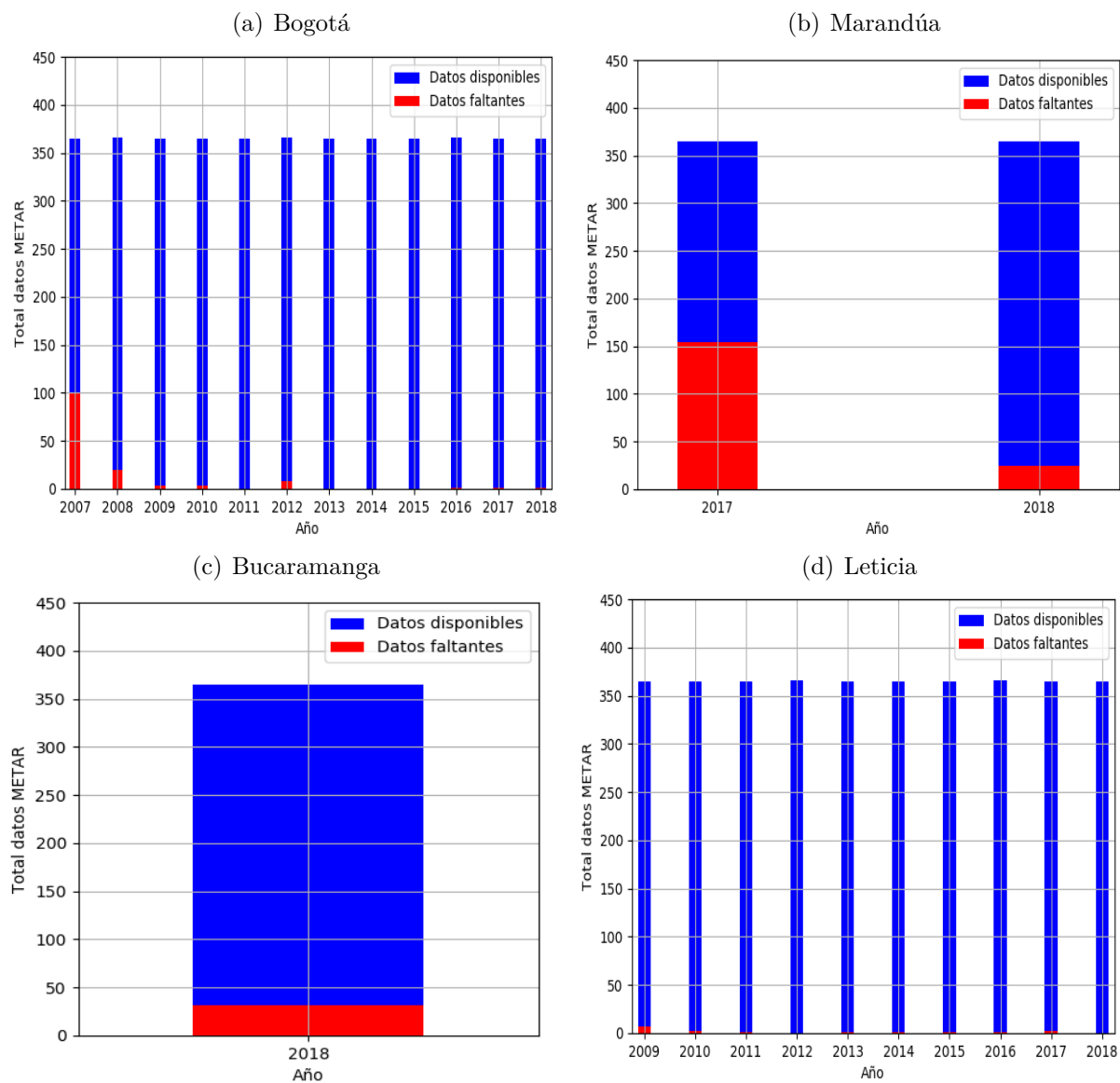


Figura B.7: Datos METAR disponibles (Azul) y faltantes (Rojo) anual, periodo de tiempo de observaciones para cada estación.

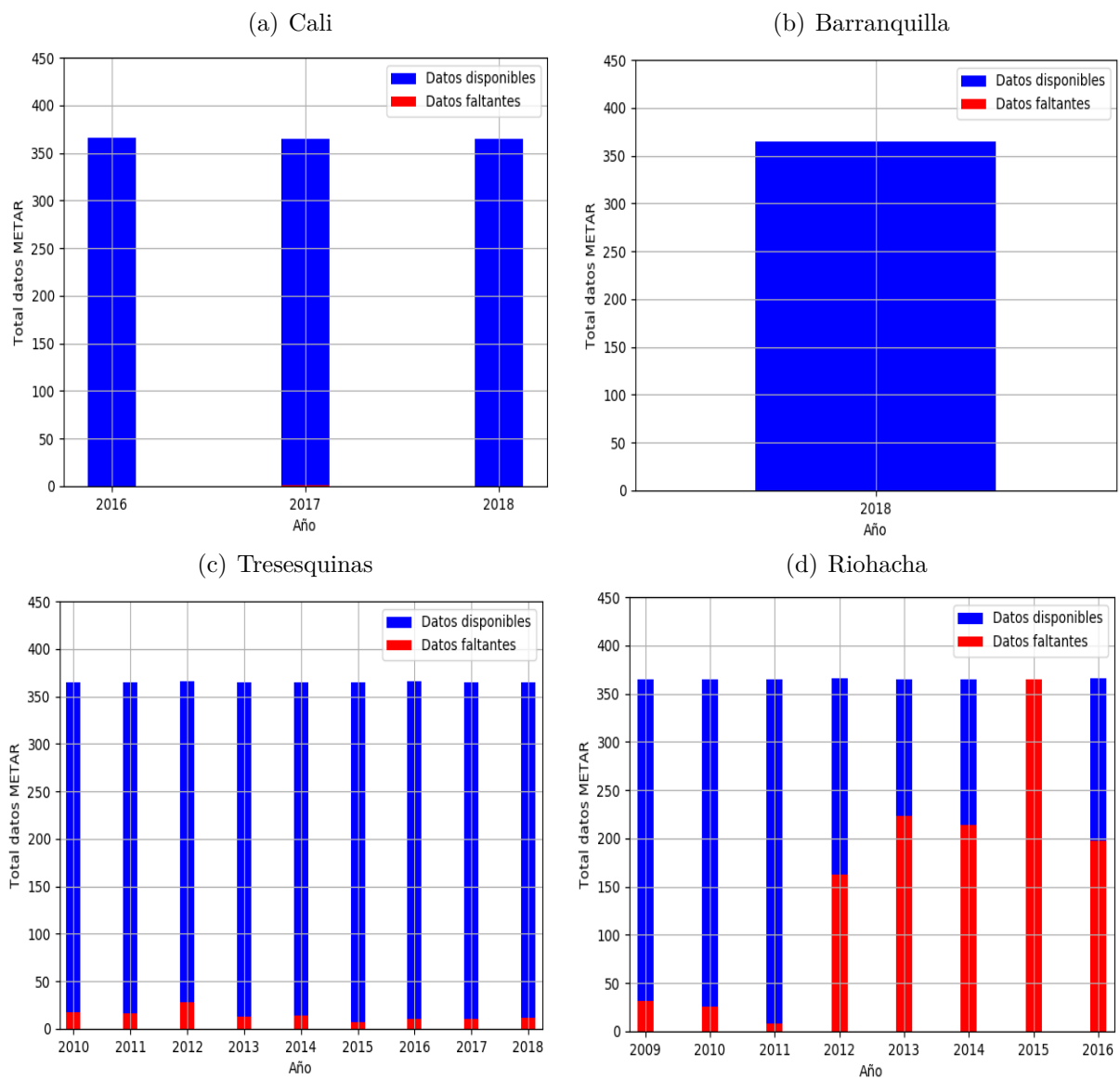


Figura B.8: Datos METAR disponibles (Azul) y faltantes (Rojo) anual, periodo de tiempo de observaciones para cada estación.

Apéndice C

Climatología de POTENG para Bucaramanga, Barranquilla y Marandúa

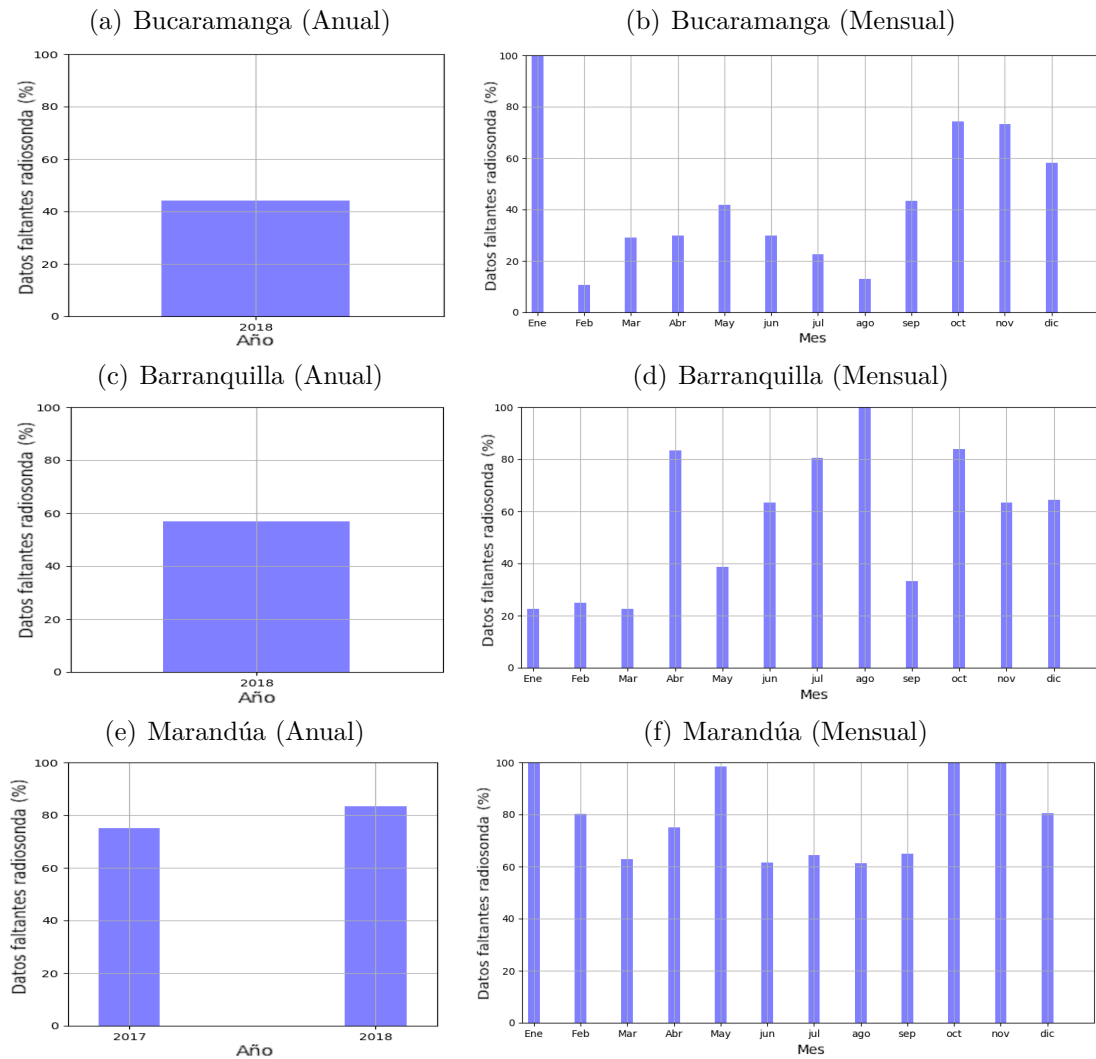


Figura C.1: Datos faltantes radiosondeos anual y mensual, (a) Bucaramanga año 2018, (b) Barranquilla año 2018, (c) Marandúa año 2017 y 2018.

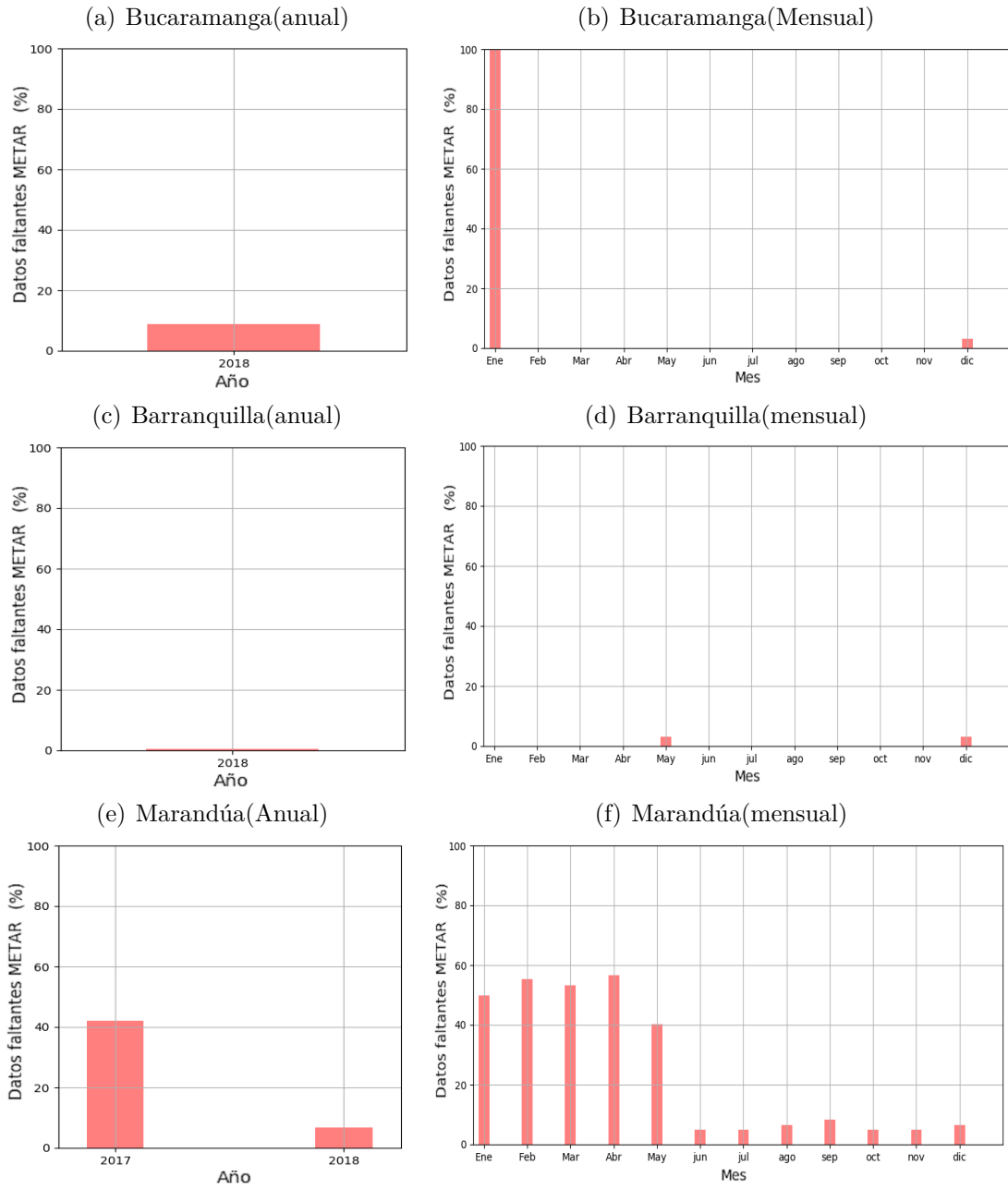


Figura C.2: Datos faltantes METAR anual y mensual,(a) Bucaramanga año 2018, (b) Barranquilla año 2018, (c) Marandúa año 2017 y 2018.

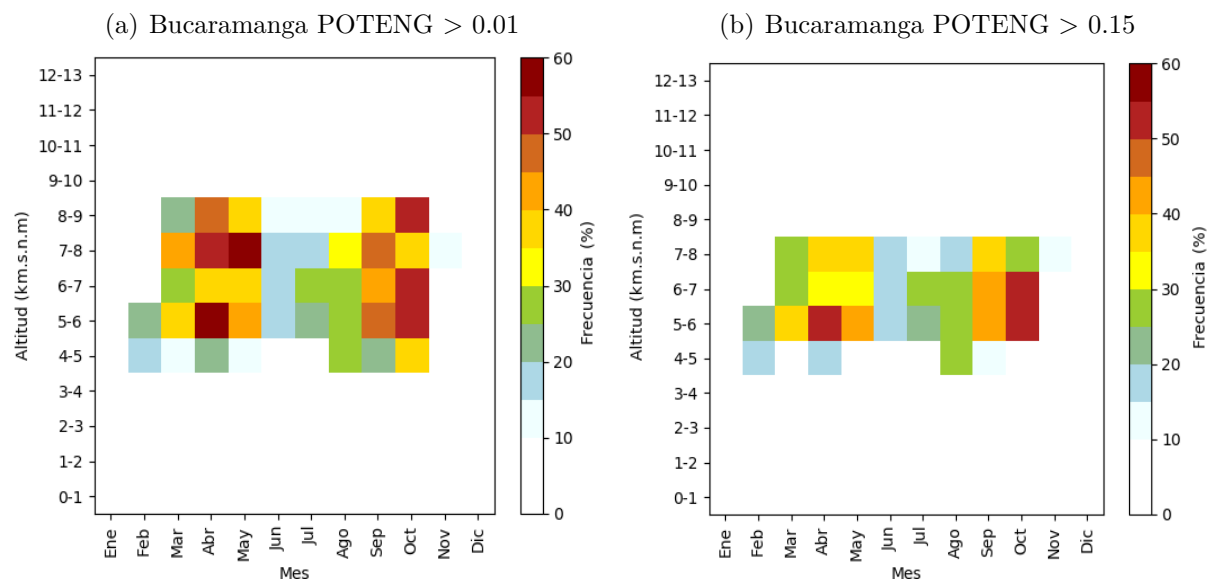


Figura C.3: Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y la altitud, en Bucaramanga año 2018 a las 12:00 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de a) 0.01 y b) 0.15 y de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a observaciones radiosondeo y reportes METAR.

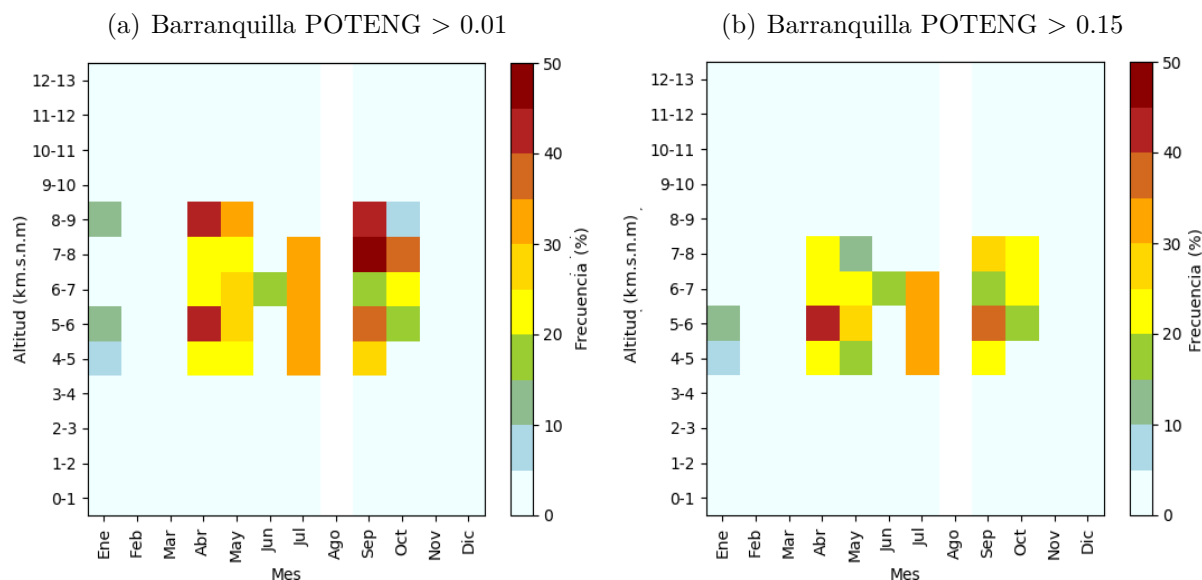


Figura C.4: Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y la altitud, en Barranquilla año 2018 a las 12:00 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de (a) 0.01 y (b) 0.15 y de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a observaciones radiosondeo y reportes METAR.

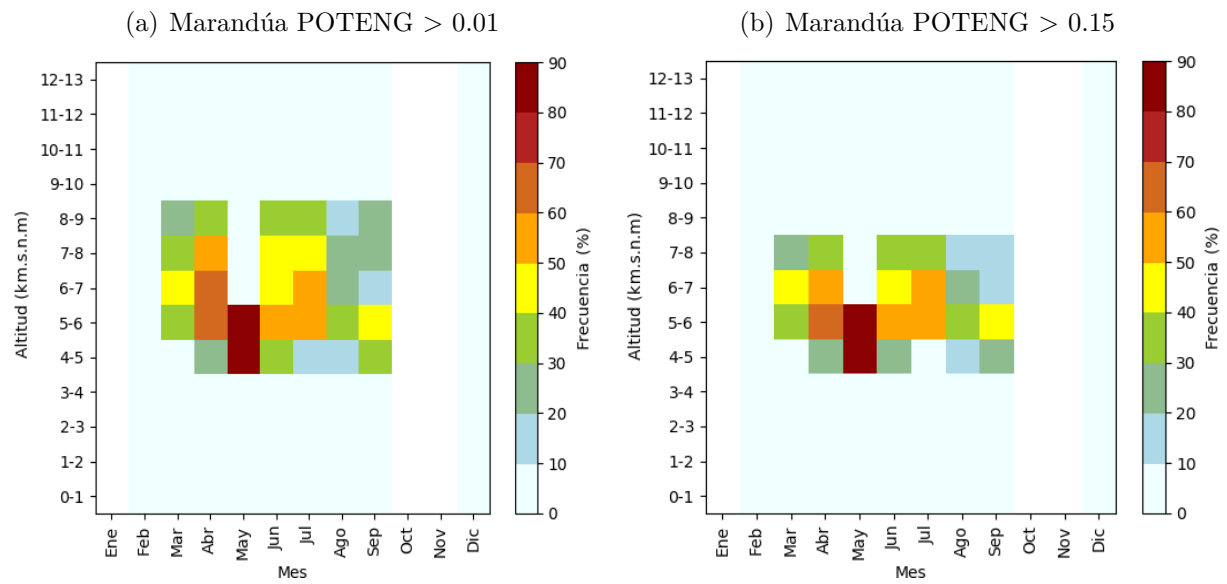


Figura C.5: Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y la altitud, en Marandúa años 2017 y 2018 a las 12:00 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de (a) 0.01 y (b) 0.15 y de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a observaciones radiosondeo y reportes METAR.

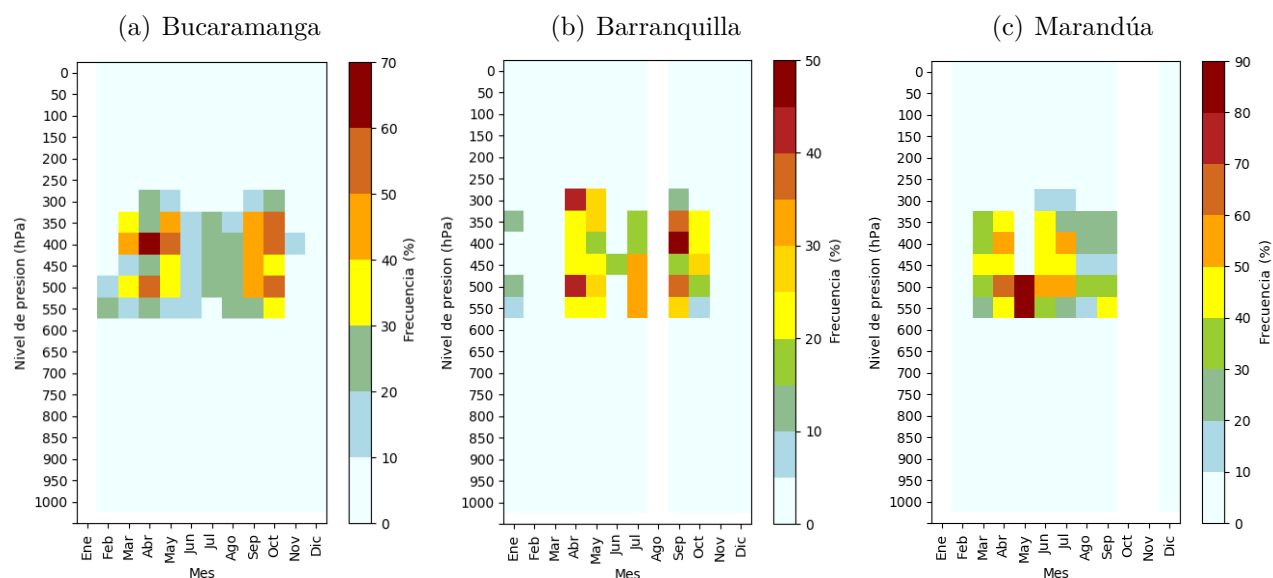


Figura C.6: Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y nivel de presión en Bucaramanga, Barranquilla y Marandúa a las 12 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de 0.01 de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a observaciones de radiosondeos y reportes METAR y para periodos de tiempos iguales a los tiempos de observación en cada estación señalados en la Tabla 1.4.

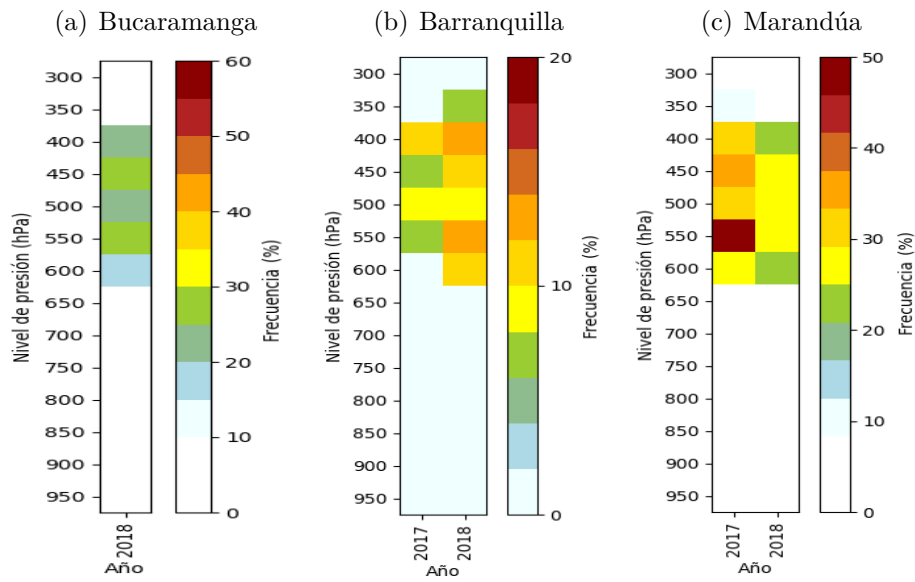


Figura C.7: Frecuencia promedio (%) de POTENG según el año y nivel de presión en Bucaramanga, Barranquilla y Marandúa a las 12:00 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de 0.01 de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado a observaciones de radiosondeos y reportes METAR y para periodos de tiempos iguales a los tiempos de observación en cada estación señalados en la Tabla 1.4.

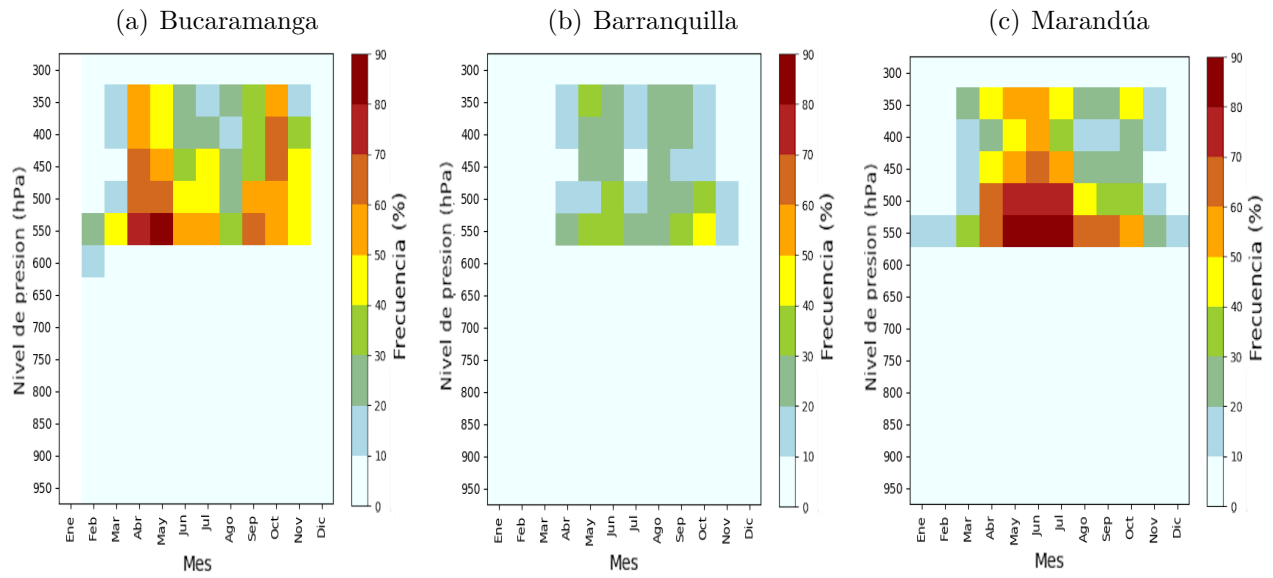


Figura C.8: Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y nivel de presión en Bucaramanga, Barranquilla y Marandúa a las 12:00 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de 0.01 de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado al reanálisis ERA-5 y para periodos de tiempos iguales a los tiempos de observación en cada estación señalados en la Tabla 1.4.

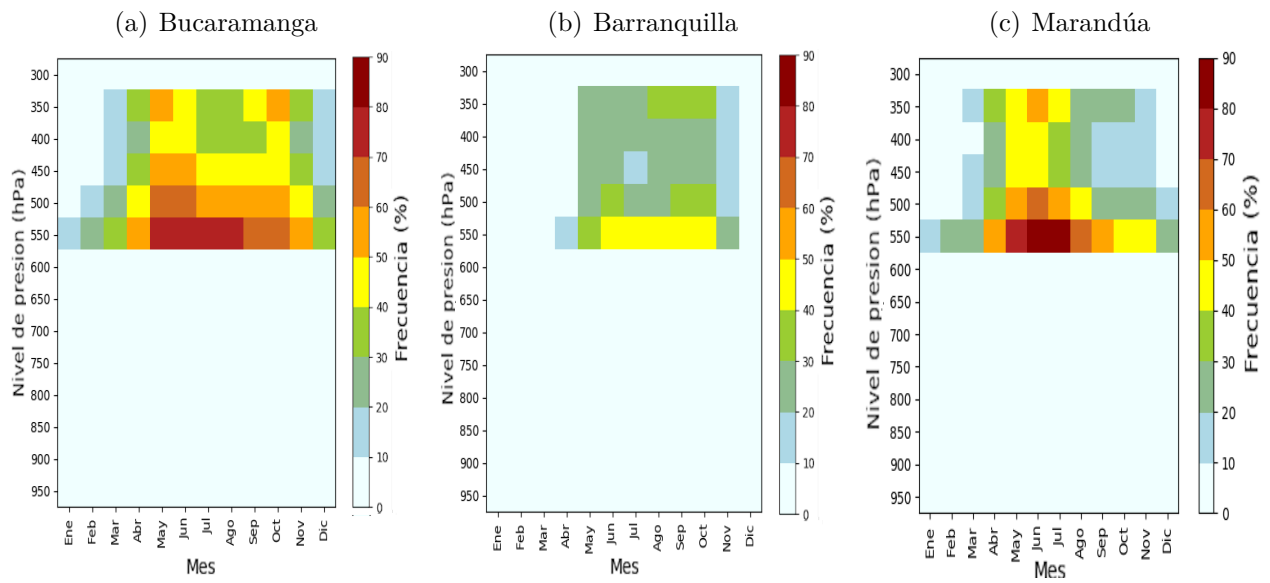


Figura C.9: Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y nivel de presión en Bucaramanga, Barranquilla y Marandúa a las 12:00 UTC, teniendo en cuenta como umbral de POTENG un valor de 0.01 de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado al reanálisis ERA-5 y para el periodo de 30 años comprendido entre 1989 y 2018.

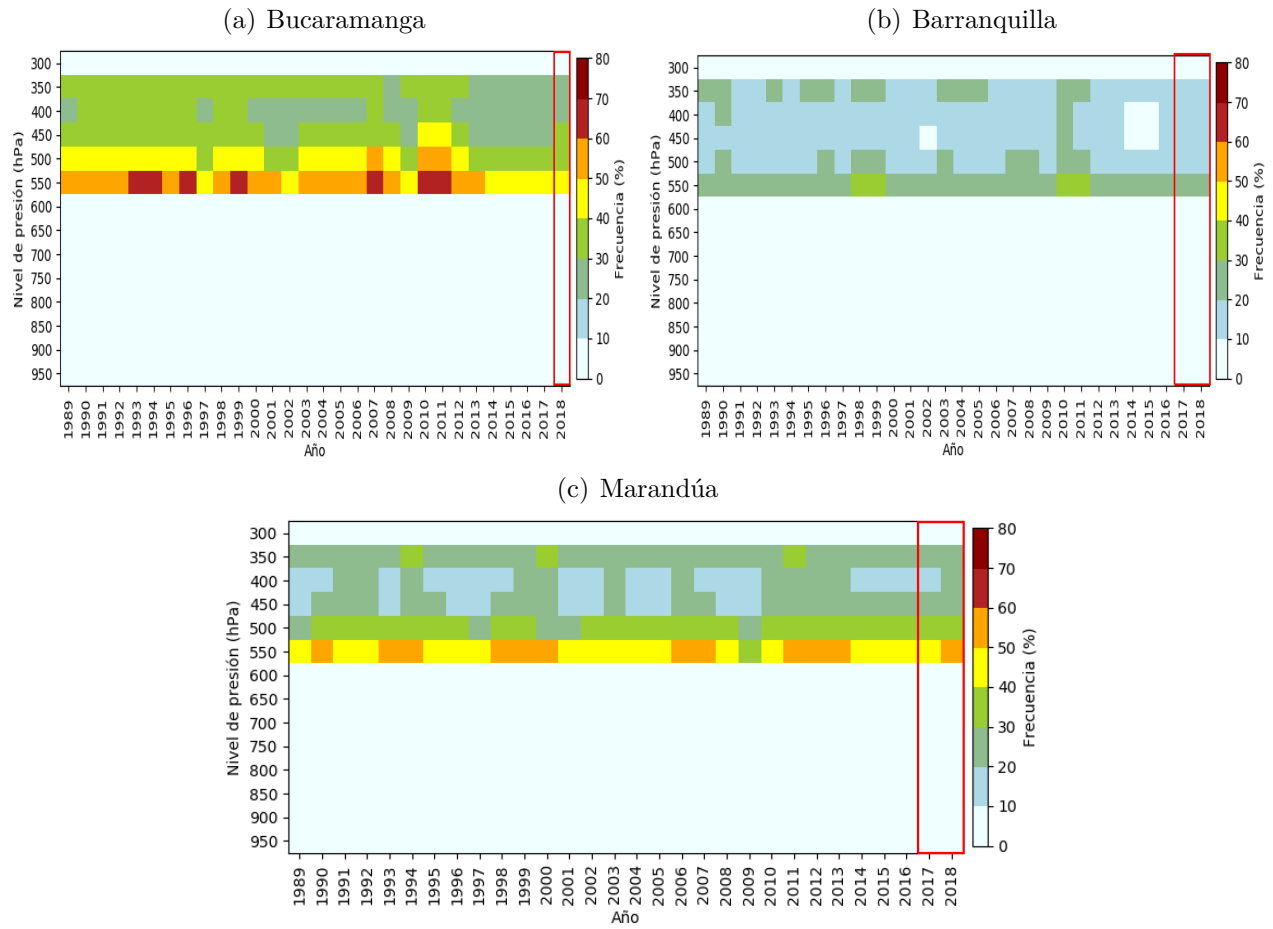


Figura C.10: Frecuencia promedio (%) de POTENG según el año y nivel de presión en Bucaramanga, Barranquilla y Marandúa a las 12:00 UTC de acuerdo al algoritmo CIP-sonde-A aplicado al reanálisis ERA-5 para el periodo comprendido entre 1989 y 2018 (el cuadro rojo representa el periodo comparativo con observaciones).

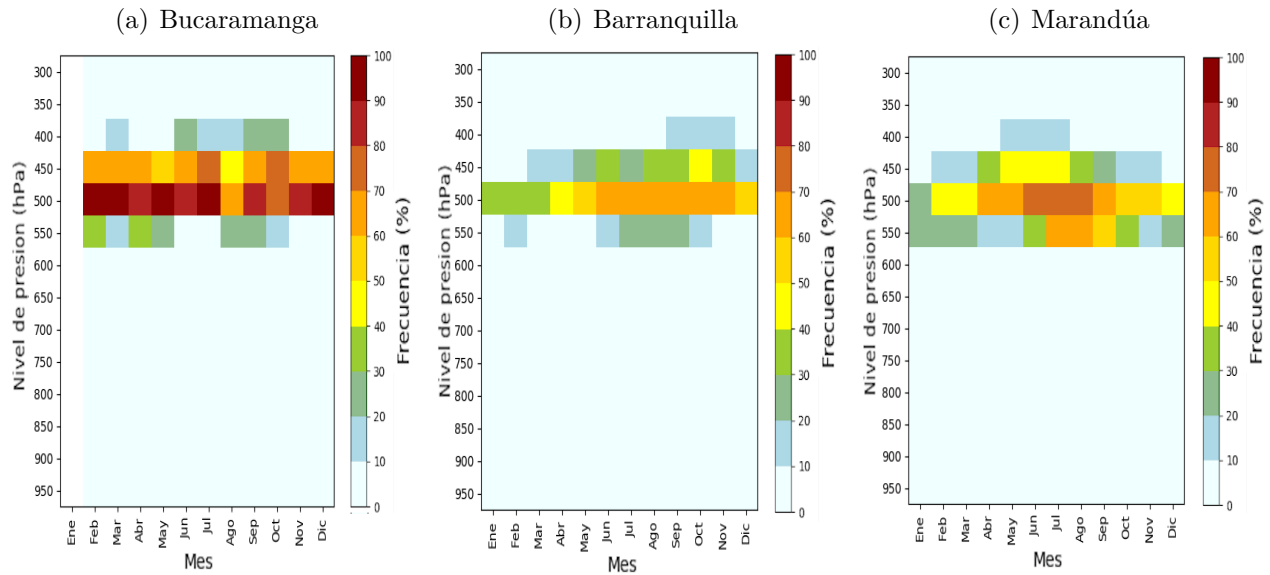


Figura C.11: Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y nivel de presión en Bucaramanga, Barranquilla y Marandúa a las 12:00 UTC de acuerdo al algoritmo SLWS aplicado al reanálisis ERA-5 y para periodos de tiempos iguales a los tiempos de observación en cada estación señalados en la Tabla 1.4.

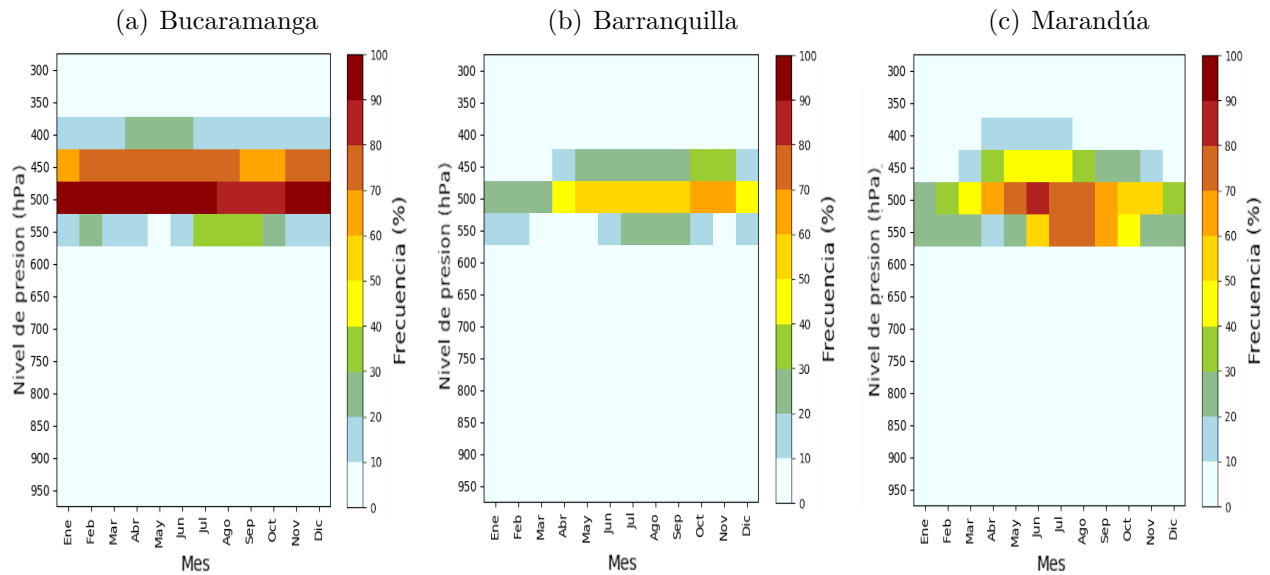


Figura C.12: Frecuencia promedio (%) de POTENG según el mes del año y nivel de presión en Bucaramanga, Barranquilla y Marandúa a las 12:00 UTC de acuerdo al algoritmo SLWS aplicado al reanálisis ERA-5 y para el periodo de 30 años comprendido entre 1989 y 2018.

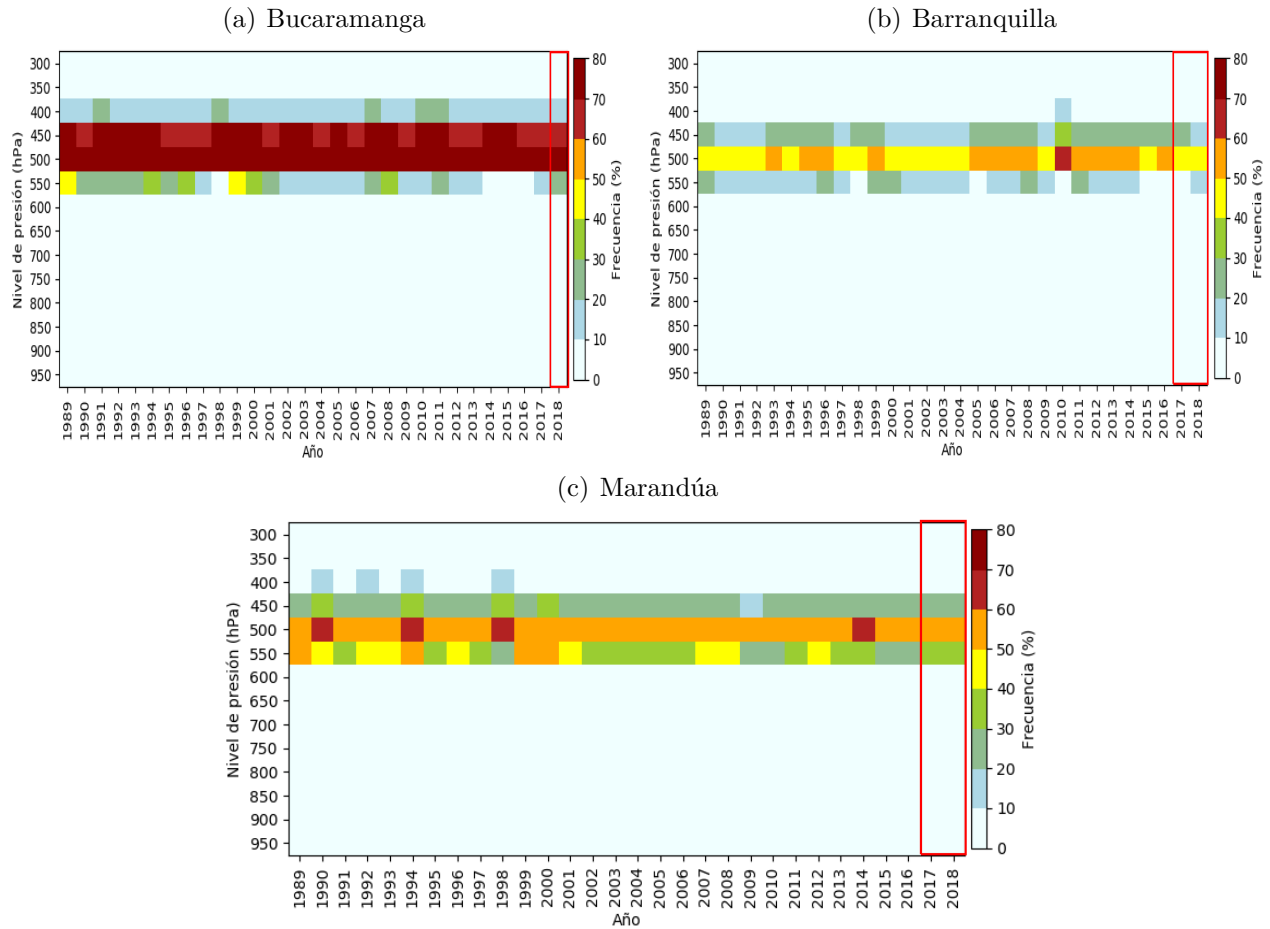


Figura C.13: Frecuencia promedio (%) de POTENG según el año y nivel de presión en Bucaramanga, Barranquilla y Marandúa a las 12 UTC de acuerdo al algoritmo SLWS aplicado al reanálisis ERA-5 y para el periodo de 30 años comprendido entre 1989 y 2018.

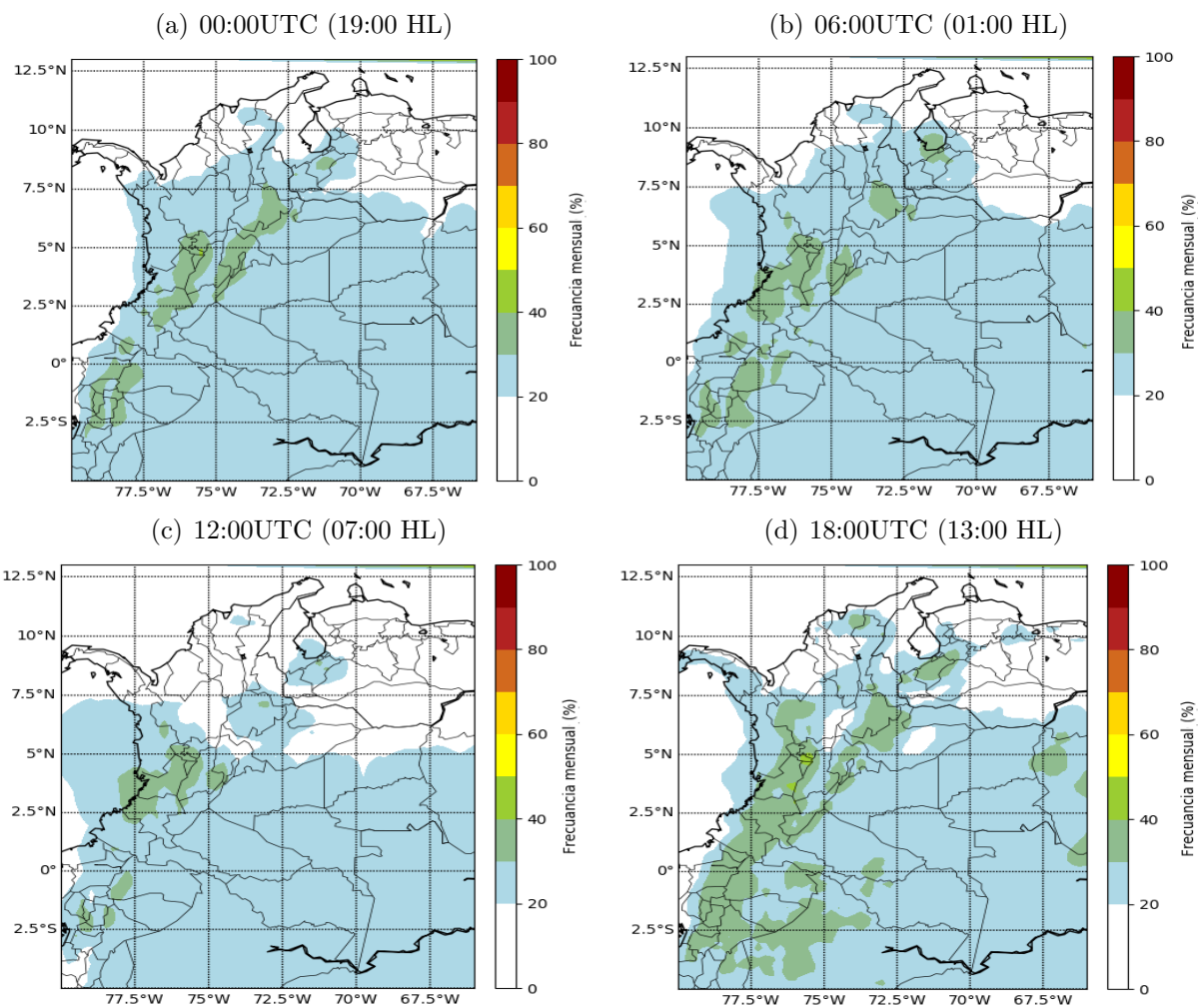


Figura C.14: Frecuencia relativa de POTENG para las 12 UTC, 18 UTC, 00 UTC y 06 UTC, en Colombia para la columna entre los niveles isobáricos de 600 a 300 hPa, calculadas con el algoritmo SLWS para el reanálisis ERA-5 para el periodo de 30 años de 1989 a 2018.

Apéndice D

Base de Datos Eventos de Aeronaves

Tabla D.1: Base de datos de eventos a partir de aeronaves.

Día	Mes	Año	Hora(UTC)	Altitud	Latitud	Longitud	Datos	Tipo
3	3	2014	00:43:21.0	20996	3.28	-75.18	FDR	Engelamiento
7	6	2015	12:52:27.0	19006	4.76	-72.91	FDR	Engelamiento
19	5	2015	13:13:20.0	17594	7.53	-75.81	FDR	Engelamiento
19	5	2015	18:13:13.0	19008	9.82	-74.73	FDR	Engelamiento
27	7	2015	12:31:30.0	17469	7.7	-74.88	FDR	Engelamiento
17	7	2015	01:31:03.0	17156	4.18	-73.87	FDR	Engelamiento
31	8	2015	11:58:19.0	14283	4.87	-74.04	FDR	Engelamiento
2	9	2015	23:27:10.0	21008	6.21	-73.42	FDR	Engelamiento
21	5	2015	14:30:36.0	15890	3.97	-73.53	FDR	Engelamiento
12	4	2015	18:35:54.0	15991	4.57	-70.1	FDR	Engelamiento
30	8	2015	21:18:01.0	17651	4.08	-75.17	FDR	Engelamiento
30	8	2015	21:41:12.0	19008	2.55	-74.54	FDR	Engelamiento
30	8	2015	02:06:44.0	19006	6.65	-73.17	FDR	Engelamiento
2	9	2015	15:05:22.0	14036	4.5	-74.88	FDR	Engelamiento
30	8	2015	22:42:03.0	15860	3.02	-72.98	FDR	Engelamiento
18	8	2015	19:50:05.0	15072	2.52	-75.36	FDR	Engelamiento
15	11	2016	13:29:07.0	16433	5.35	-73.91	FDR	Engelamiento
18	11	2016	14:01:33.0	17061	4.81	-73.54	FDR	Engelamiento
18	11	2016	22:05:52.0	18197	4.95	-72.56	FDR	Engelamiento
19	11	2016	14:13:11.0	15148	3.63	-74.05	FDR	Engelamiento
19	10	2016	20:31:42.0	15982	4.39	-70.62	FDR	Engelamiento
22	10	2016	00:28:04.0	16029	4.01	-73.65	FDR	Engelamiento
15	10	2016	20:35:21.0	19879	4.14	-73.66	FDR	Engelamiento
20	12	2016	21:40:19.0	19005	3.68	-76.08	FDR	Engelamiento
30	4	2016	05:20:17.0	17374	6.73	-71.29	FDR	Engelamiento
26	4	2016	19:23:43.0	16947	4.26	-75.8	FDR	Engelamiento
25	4	2016	20:39:59.0	16035	3.61	-73.47	FDR	Engelamiento
7	3	2016	23:36:58.0	17639	5.6	-73.86	FDR	Engelamiento
8	3	2016	23:09:16.0	17086	2.37	-75.4	FDR	Engelamiento

Continúa en la siguiente página

Tabla D.1 – Continuación de la página anterior

Día	Mes	Año	Hora(UTC)	Altitud	Latitud	Longitud	Datos	Tipo
14	3	2016	21:03:19.0	18005	2.07	-72.87	FDR	Engelamiento
15	3	2016	23:13:11.0	14003	0.4	-71.12	FDR	Engelamiento
7	3	2016	21:00:12.0	17953	3.59	-76.11	FDR	Engelamiento
3	10	2017	22:00:18.0	17212	1.51	-76.01	FDR	Engelamiento
4	10	2017	20:58:35.0	14896	4.12	-76.16	FDR	Engelamiento
7	10	2017	12:15:42.0	15522	4.24	-74.79	FDR	Engelamiento
8	8	2017	02:23:47.0	16645	6.5	-74.84	FDR	Engelamiento
13	1	2018	02:24:33.0	15902	2.88	-77.18	FDR	Engelamiento
13	1	2018	03:33:19.0	14869	2.34	-77.97	FDR	Engelamiento
8	6	2018	18:34:25.0	16971	4.62	-70.33	FDR	Engelamiento
30	6	2018	03:21:14.0	14916	4.17	-76.03	FDR	Engelamiento
4	7	2018	15:31:45.0	15923	1.54	-75.1	FDR	Engelamiento
4	7	2018	23:47:58.0	15002	2.25	-75.43	FDR	Engelamiento
15	9	2018	17:59:48.0	16840	4.59	-71.34	FDR	Engelamiento
15	9	2018	21:15:42.0	15734	5.15	-75.18	FDR	Engelamiento
16	9	2018	16:49:31.0	15474	4.18	-75.4	FDR	Engelamiento
18	9	2018	11:02:22.0	20007	3.5	-75.1	FDR	Engelamiento
21	6	2018	16:28:19.0	15587	4.22	-74.52	FDR	Engelamiento
15	8	2018	01:30:32.0	19007	9.01	-73.96	FDR	Engelamiento
18	8	2018	12:49:28.0	17895	2.31	-75.62	FDR	Engelamiento
29	9	2018	04:55:06.0	14630	4.5	-74.74	FDR	Engelamiento
12	10	2018	18:28:54.0	17655	4.96	-74.97	FDR	Engelamiento
16	6	2018	00:47:11.0	15883	5.93	-74.01	FDR	Engelamiento
16	6	2018	02:52:31.0	16542	4.85	-73.65	FDR	Engelamiento
16	6	2018	18:29:23.0	15597	4.19	-74.16	FDR	Engelamiento
23	6	2018	16:56:09.0	15003	5.98	-68.62	FDR	Engelamiento
20	5	2013	14:41:00	40000	5.85	-77.8	SIGMET	Engelamiento
25	3	2017	14:34:00	20000	5.32	-73.65	SIGMET	Engelamiento
23	3	2015	11:16:00	23000	7.03	-73.81	SIGMET	Engelamiento
30	3	2016	22:00:00	21000	5.27	-73.92	SIGMET	Engelamiento
27	5	2017	11:35:00	22000	3.87	-75.5	SIGMET	Engelamiento
15	10	2015	13:00:00	21000	7.1	-73.38	SIGMET	Engelamiento
13	4	2016	14:50:00	22000	5.98	-73.64	SIGMET	Engelamiento
24	6	2016	11:20:00	35000	8.52	-75.48	SIGMET	Engelamiento
15	9	2016	11:39:00	21000	3.32	-73.88	SIGMET	Engelamiento
27	11	2016	14:35:00	22000	5.99	-73.66	SIGMET	Engelamiento
Continúa en la siguiente página								

Tabla D.1 – Continuación de la página anterior

Día	Mes	Año	Hora(UTC)	Altitud	Latitud	Longitud	Datos	Tipo
1	12	2016	18:10:00	18000	7.06	-72.68	SIGMET	Engelamiento
21	12	2016	17:49:00	24000	5.28	-75.19	SIGMET	Engelamiento
4	1	2018	11:10:00	21000	4.42	-75.9	SIGMET	Engelamiento
3	3	2018	12:30:00	20000	5.15	-75.18	SIGMET	Engelamiento
22	11	2018	12:00:00	21000	3.4	-76.41	AIREP	Engelamiento
16	9	2016	07:00:00	16000	6.53	-76.23	Seguridad	Engelamiento
8	3	2018	10:50:00	20000	7.86	-73.34	Seguridad	Engelamiento
22	6	2018	04:30:00	14500	4.66	-75.33	Seguridad	Engelamiento
31	7	2015	19:58:00	21000	10.01	-73.36	Seguridad	Engelamiento
7	9	2010	04:04:00	21000	3.57	-74.28	Seguridad	Engelamiento
27	10	2017	19:00:00	17000	6.09	-72.41	Seguridad	Engelamiento
4	11	2017	19:00:00	17000	4.7	-73.54	Seguridad	Engelamiento
15	11	2017	08:30:00	17000	5.51	-74.19	Seguridad	Engelamiento
17	12	2014	16:01:39.0	14969	3.55	-74.84	FDR	No engelamiento
18	12	2014	14:45:20.0	17630	5.24	-75.28	FDR	No engelamiento
18	12	2014	20:52:31.0	19024	5.57	-76.22	FDR	No engelamiento
20	12	2014	12:57:19.0	16460	4.45	-74.48	FDR	No engelamiento
22	12	2014	00:01:33.0	15135	3	-77.42	FDR	No engelamiento
3	3	2014	16:30:51.0	16062	1.36	-75.4	FDR	No engelamiento
3	3	2014	18:20:07.0	19010	2.42	-75.39	FDR	No engelamiento
3	3	2014	23:04:07.0	16201	1.55	-75.41	FDR	No engelamiento
7	6	2015	22:53:13.0	18047	6.28	-72.01	FDR	No engelamiento
8	6	2015	13:17:17.0	17015	4.69	-71.78	FDR	No engelamiento
8	6	2015	14:52:52.0	16518	4.32	-71.04	FDR	No engelamiento
8	6	2015	16:26:09.0	17524	4.05	-72.77	FDR	No engelamiento
8	6	2015	17:52:58.0	16529	4.46	-70.46	FDR	No engelamiento
8	6	2015	22:30:39.0	16051	4.1	-73.6	FDR	No engelamiento
18	5	2015	16:10:59.0	16973	5.51	-73.22	FDR	No engelamiento
18	5	2015	20:50:52.0	18049	5.73	-73.1	FDR	No engelamiento
9	6	2015	01:06:13.0	17973	4.16	-73.82	FDR	No engelamiento
24	7	2015	13:38:48.0	16590	5.98	-75.16	FDR	No engelamiento
25	7	2015	12:55:53.0	15514	3.38	-74.66	FDR	No engelamiento
26	7	2015	16:48:39.0	22056	5.12	-76.15	FDR	No engelamiento
26	7	2015	18:29:11.0	16730	7.25	-76.25	FDR	No engelamiento
15	7	2015	20:53:22.0	15678	5.05	-73.8	FDR	No engelamiento
16	7	2015	21:47:27.0	14633	3.58	-74.76	FDR	No engelamiento
Continúa en la siguiente página								

Tabla D.1 – Continuación de la página anterior

Día	Mes	Año	Hora(UTC)	Altitud	Latitud	Longitud	Datos	Tipo
31	8	2015	19:43:15.0	19131	9.83	-75.41	FDR	No engelamiento
1	9	2015	23:09:54.0	14582	3.39	-74.81	FDR	No engelamiento
3	9	2015	01:46:58.0	17995	8.05	-72.74	FDR	No engelamiento
3	9	2015	13:07:09.0	19027	5.24	-73.88	FDR	No engelamiento
3	9	2015	23:55:30.0	18080	7.68	-72.73	FDR	No engelamiento
18	10	2015	21:39:41.0	17959	3.88	-75.48	FDR	No engelamiento
19	10	2015	02:29:58.0	15998	7.79	-72.68	FDR	No engelamiento
21	10	2015	15:18:36.0	16897	3.91	-76.74	FDR	No engelamiento
21	5	2015	11:39:57.0	15518	3.76	-72.45	FDR	No engelamiento
21	5	2015	20:37:31.0	15567	3.58	-74.77	FDR	No engelamiento
24	5	2015	01:34:05.0	17049	2.98	-75.27	FDR	No engelamiento
11	4	2015	14:04:23.0	15527	3.59	-74.7	FDR	No engelamiento
28	8	2015	20:07:59.0	18130	3.85	-75.52	FDR	No engelamiento
28	8	2015	21:51:56.0	17708	3.07	-75.28	FDR	No engelamiento
28	8	2015	23:03:19.0	14025	2.72	-73.64	FDR	No engelamiento
29	8	2015	12:21:33.0	15972	4.13	-73.49	FDR	No engelamiento
29	8	2015	15:18:20.0	14480	3.46	-74.74	FDR	No engelamiento
29	8	2015	19:02:01.0	14627	3.34	-74.77	FDR	No engelamiento
29	8	2015	23:15:43.0	17128	3.25	-74.82	FDR	No engelamiento
30	8	2015	22:29:47.0	16046	3.08	-76.86	FDR	No engelamiento
31	8	2015	00:23:29.0	17019	2.81	-77.27	FDR	No engelamiento
31	8	2015	01:45:19.0	16908	4.34	-75.59	FDR	No engelamiento
30	8	2015	15:02:03.0	14520	2.64	-74.2	FDR	No engelamiento
31	8	2015	12:11:45.0	14596	4.85	-74.01	FDR	No engelamiento
31	8	2015	14:51:42.0	15468	4.32	-72.58	FDR	No engelamiento
31	8	2015	19:30:47.0	15998	5.19	-72.97	FDR	No engelamiento
20	8	2015	22:55:54.0	18153	3.44	-75.02	FDR	No engelamiento
21	8	2015	22:47:20.0	17020	6.19	-73.46	FDR	No engelamiento
22	8	2015	01:04:48.0	15970	7	-73.34	FDR	No engelamiento
25	8	2015	16:17:27.0	15962	3.8	-74.79	FDR	No engelamiento
25	8	2015	20:25:27.0	16032	7.02	-73.43	FDR	No engelamiento
4	12	2016	21:58:51.0	17010	7.55	-74.74	FDR	No engelamiento
7	12	2016	19:18:09.0	15760	6.32	-75.07	FDR	No engelamiento
8	12	2016	01:51:40.0	14682	6.06	-75.23	FDR	No engelamiento
10	12	2016	16:59:14.0	16043	1.83	-75.85	FDR	No engelamiento
10	12	2016	23:58:56.0	17138	3.6	-75.07	FDR	No engelamiento
Continúa en la siguiente página								

Tabla D.1 – Continuación de la página anterior

Día	Mes	Año	Hora(UTC)	Altitud	Latitud	Longitud	Datos	Tipo
13	12	2016	20:16:07.0	16367	9.67	-74.85	FDR	No engelamiento
16	11	2016	17:44:05.0	14098	2.04	-75.47	FDR	No engelamiento
16	11	2016	18:54:03.0	15230	2.01	-75.49	FDR	No engelamiento
16	11	2016	21:50:08.0	15251	2.01	-75.56	FDR	No engelamiento
19	11	2016	11:23:40.0	19011	4.53	-73.46	FDR	No engelamiento
19	11	2016	17:06:25.0	15736	5.37	-75.4	FDR	No engelamiento
18	10	2016	16:32:39.0	16992	4.85	-73.74	FDR	No engelamiento
15	10	2016	15:45:26.0	17938	4.23	-73.41	FDR	No engelamiento
17	10	2016	12:54:47.0	19011	6.48	-73.29	FDR	No engelamiento
17	10	2016	14:49:42.0	18086	7.93	-72.57	FDR	No engelamiento
17	10	2016	19:30:13.0	20242	3.93	-75.37	FDR	No engelamiento
17	10	2016	21:10:54.0	16078	3.33	-76.48	FDR	No engelamiento
18	10	2016	03:20:01.0	19012	2.41	-77.63	FDR	No engelamiento
18	10	2016	14:51:08.0	16024	2.88	-77.2	FDR	No engelamiento
18	10	2016	17:18:59.0	19046	1.52	-77.31	FDR	No engelamiento
18	10	2016	21:22:38.0	15365	1.61	-75.47	FDR	No engelamiento
18	12	2016	17:29:45.0	13575	3.57	-74.76	FDR	No engelamiento
20	12	2016	16:21:57.0	15076	8.02	-76.43	FDR	No engelamiento
1	5	2016	22:57:18.0	16123	3.73	-74.85	FDR	No engelamiento
4	5	2016	23:43:48.0	15093	3.34	-74.74	FDR	No engelamiento
19	5	2016	22:35:19.0	15673	4.53	-74.57	FDR	No engelamiento
20	5	2016	00:43:25.0	14963	4.43	-75.69	FDR	No engelamiento
26	4	2016	19:19:03.0	17072	4.1	-76.05	FDR	No engelamiento
27	4	2016	03:09:06.0	14688	2.74	-74.31	FDR	No engelamiento
27	4	2016	06:32:36.0	14538	3.55	-74.85	FDR	No engelamiento
7	3	2016	12:50:33.0	15578	5.37	-75.4	FDR	No engelamiento
7	3	2016	13:56:58.0	14585	5.9	-75.21	FDR	No engelamiento
7	3	2016	20:00:02.0	16129	4.56	-72.84	FDR	No engelamiento
8	3	2016	02:01:42.0	14622	6.06	-75.25	FDR	No engelamiento
8	3	2016	13:53:09.0	16986	5.08	-71.99	FDR	No engelamiento
8	3	2016	21:13:13.0	18162	5.3	-72.11	FDR	No engelamiento
7	3	2016	20:20:43.0	16128	5.4	-74.8	FDR	No engelamiento
7	3	2016	21:53:02.0	14159	5.43	-74.79	FDR	No engelamiento
8	3	2016	15:48:19.0	15511	2.93	-73.9	FDR	No engelamiento
9	3	2016	17:51:50.0	14533	3.19	-74.46	FDR	No engelamiento
9	3	2016	20:19:25.0	14604	3.34	-74.76	FDR	No engelamiento
Continúa en la siguiente página								

Tabla D.1 – Continuación de la página anterior

Día	Mes	Año	Hora(UTC)	Altitud	Latitud	Longitud	Datos	Tipo
13	3	2016	12:38:22.0	17009	3.22	-72.96	FDR	No engelamiento
13	3	2016	14:27:36.0	19039	1.16	-71.85	FDR	No engelamiento
15	3	2016	20:01:20.0	15054	3.54	-73.15	FDR	No engelamiento
16	3	2016	01:48:23.0	16004	4.18	-73.78	FDR	No engelamiento
4	3	2016	19:41:47.0	15148	3.81	-74.81	FDR	No engelamiento
6	3	2016	04:00:05.0	15884	4.06	-76.23	FDR	No engelamiento
29	1	2016	16:37:40.0	15016	-2.41	-70.17	FDR	No engelamiento
2	2	2016	19:52:51.0	17152	6.01	-72.01	FDR	No engelamiento
3	2	2016	13:44:03.0	14534	3.43	-74.65	FDR	No engelamiento
8	1	2016	15:41:34.0	19017	5.79	-73.85	FDR	No engelamiento
8	1	2016	23:58:51.0	19024	9.56	-75.18	FDR	No engelamiento
14	1	2016	14:57:59.0	20124	5.99	-73.84	FDR	No engelamiento
23	1	2016	19:50:42.0	17679	3.73	-74.83	FDR	No engelamiento
23	1	2016	23:58:53.0	18047	7.91	-72.67	FDR	No engelamiento
15	1	2016	17:21:17.0	15645	3.49	-74.8	FDR	No engelamiento
1	10	2017	13:53:29.0	17737	7.07	-76.17	FDR	No engelamiento
1	10	2017	15:15:53.0	17042	7.31	-76.36	FDR	No engelamiento
3	10	2017	13:56:36.0	18140	1.38	-76.08	FDR	No engelamiento
10	8	2017	15:14:46.0	16984	3.92	-72.93	FDR	No engelamiento
11	8	2017	18:44:20.0	16030	4.18	-73.87	FDR	No engelamiento
12	8	2017	20:25:22.0	16718	4.06	-74.86	FDR	No engelamiento
15	1	2018	12:52:57.0	15659	5.36	-75.4	FDR	No engelamiento
15	1	2018	14:03:32.0	16648	5.8	-75.04	FDR	No engelamiento
15	1	2018	20:05:11.0	16097	7.92	-72.74	FDR	No engelamiento
15	1	2018	21:43:39.0	14774	5.97	-75.16	FDR	No engelamiento
16	5	2018	18:38:08.0	14638	3.54	-74.73	FDR	No engelamiento
16	5	2018	21:03:15.0	14860	3.5	-74.64	FDR	No engelamiento
17	5	2018	20:42:09.0	19019	7.55	-74.8	FDR	No engelamiento
17	5	2018	15:56:04.0	15687	6.01	-75.09	FDR	No engelamiento
15	9	2018	22:37:48.0	14752	5.95	-75.22	FDR	No engelamiento
16	9	2018	21:02:59.0	17069	4.22	-75.9	FDR	No engelamiento
17	9	2018	14:00:29.0	19013	6.53	-74.14	FDR	No engelamiento
17	9	2018	18:18:26.0	18149	3.69	-75.02	FDR	No engelamiento
21	6	2018	17:35:25.0	14530	3.39	-74.73	FDR	No engelamiento
21	6	2018	23:13:53.0	14628	3.35	-74.67	FDR	No engelamiento
22	6	2018	11:38:39.0	14909	4.81	-73.52	FDR	No engelamiento
Continúa en la siguiente página								

Tabla D.1 – Continuación de la página anterior

Día	Mes	Año	Hora(UTC)	Altitud	Latitud	Longitud	Datos	Tipo
22	6	2018	22:43:57.0	16044	5.19	-69.74	FDR	No engelamiento
26	6	2018	15:32:42.0	15669	5.62	-75.31	FDR	No engelamiento
26	6	2018	16:42:53.0	14668	7.38	-75.18	FDR	No engelamiento
26	6	2018	18:54:38.0	15721	6.52	-75.36	FDR	No engelamiento
26	6	2018	21:20:24.0	16060	7.7	-72.83	FDR	No engelamiento
27	6	2018	00:54:35.0	18002	7.79	-72.73	FDR	No engelamiento
18	8	2018	18:06:05.0	21155	3.4	-76.99	FDR	No engelamiento
19	8	2018	19:39:07.0	21019	2.15	-77.42	FDR	No engelamiento
19	8	2018	21:17:26.0	15043	2.85	-77.28	FDR	No engelamiento
15	11	2018	18:26:34.0	21024	4.91	-72.92	FDR	No engelamiento
15	11	2018	20:12:01.0	17774	5.4	-75.44	FDR	No engelamiento
15	11	2018	21:31:04.0	15024	7.02	-74.71	FDR	No engelamiento
15	11	2018	22:36:49.0	18029	7.6	-73.6	FDR	No engelamiento
16	11	2018	12:06:00.0	17665	5.48	-75.28	FDR	No engelamiento
16	11	2018	22:22:00.0	19029	6.88	-76.05	FDR	No engelamiento
17	11	2018	14:04:26.0	18094	8.17	-75.34	FDR	No engelamiento
17	11	2018	15:48:35.0	17108	8.25	-75.27	FDR	No engelamiento
20	11	2018	13:11:25.0	17957	2.88	-75.13	FDR	No engelamiento
20	11	2018	15:18:47.0	15997	3.09	-75.46	FDR	No engelamiento
20	11	2018	16:56:14.0	19020	2.38	-76.53	FDR	No engelamiento
20	11	2018	18:35:09.0	16145	2.03	-75.4	FDR	No engelamiento
20	11	2018	20:43:36.0	16994	4.39	-75.49	FDR	No engelamiento
5	10	2018	20:45:18.0	20016	3.69	-75.84	FDR	No engelamiento
5	10	2018	22:03:49.0	19026	2.89	-76.5	FDR	No engelamiento
6	10	2018	14:36:37.0	15560	4.3	-74.46	FDR	No engelamiento
7	10	2018	01:45:28.0	15019	2.85	-75.36	FDR	No engelamiento
23	6	2018	18:49:01.0	16043	5.77	-70.11	FDR	No engelamiento
24	6	2018	12:45:22.0	16669	5	-73.99	FDR	No engelamiento
24	6	2018	15:18:19.0	19075	9.87	-74.41	FDR	No engelamiento

Apéndice E

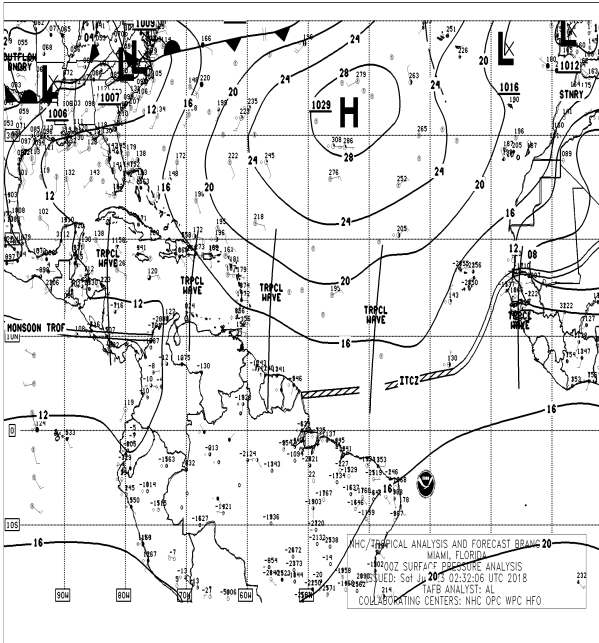
Análisis Casos de Estudio para Eventos de No Englamiento

Caso 5

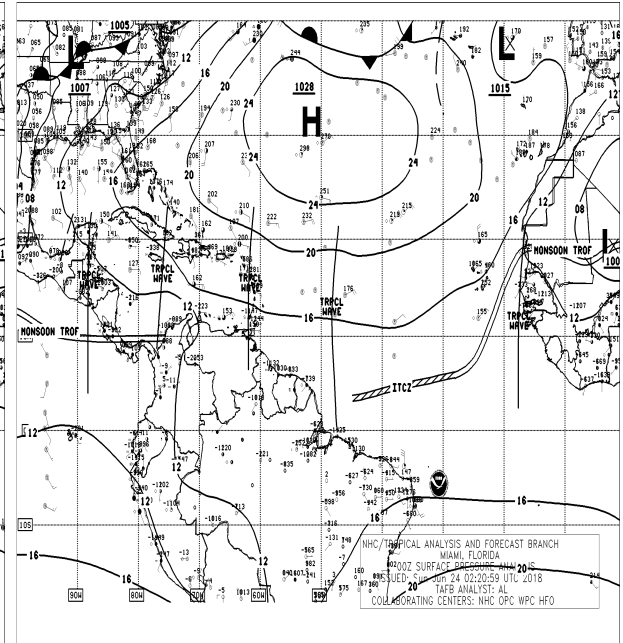


Figura E.1: Ubicación del lugar en el que se produjo el evento analizado como caso 5. El caso corresponde a registro de FDR que se produjo el día 24 de junio de 2018 a las 15:18 UTC en coordenadas 9.86° N -74.41° W departamento del Magdalena.

(a) 23 de junio de 2018, 2:32 UTC



(b) 24 de junio de 2018, 2:20 UTC



(c) 25 de junio de 2018, 2:55 UTC

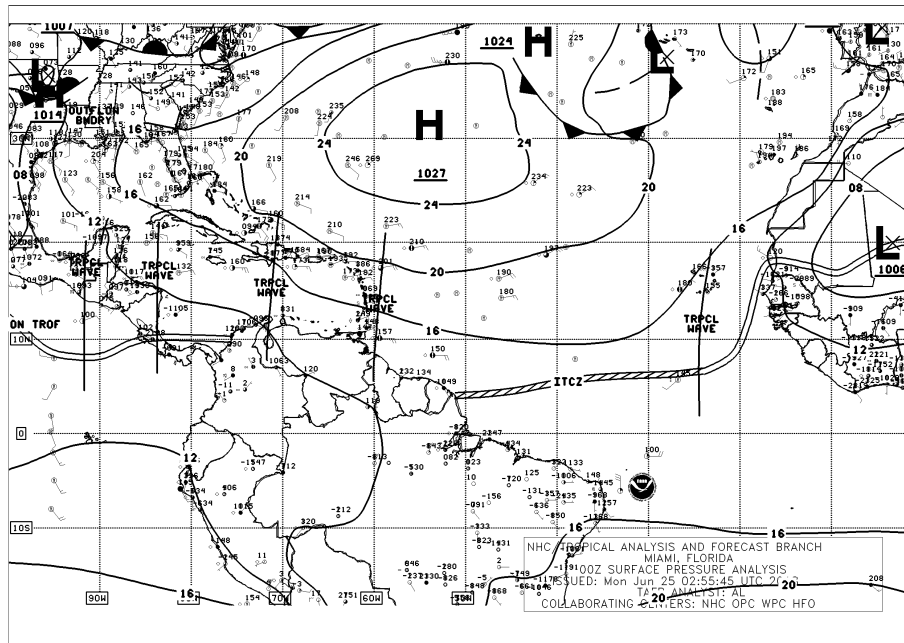


Figura E.2: Cartas sinópticas de superficie para el caso 5.

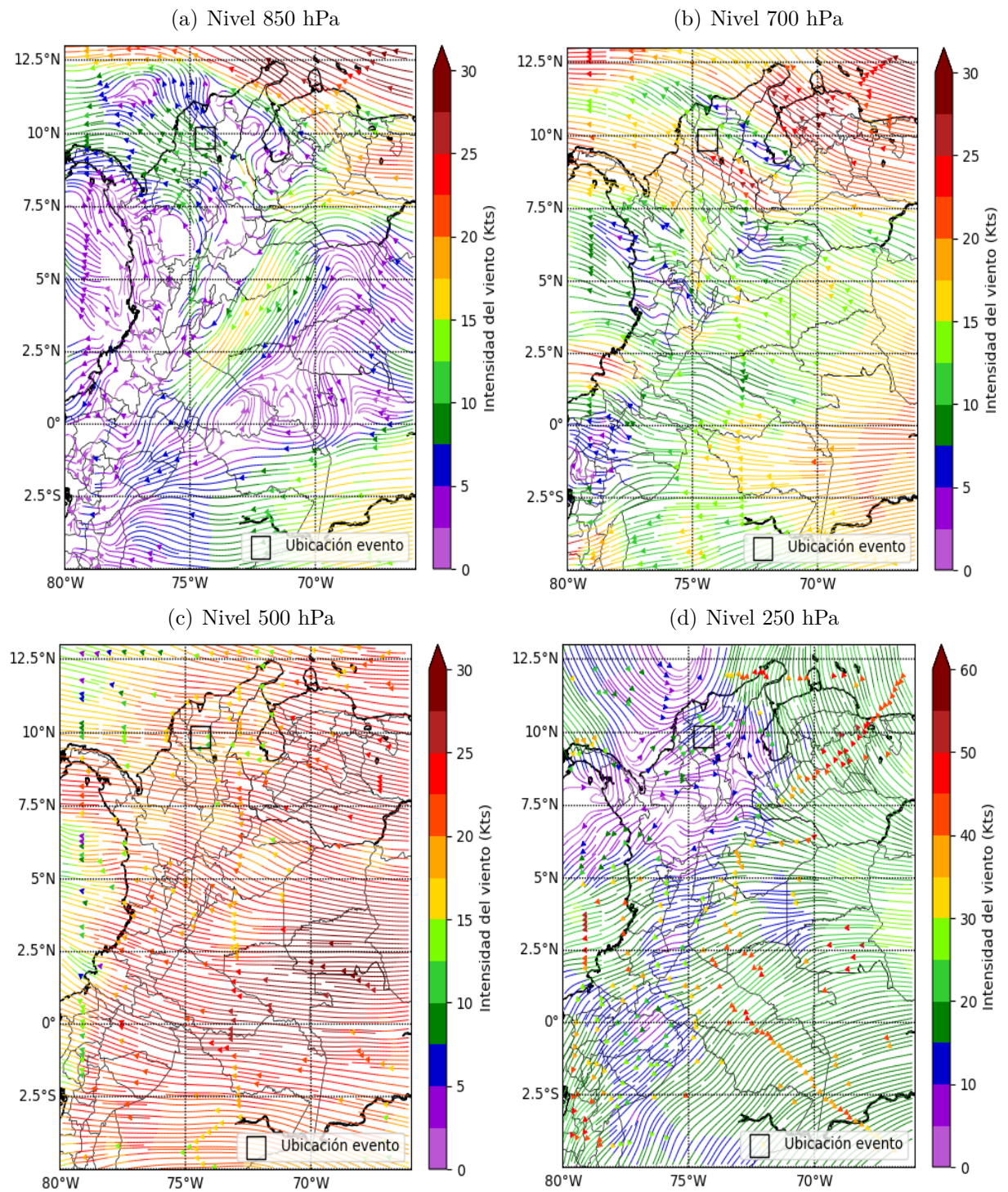


Figura E.3: Cartas de líneas de corriente en los niveles de 850 (a), 700 (b), 500 (c) y 250 hPa (d), a las 19:00 UTC, de acuerdo a datos del reanálisis ERA-5 para el caso 5.

Tabla E.1: Reportes METAR de los aeródromos de Barranquilla , Santa Marta y Valledupar para las 14:00, 15:00 y 16:00 UTC del día 24 de junio de 2018.

Código OACI	Reporte METAR
SKBQ	241400Z 08006KT 9999 SCT012 29/26 A2987=
	241500Z 00000KT 9999 BKN015 30/25 A2986=
	241600Z 00000KT 9999 SCT015 31/25 A2985=
SKSM	241400Z 21006KT 9999 FEW020 SCT200 29/24 A2988=
	241500Z 23004KT 9999 FEW020 SCT200 31/24 A2987=
	241600Z 27008KT 9999 FEW020 SCT200 30/25 A2986=
SKVP	241400Z 06010KT 9999 FEW020 BKN200 29/22 A2994=
	241500Z 06010KT 9999 FEW020 BKN200 30/22 A2993=
	241600Z 08003KT 9999 FEW020 SCT200 32/24 A2992=

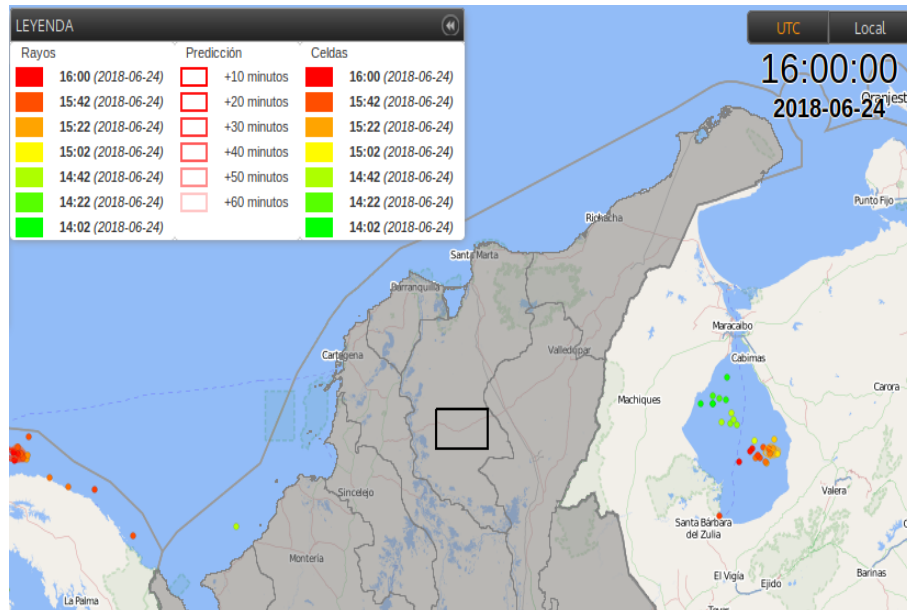


Figura E.6: Presencia de rayos (puntos) y tendencia de movimiento de celdas (conjunto de rayos demarcado) de acuerdo al sistema LINET (Keraunos, 2018), para el caso 5. Las predicciones de tendencia están hechas a partir de la ultima hora registrada y son válidos para tiempos desde 10 minutos hasta 60 minutos después de la hora base.

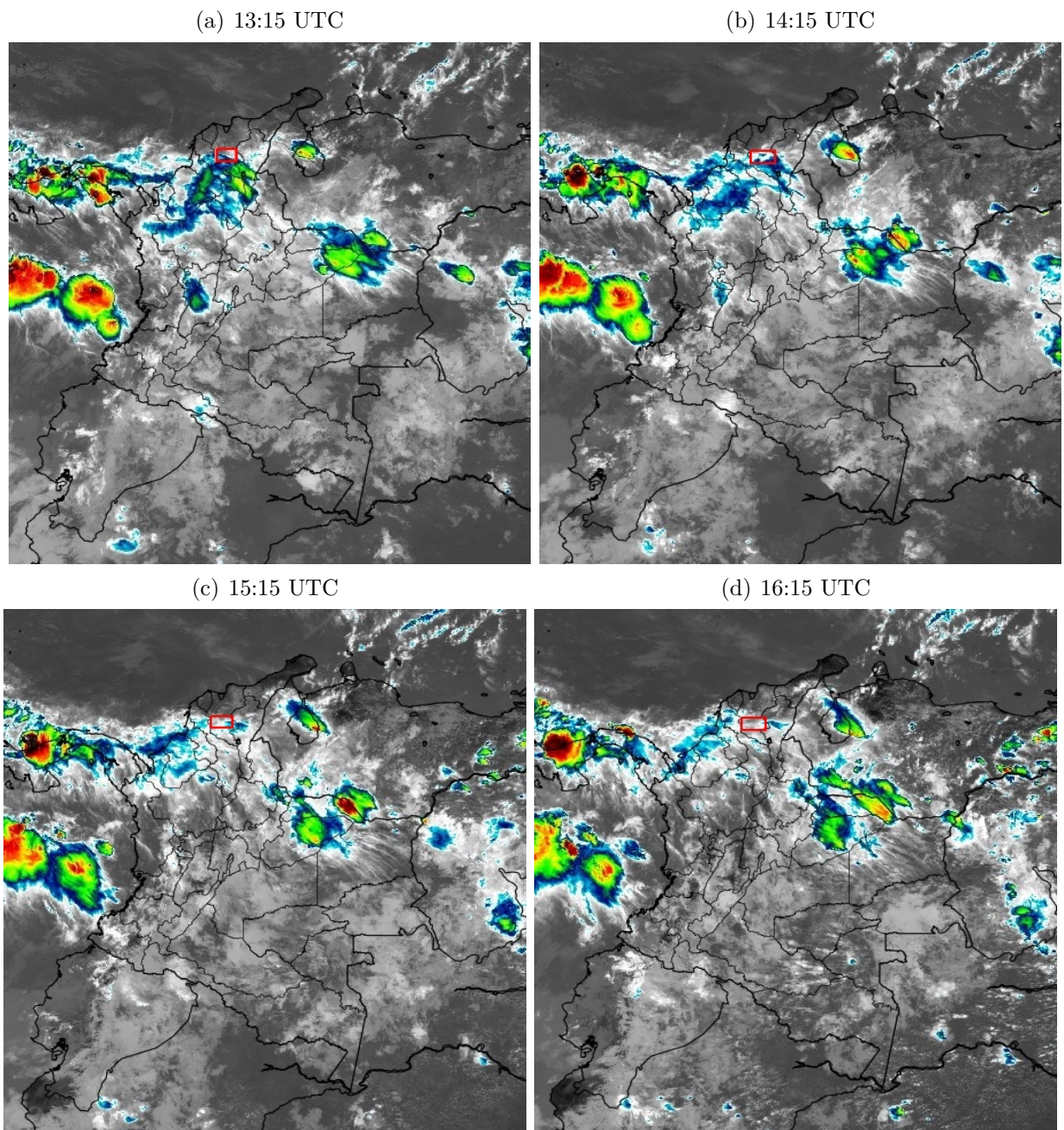


Figura E.4: Imágenes satelitales del canal IR que muestran la evolución del caso 5, tomadas a bordo del satélite GOES-16.

(a) Canal vapor de agua

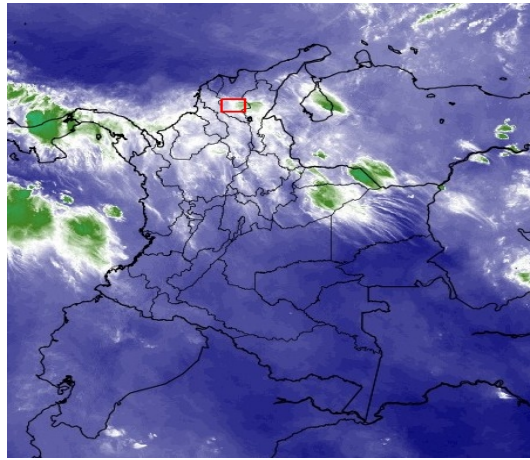


Figura E.5: Imágen de satélite canal visible para el caso 5, tomada a bordo del satélite GOES-13.

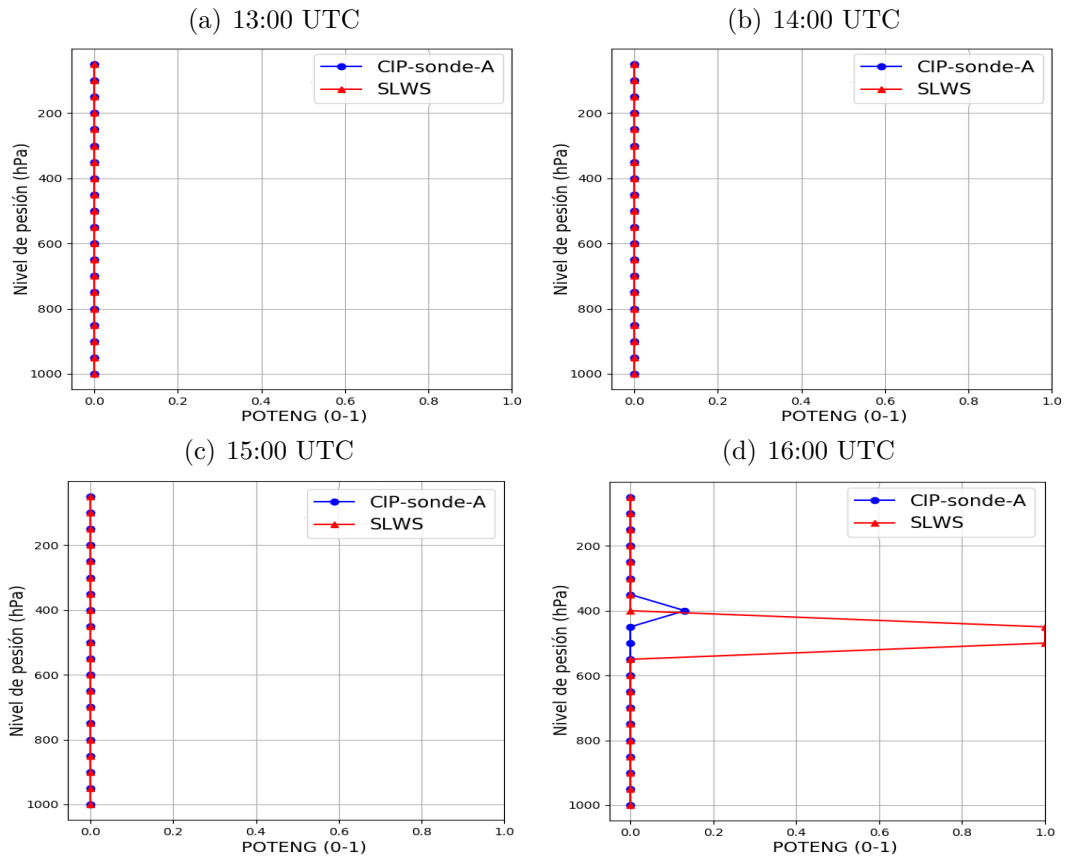


Figura E.7: Evolución de perfil de POTENG entre las 13:00 UTC y las 16:00 UTC del 24 de junio de 2018 según los algoritmos SLWS y CIP-sonde-A aplicados a los datos de reanálisis ERA-5.

Caso 6

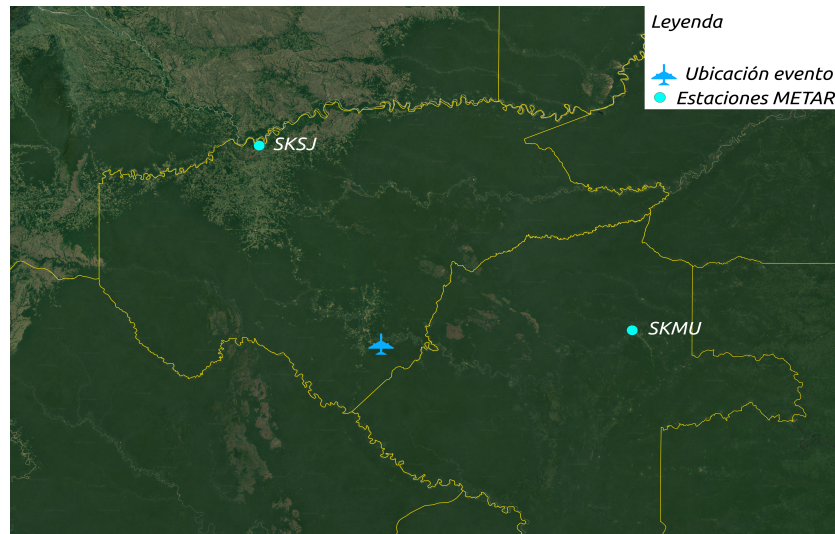
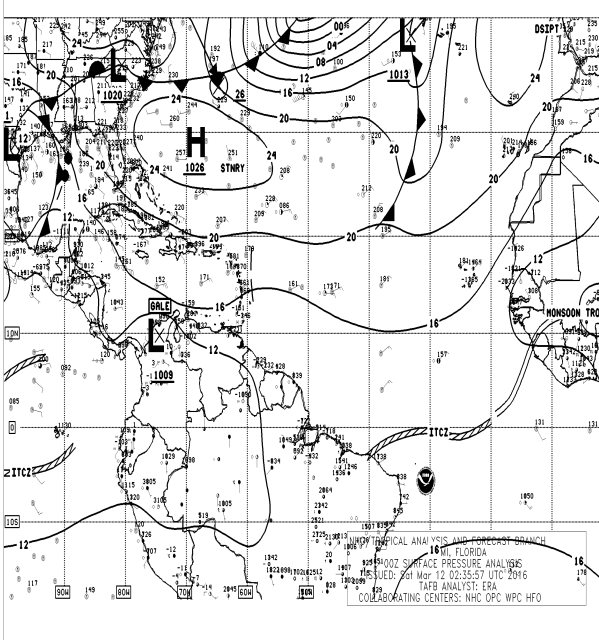
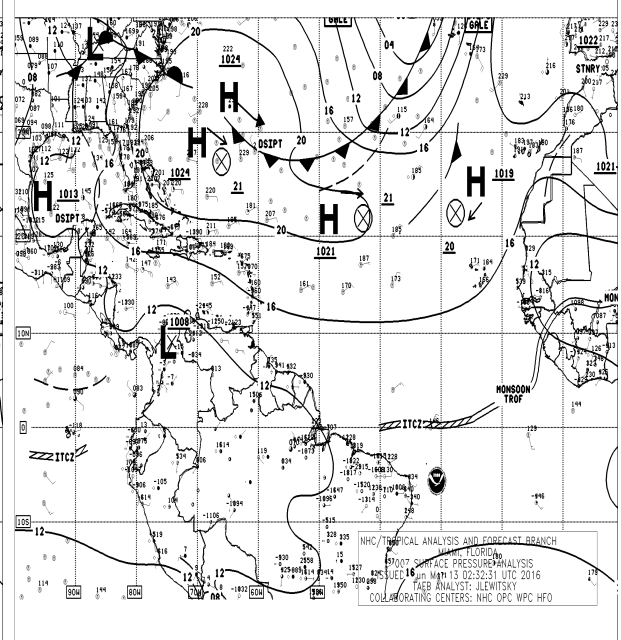


Figura E.8: Ubicación del lugar en el que se produjo el evento analizado como caso 6. El caso corresponde a registro de FDR que se produjo el día 13 de marzo de 2016 a las 14:27 UTC en coordenadas 1.15° N 71.84 W departamento del Guaviare.

(a) 12 de marzo de 2016, 2:35 UTC



(b) 13 de marzo de 2016, 2:25 UTC



(c) 14 de marzo de 2016, 2:25 UTC

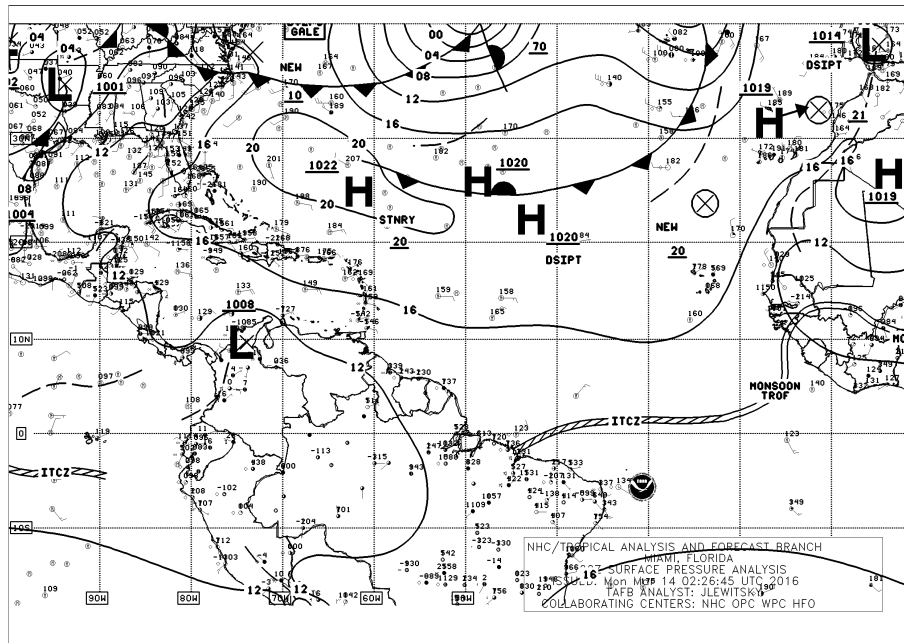


Figura E.9: Cartas sinópticas de superficie para el caso 6.

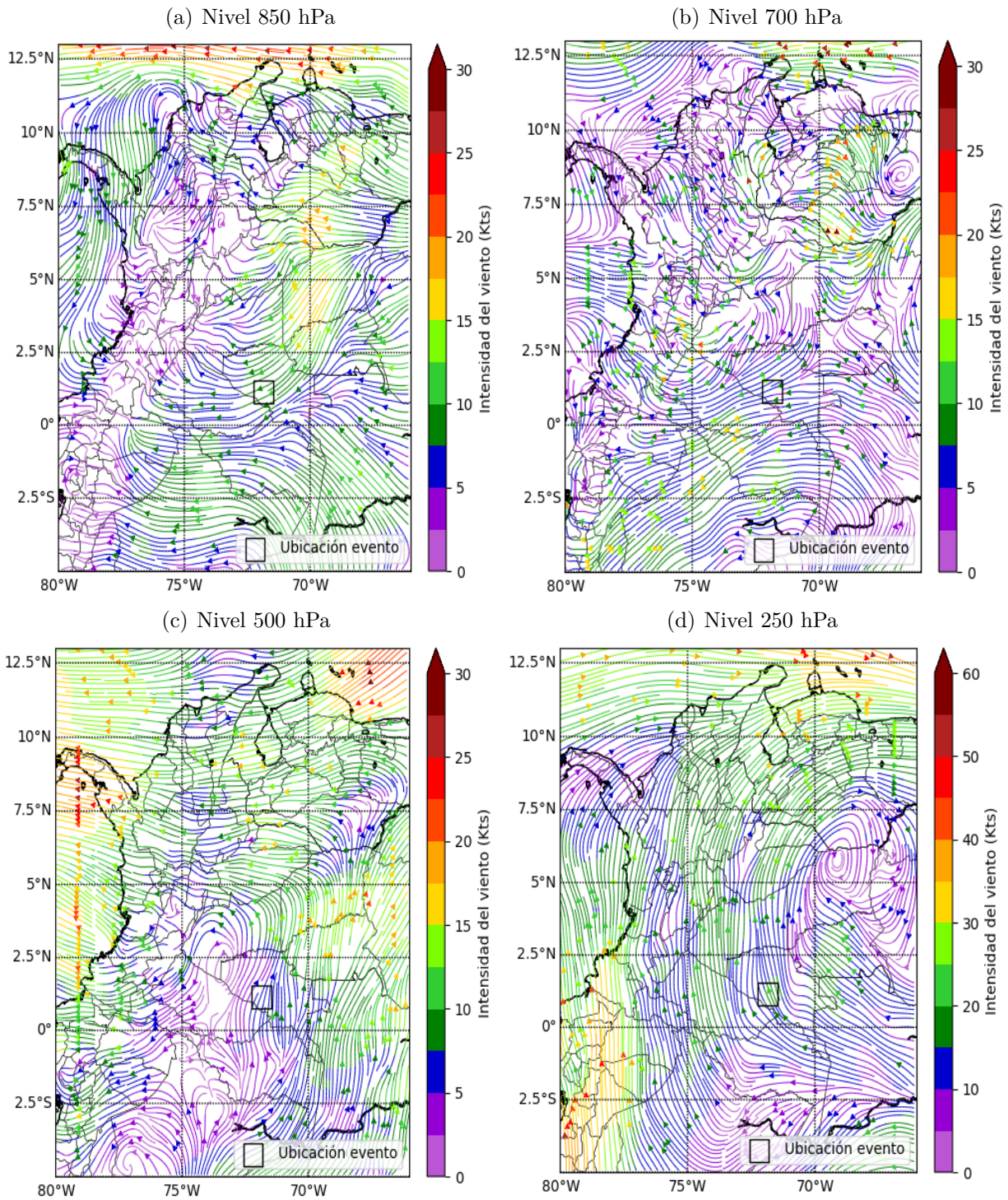


Figura E.10: Cartas de líneas de corriente en los niveles de 850 (a), 700 (b), 500 (c) y 250 hPa (d), a las 19:00 UTC, de acuerdo a datos del reanálisis ERA-5 para el caso 6.

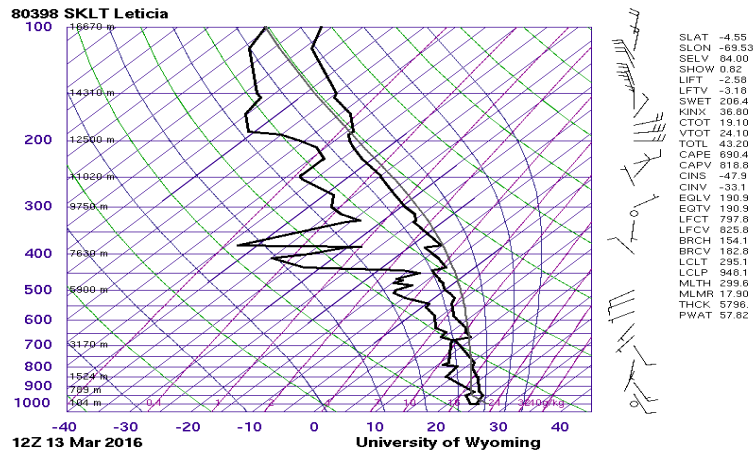


Figura E.11: Radiosondeo más cercano, Leticia Código (80398) para el día del caso 6.

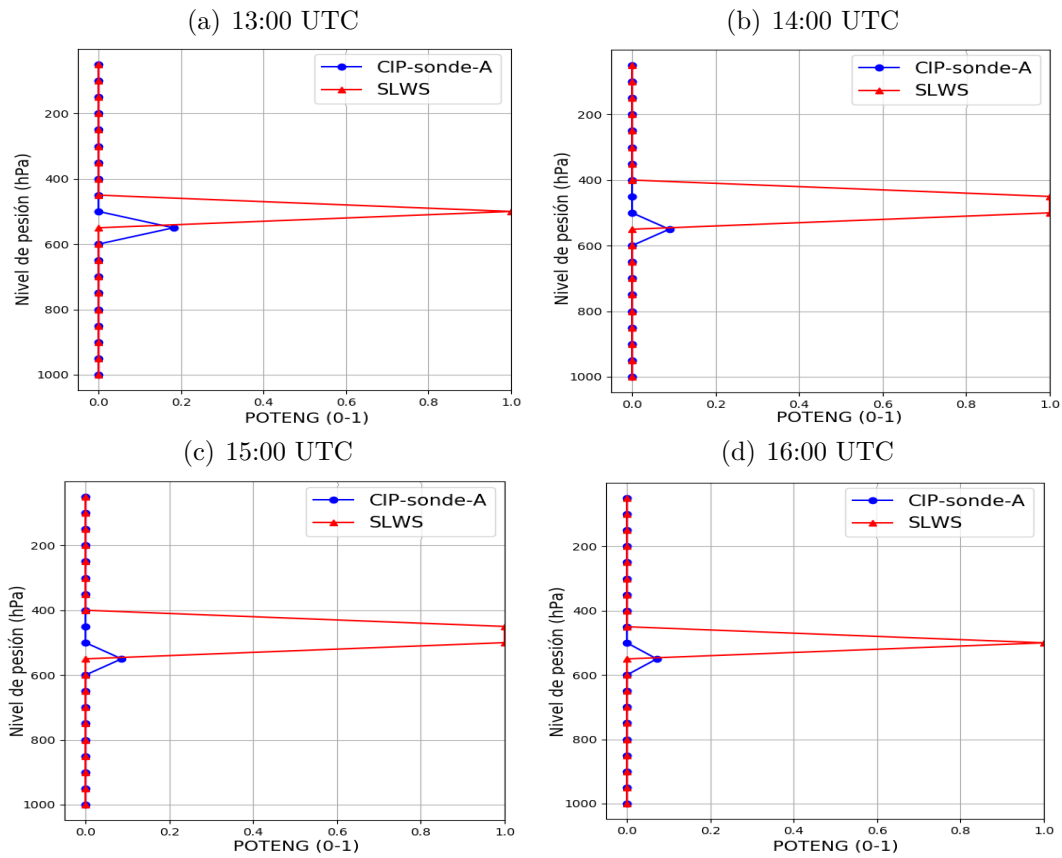


Figura E.15: Evolución de perfil de POTENG para algoritmos SLWS y CIP-sonde-A mediante satos de reanálisis ERA-5 para el caso-6.

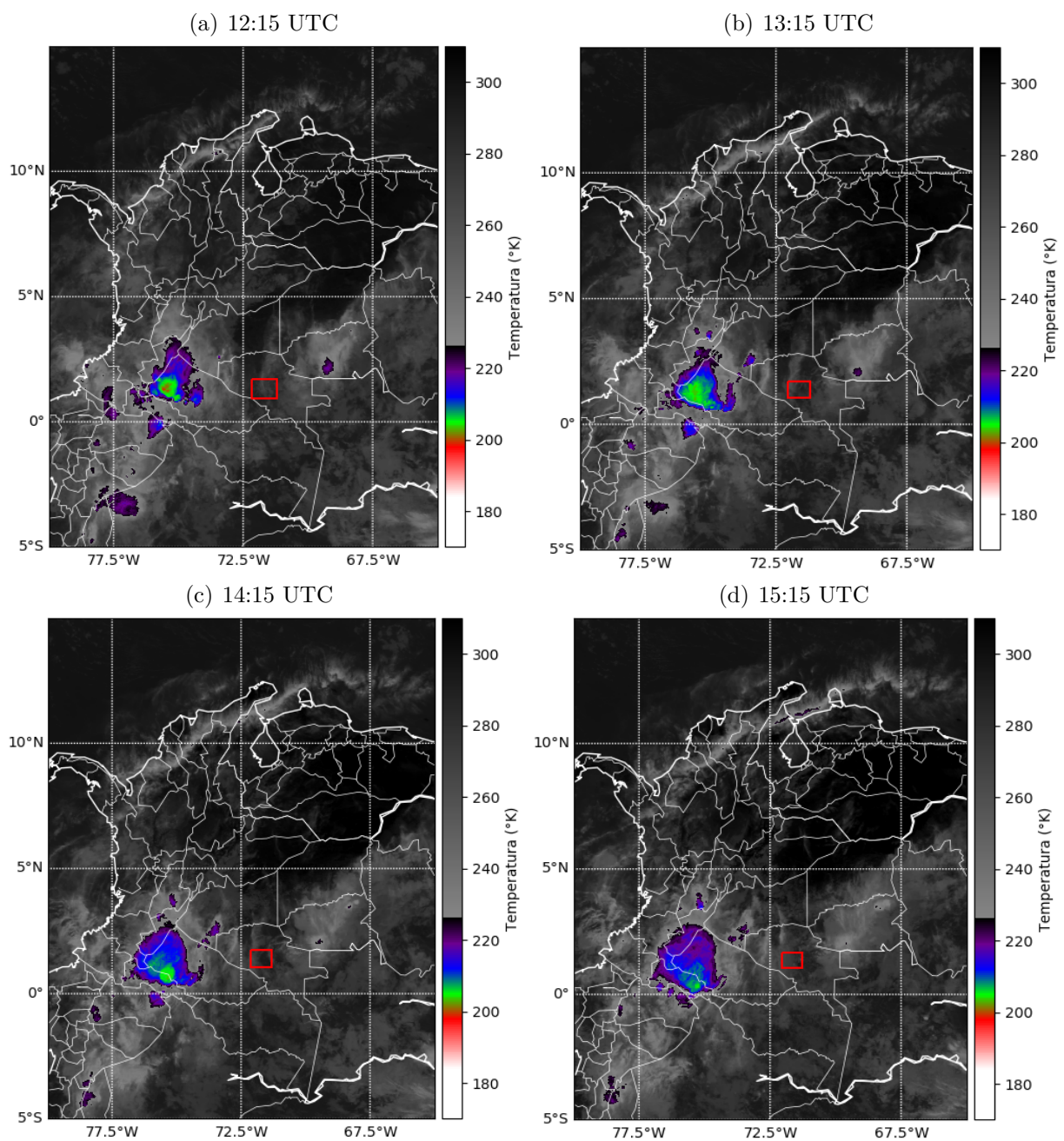


Figura E.12: Imágenes satelitales del canal IR que muestran la evolución del caso 6, tomadas a bordo del satélite GOES-13.

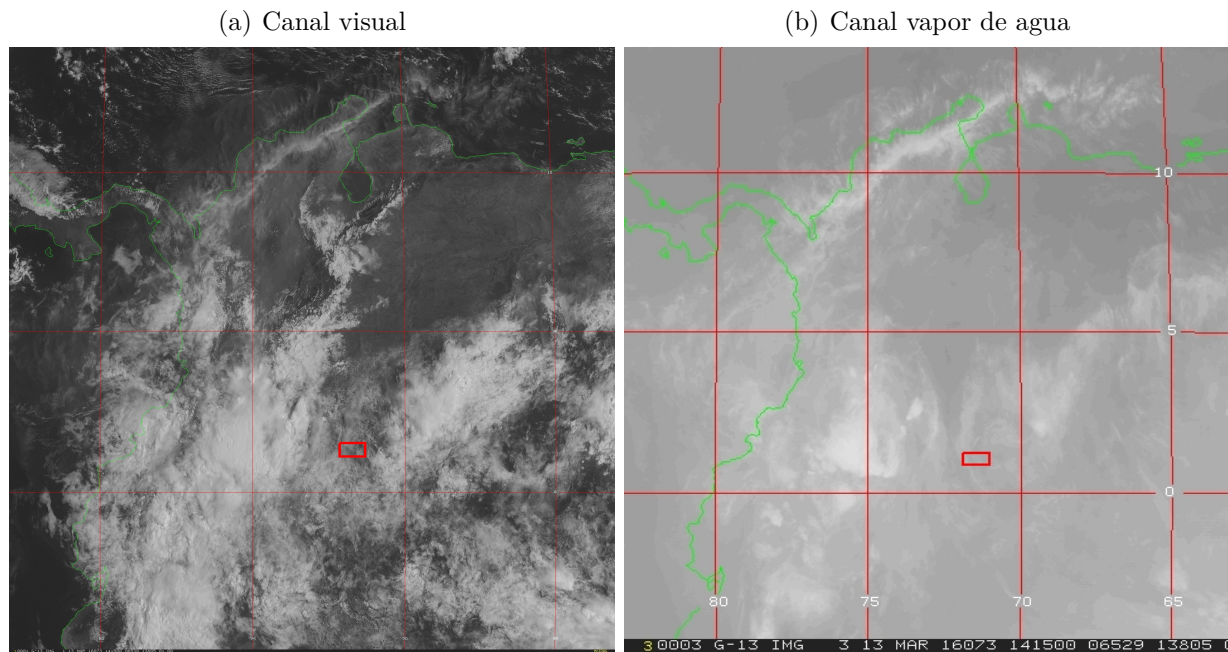


Figura E.13: Imágenes de satélite canal visible y vapor de agua para el caso 6, tomadas a bordo del satélite GOES-13.

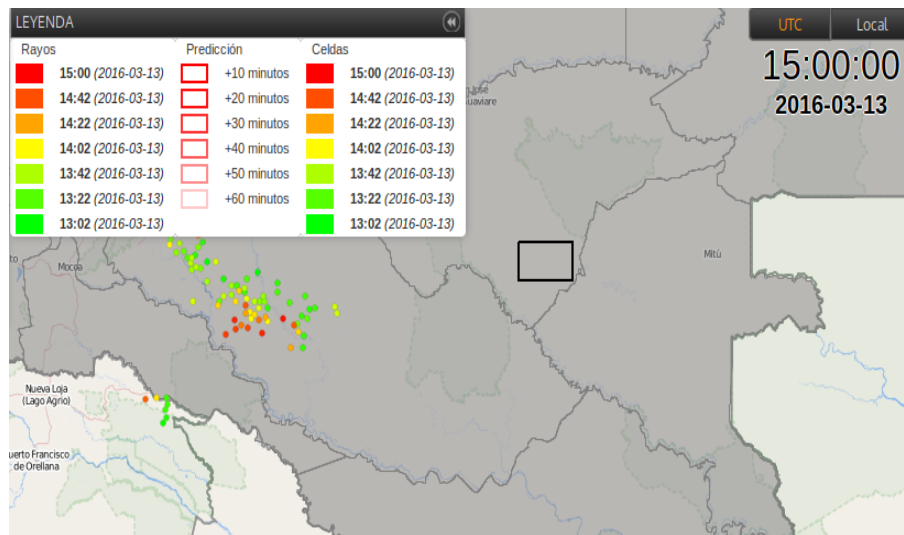


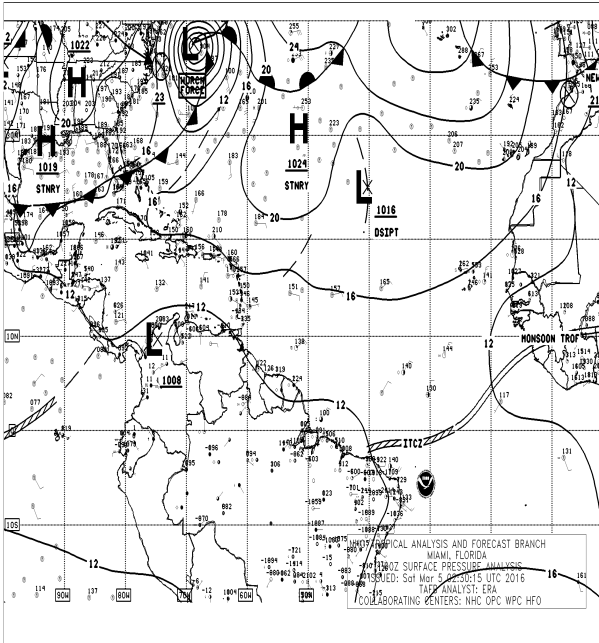
Figura E.14: Presencia de rayos (puntos) y tendencia de movimiento de celdas (conjunto de rayos demarcado) de acuerdo al sistema LINET (<https://linetview.nowcast.de/linetview/pages/index.html>) para el caso 6. Las predicciones de tendencia están hechas a partir de la ultima hora registrada y son válidos para tiempos desde 10 minutos hasta 60 minutos después de la hora base.

Caso 7

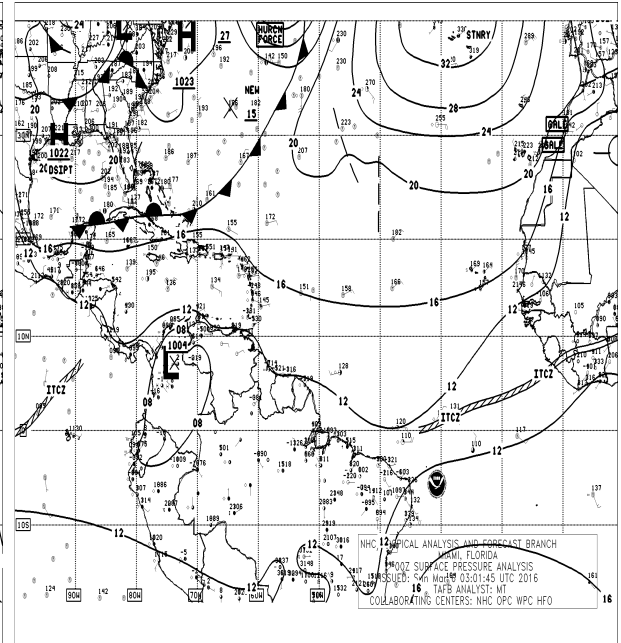


Figura E.16: Ubicación del lugar en el que se produjo el evento analizado como caso 7. El caso corresponde a registro de FDR que se produjo el día 06 de marzo de 2016 a las 04:00 UTC en coordenadas 4.06° N 76.22° W departamento del Valle del Cauca.

(a) 05 de marzo de 2016, 2:30 UTC



(b) 06 de marzo de 2016, 3:01 UTC



(c) 07 de marzo de 2016, 2:18 UTC

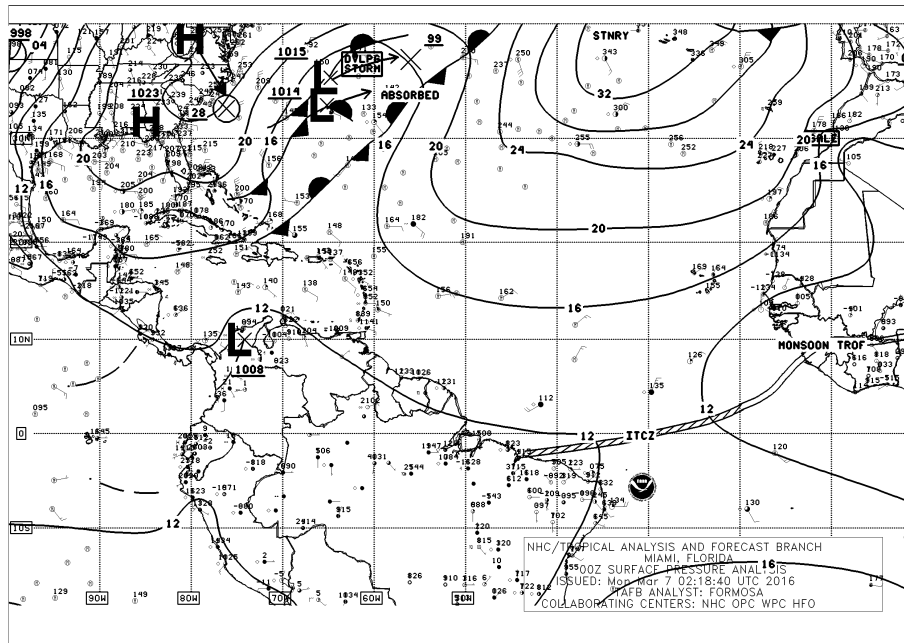


Figura E.17: Cartas sinópticas de superficie para el caso 7

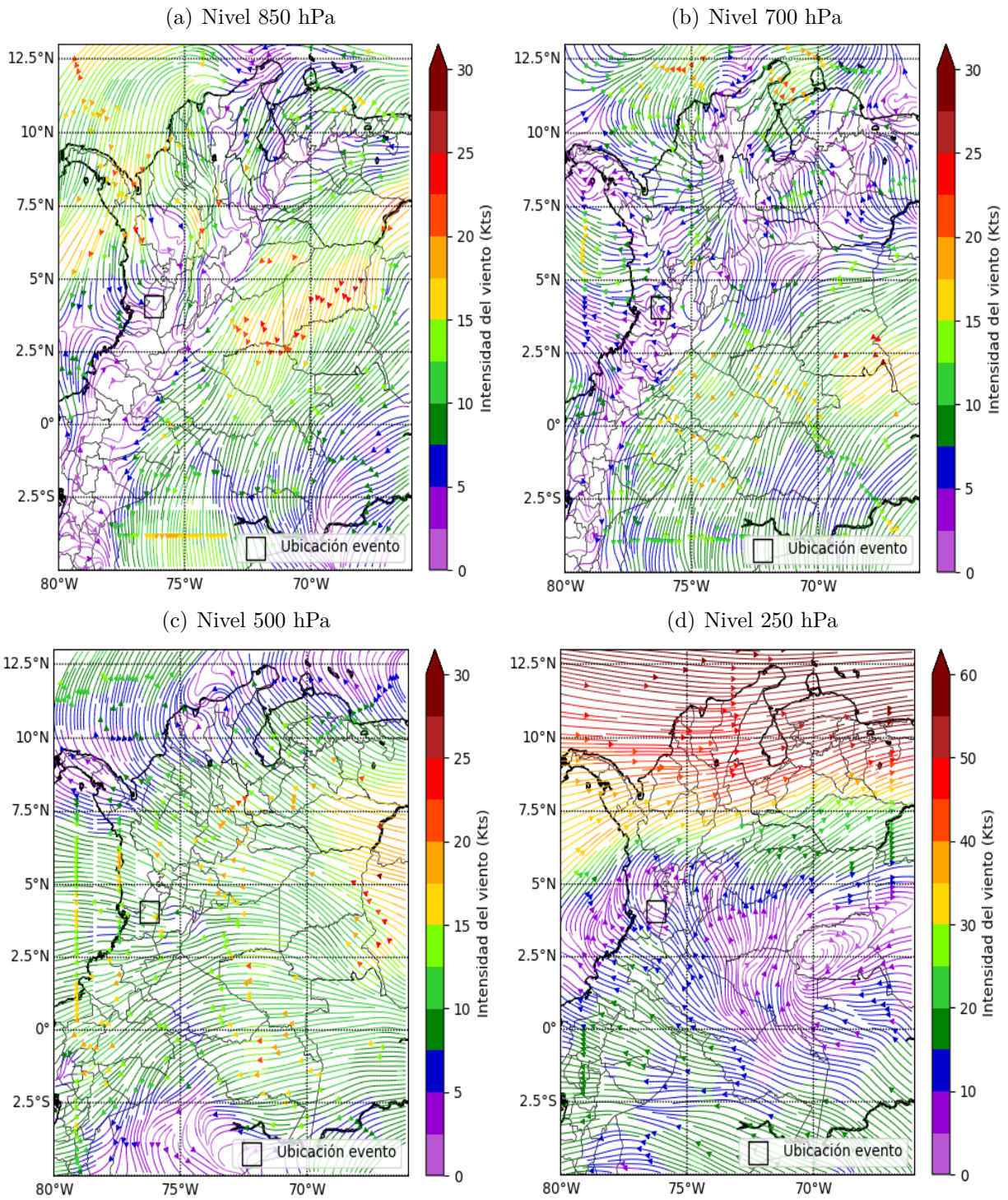


Figura E.18: Cartas de líneas de corriente en los niveles de 850 (a), 700 (b), 500 (c) y 250 hPa (d), a las 19:00 UTC, de acuerdo a datos del reanálisis ERA-5 para el caso 7.

Tabla E.2: Reportes METAR de los aeródromos de Armenia y Cali para las 03:00, 04:00 y 05:00 UTC del día 06 de marzo de 2016.

Código OACI	Reporte METAR
SKAR	060300Z 00000KT 9999 SCT020 SCT090 20/20 A3010=
	060400Z 00000KT 9999 SCT020 SCT090 20/19 A3011=
	060500Z 00000KT 9999 SCT020 SCT090 20/19 A3012=
SKCL	060400Z 02006KT 9999 SCT030 SCT100 23/20 A3004=
	060400Z 02006KT 9999 SCT030 SCT100 23/20 A3004=
	060500Z 06006KT 9999 SCT030 SCT100 21/20 A3004=

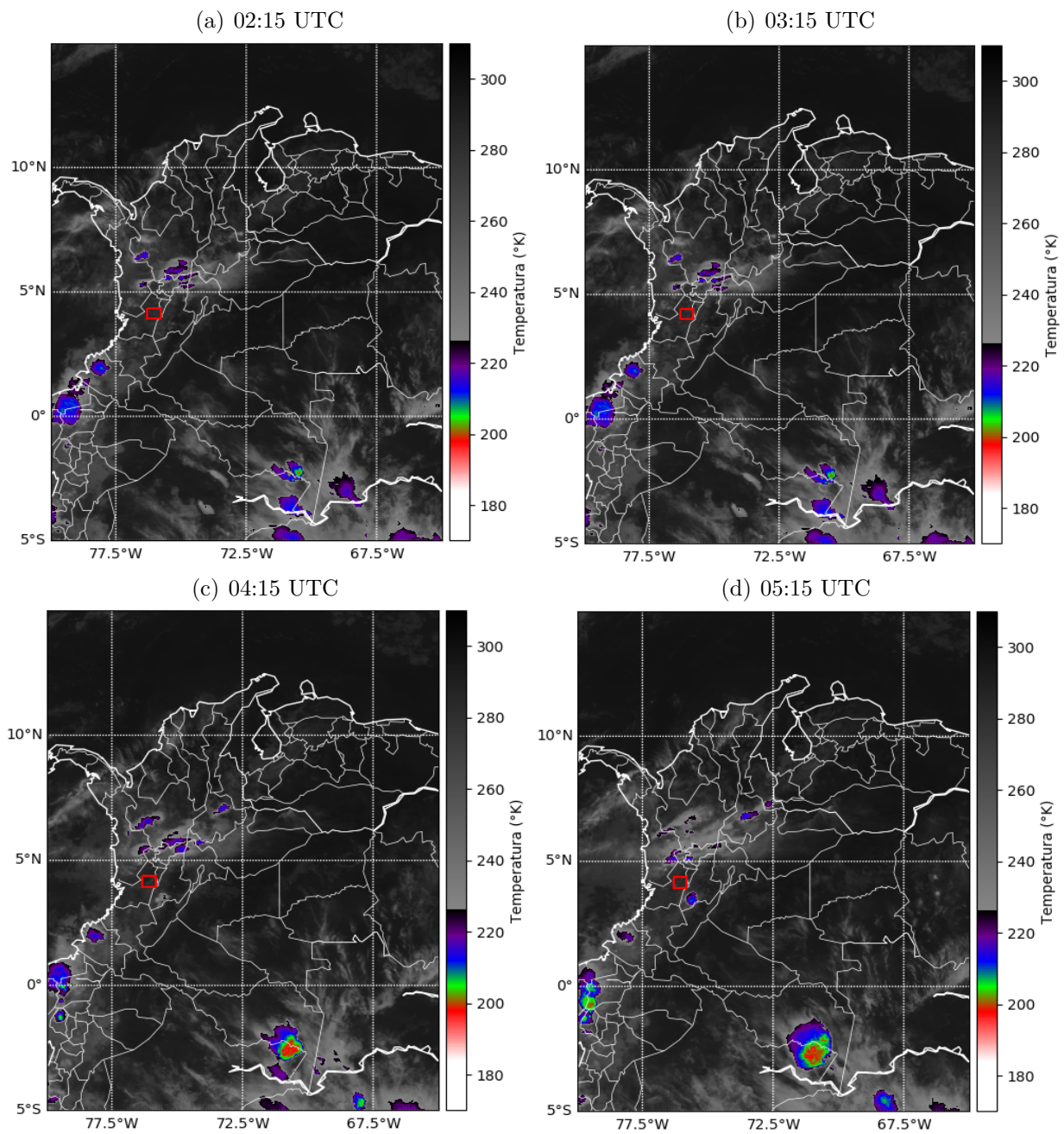


Figura E.19: Imágenes satelitales del canal IR que muestran la evolución del caso 7, tomadas a bordo del satélite GOES-13.

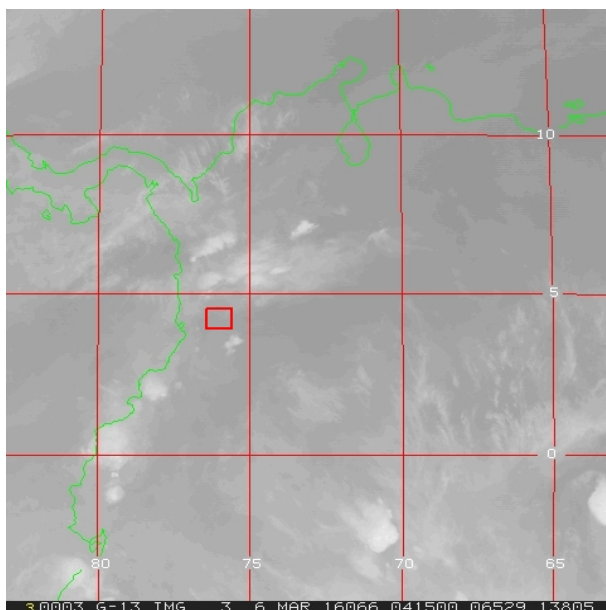


Figura E.20: Imagen de satélite canal vapor de agua para el caso 7, tomadas a bordo del satélite GOES-13.)

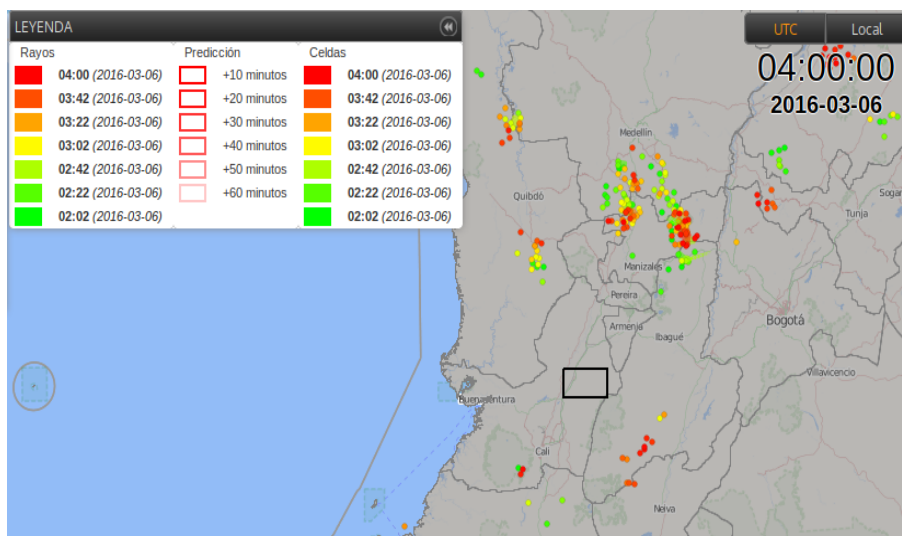


Figura E.21: Presencia de rayos (puntos) y tendencia de movimiento de celdas (conjunto de rayos demarcado) de acuerdo al sistema LINET (<https://linetview.nowcast.de/linetview/pages/index.html>) para el caso 7. Las predicciones de tendencia están hechas a partir de la última hora registrada y son válidos para tiempos desde 10 minutos hasta 60 minutos después de la hora base.

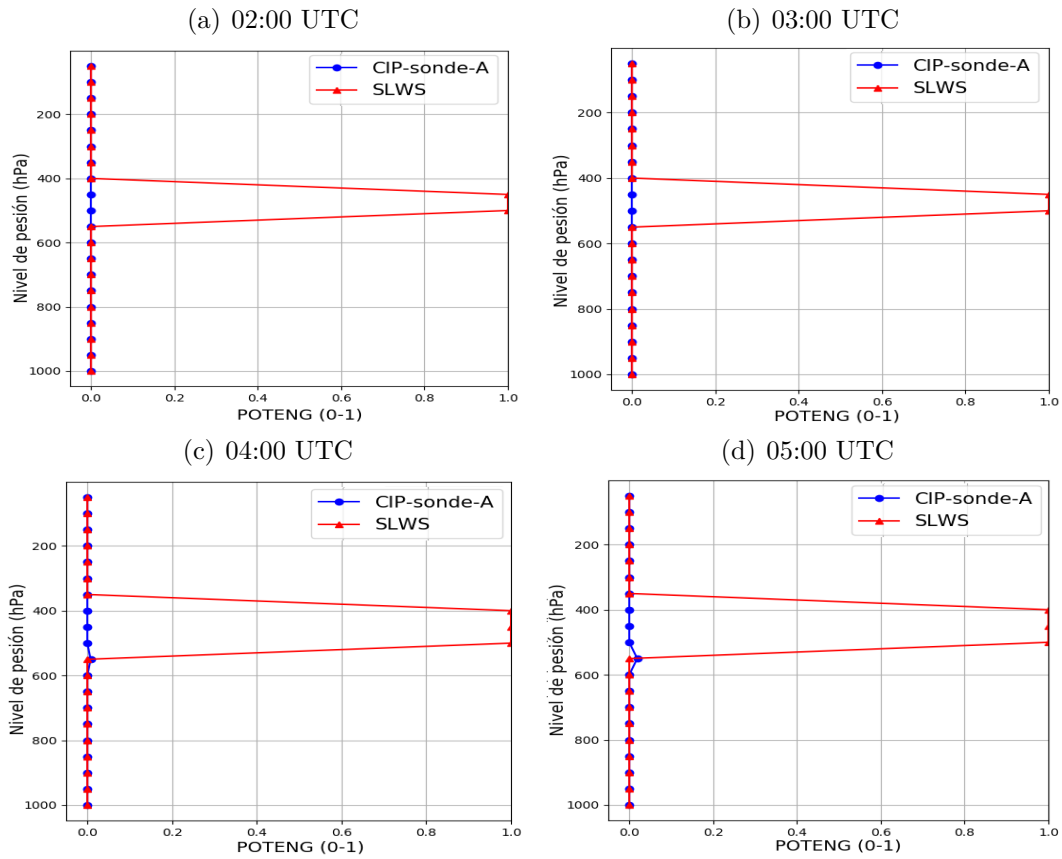


Figura E.22: Evolución de perfil de POTENG entre las 02:00 UTC y las 05:00 UTC del 06 de Marzo de 2016 según los algoritmos SLWS y CIP-sonde-A aplicados a los datos de reanálisis ERA-5.

Caso 8



Figura E.23: Ubicación del lugar en el que se produjo el evento analizado como caso 8. El caso corresponde a registro de FDR que se produjo el día 17 de octubre de 2016 a las 12:54 UTC en coordenadas 6.48° N 73.28° W departamento de Santander.

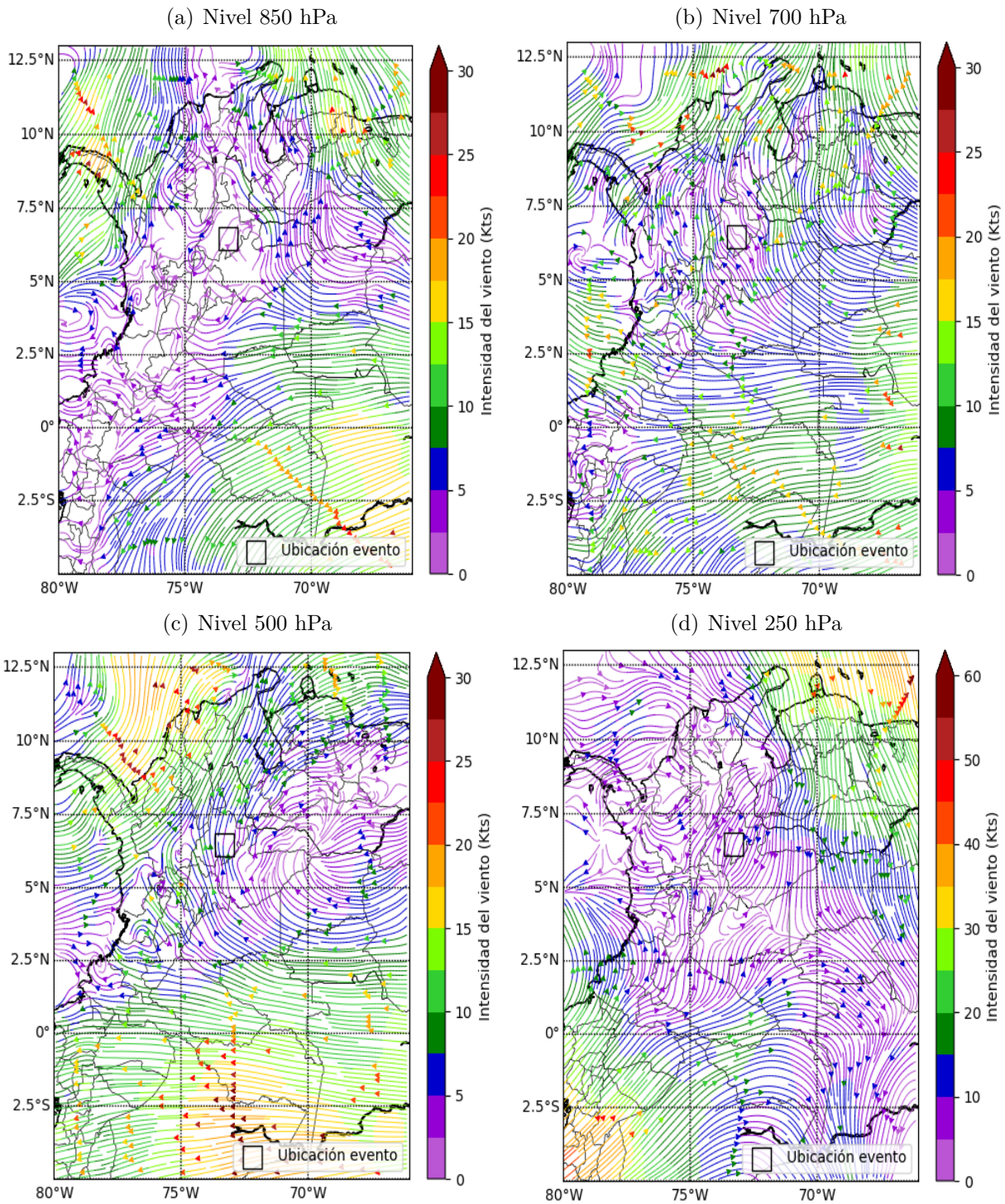


Figura E.25: Cartas de líneas de corriente en los niveles de 850 (a), 700 (b), 500 (c) y 250 hPa (d), a las 19:00 UTC, de acuerdo a datos del reanálisis ERA-5 para el caso 8.

Tabla E.3: Reportes METAR de los aeródromos de Bucaramanga y Barrancabermeja para las 12:00, 13:00 y 14:00 UTC del día 17 de octubre de 2016.

Código OACI	Reporte METAR
SKBG	171200Z 19006KT 9999 FEW015 BKN240 20/18 A2999=
	171300Z 15006KT 9999 FEW015 BKN240 21/19 A3000=
	171400Z 16005KT 9999 FEW015 BKN240 23/18 A3001=
SKEJ	171200Z 00000KT 9999 2000NE BCFG SCT008 25/24 A2984=
	171300Z 00000KT 9999 FEW008 27/25 A2985=
	171400Z 00000KT 9999 SCT008 28/25 A2985=

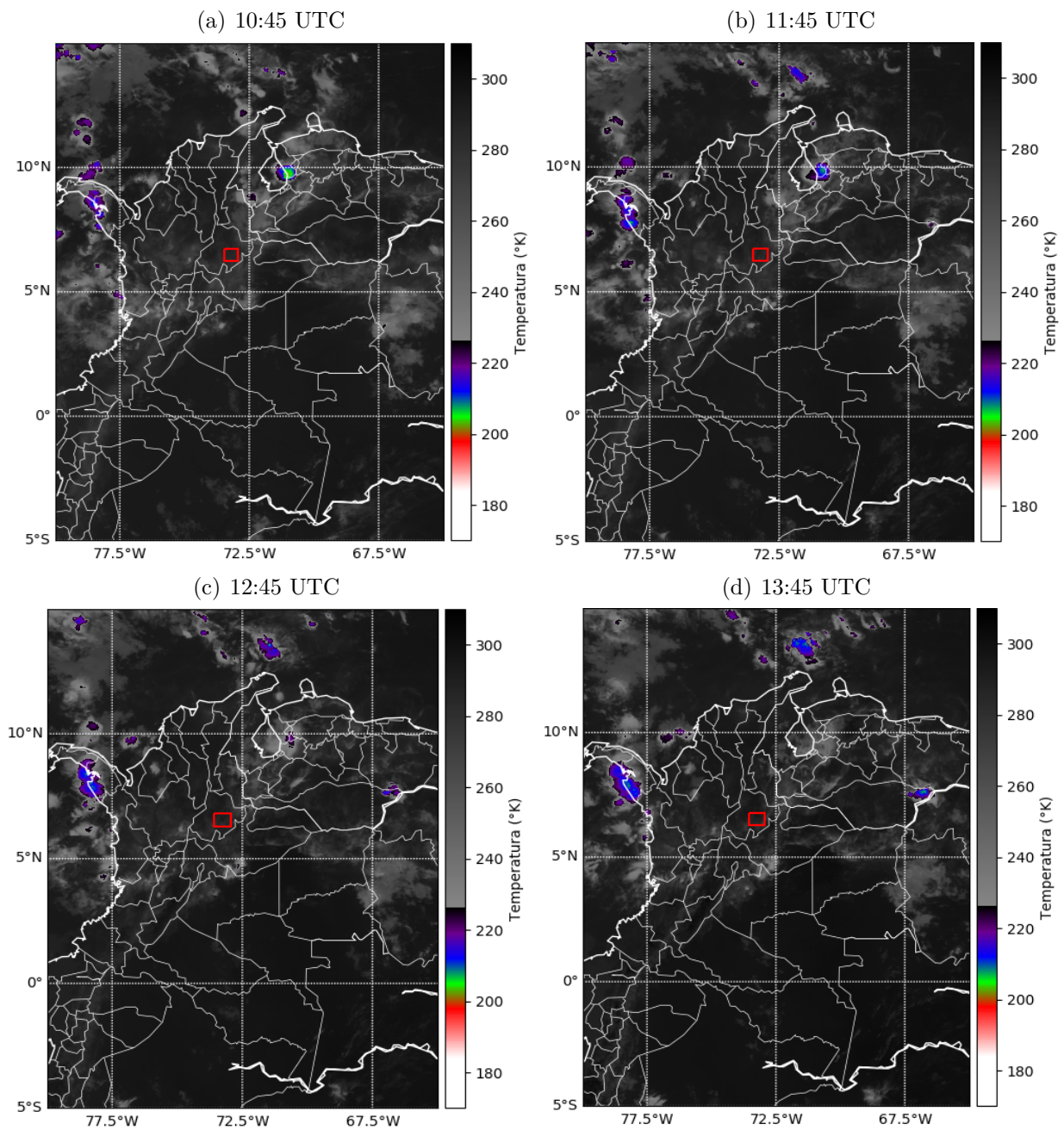


Figura E.26: Imágenes satelitales del canal IR que muestran la evolución del caso 8, tomadas a bordo del satélite GOES-13.

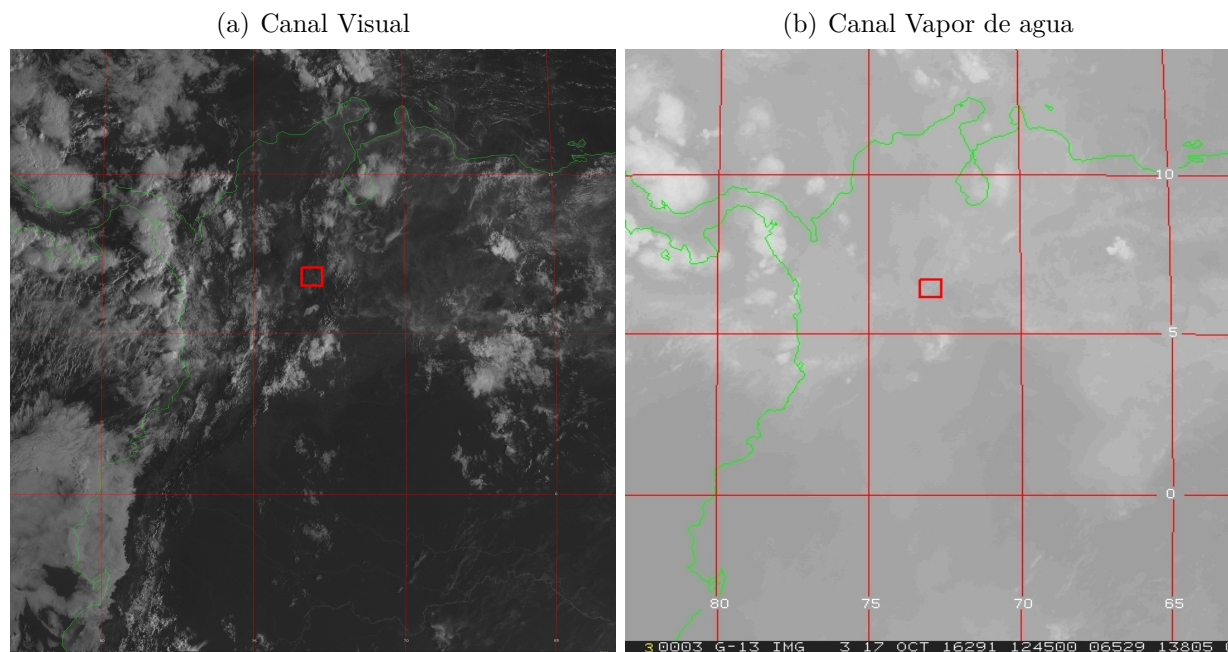


Figura E.27: Imágenes de satélite canal visible y vapor de agua para el caso 8, tomadas a bordo del satélite GOES-13.

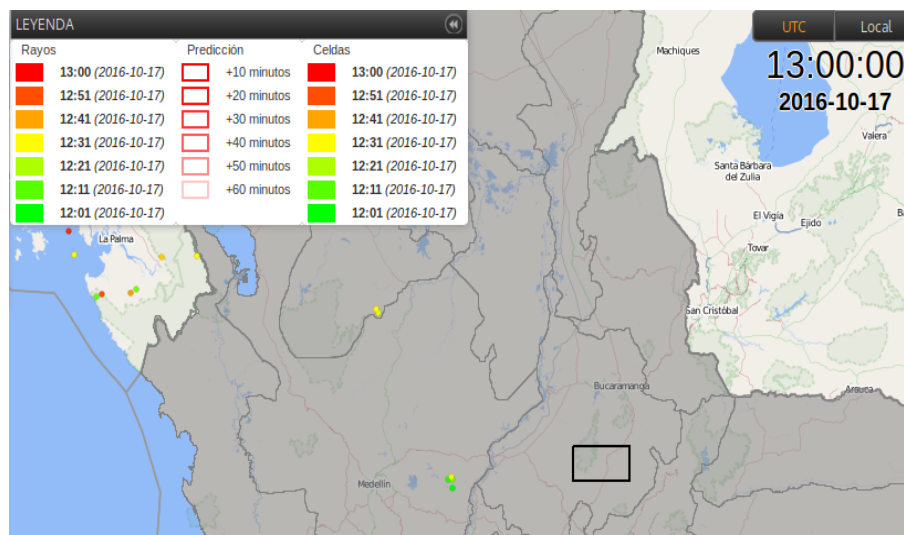


Figura E.28: Presencia de rayos (puntos) y tendencia de movimiento de celdas (conjunto de rayos demarcado) de acuerdo al sistema LINET (<https://linetview.nowcast.de/linetview/pages/index.html>) para el caso 8. Las predicciones de tendencia están hechas a partir de la ultima hora registrada y son válidos para tiempos desde 10 minutos hasta 60 minutos después de la hora base.

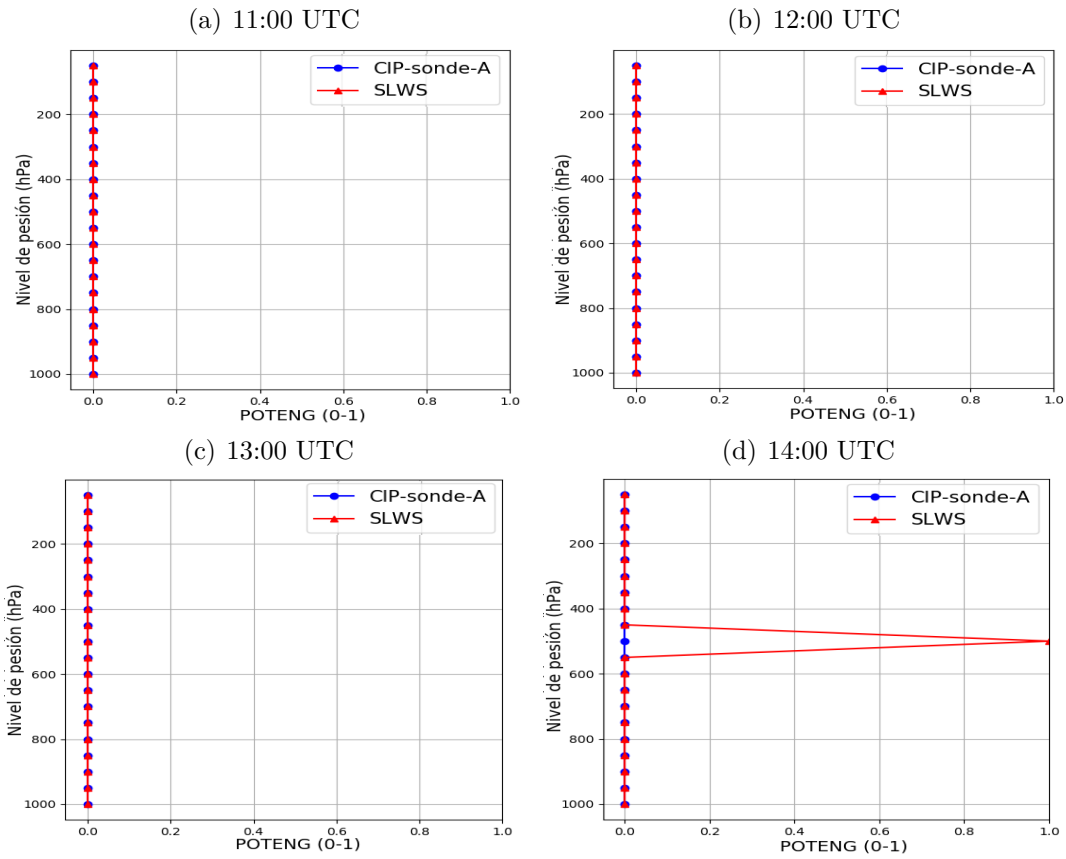


Figura E.29: Evolución de perfil de POTENG entre las 11:00 UTC y las 14:00 UTC del 17 de octubre de 2016 según los algoritmos SLWS y CIP-sonde-A aplicados a los datos de reanálisis ERA-5.

Apéndice F

Parametrizaciones de WRF utilizadas en el presente estudio

Tabla F.1: Parametrizaciones físicas WRF para este estudio.

Parametrización	Esquema
Micro Physics Options (mp_physics)	(8) Thompson Scheme
Radiation Longwave (ra_lw_physics)	(3) CAM Longwave Schemes
Radiation Shortwave (ra_sw_physics)	(2) Goddard Shortwave Scheme
Surface Layer Options (sf_sfclay_physics)	(2) Eta Similarity Scheme
Land Surface Options (sf_surface_physics)	(2) Unified Noah Land Surface Model
Planetary Boundary Layer Physics Options (bl_pbl_physics)	(2) Mellor–Yamada–Janjic Scheme (MYJ)
Cumulus Parameterization Options (cu_physics)	(1) Kain–Fritsch Scheme

F.0.1. Parametrizaciones en namelist.input

```
physics
mp_physics = 8,
ra_lw_physics = 3,
ra_sw_physics = 2,
radt = 9,
sf_sfclay_physics = 2,
sf_surface_physics = 2,
bl_pbl_physics = 2,
bldt = 0,
cu_physics = 1,
cudt = 5,
isfflx = 1,
ifsnow = 0,
icloud = 1,
surface_input_source = 1,
num_soil_layers = 4,
sf_urban_physics = 0,
```

```
dynamics
w_damping = 0,
diff_opt = 1,
km_opt = 4,
diff_6th_opt = 0,
diff_6th_factor = 0.12,
base_temp = 290.,
damp_opt = 0,
zdamp = 5000.,
dampcoef = 0.01,
khdif = 0,
kvdif = 0,
non_hydrostatic = .true.,
moist_adv_opt = 1,
scalar_adv_opt = 1,
```


Apéndice G

Mapas de Precipitación Ocumulada Mediante Simulaciones WRF para Cada Caso

Caso 1

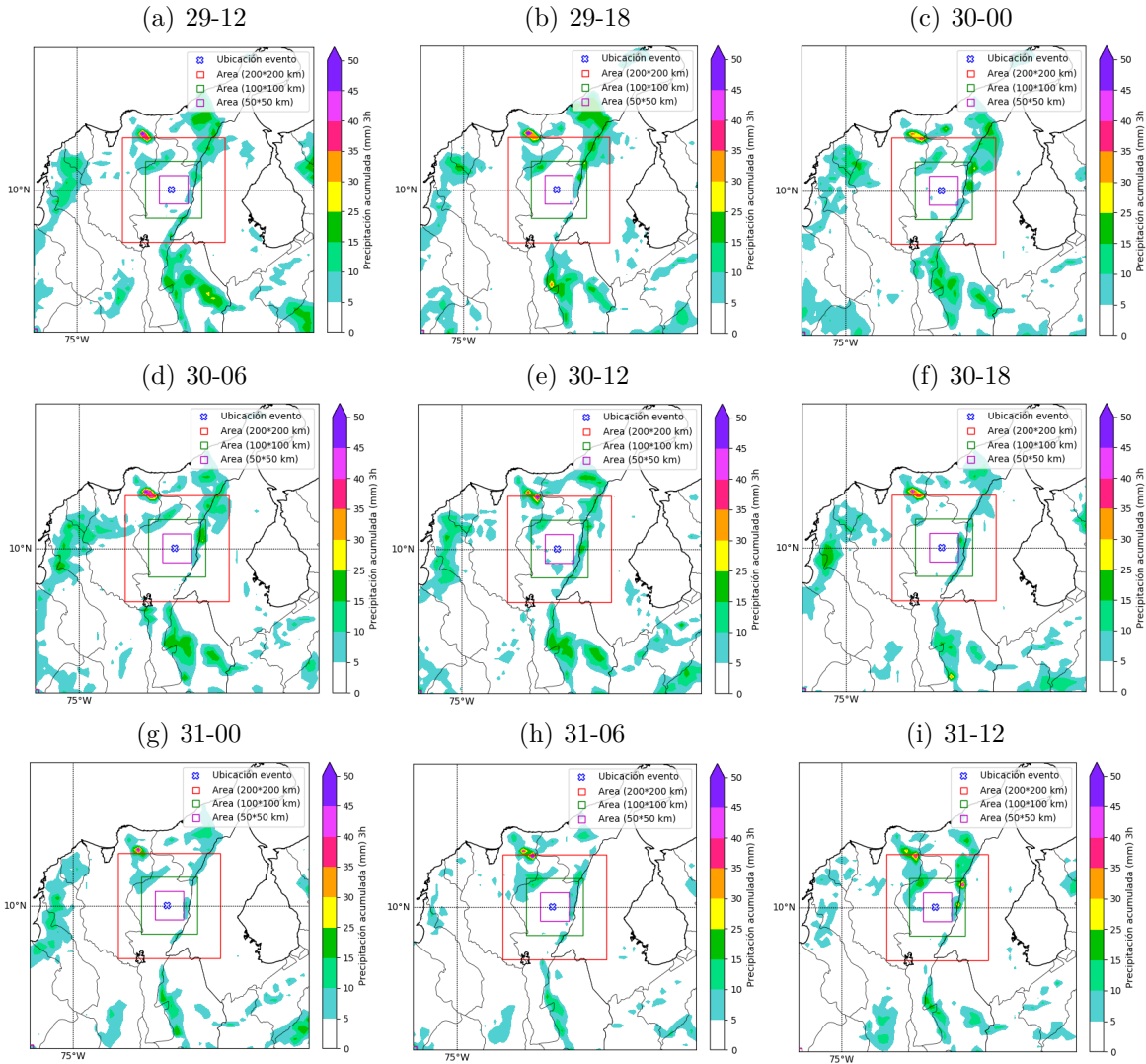


Figura G.1: Resultados de simulación WRF de precipitación acumulada para 3 (de 19:00 a 21:00) horas caso 1.

Caso 2

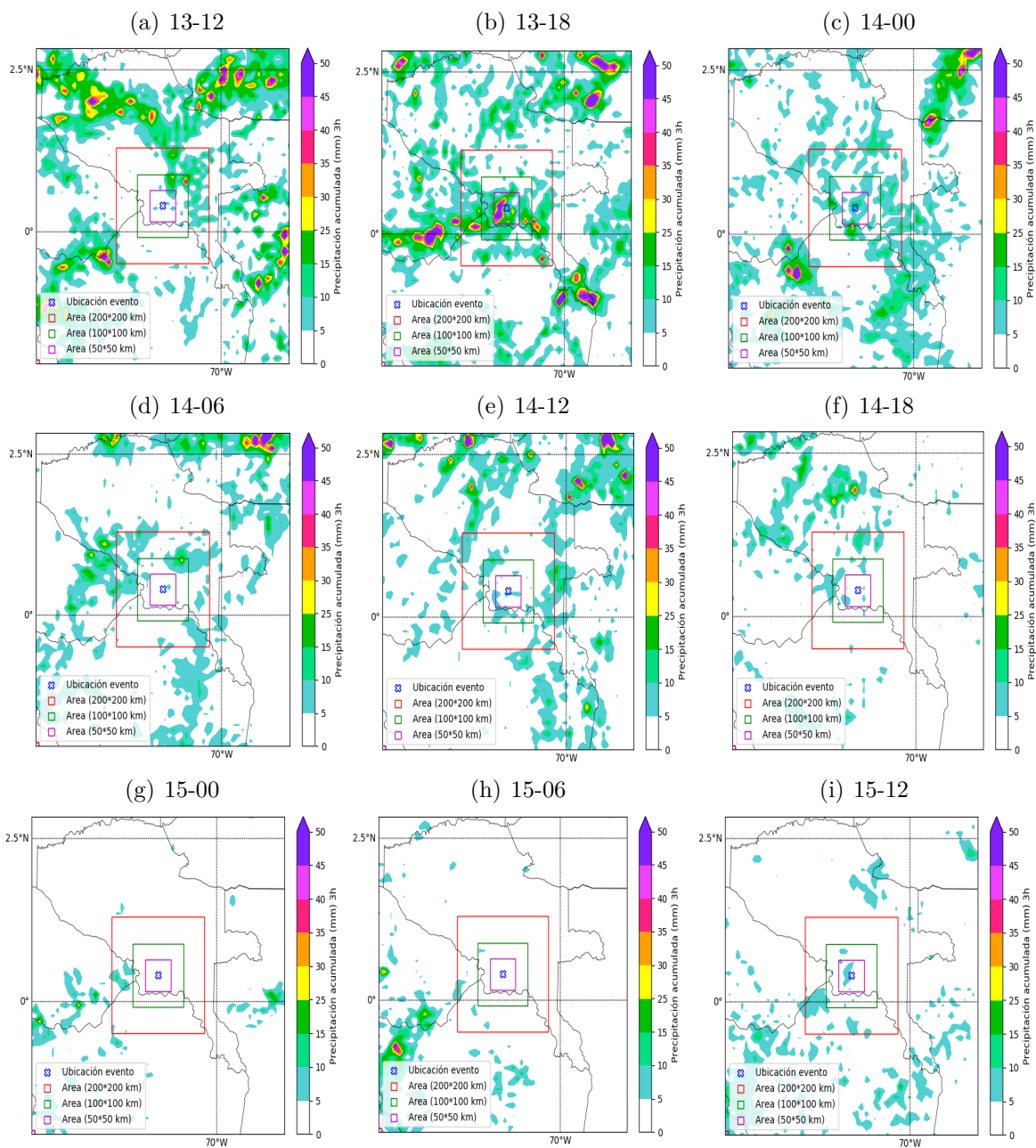


Figura G.2: Resultados de simulación WRF de precipitación acumulada para 3 (de 19:00 a 21:00) horas caso 2.

Caso 3

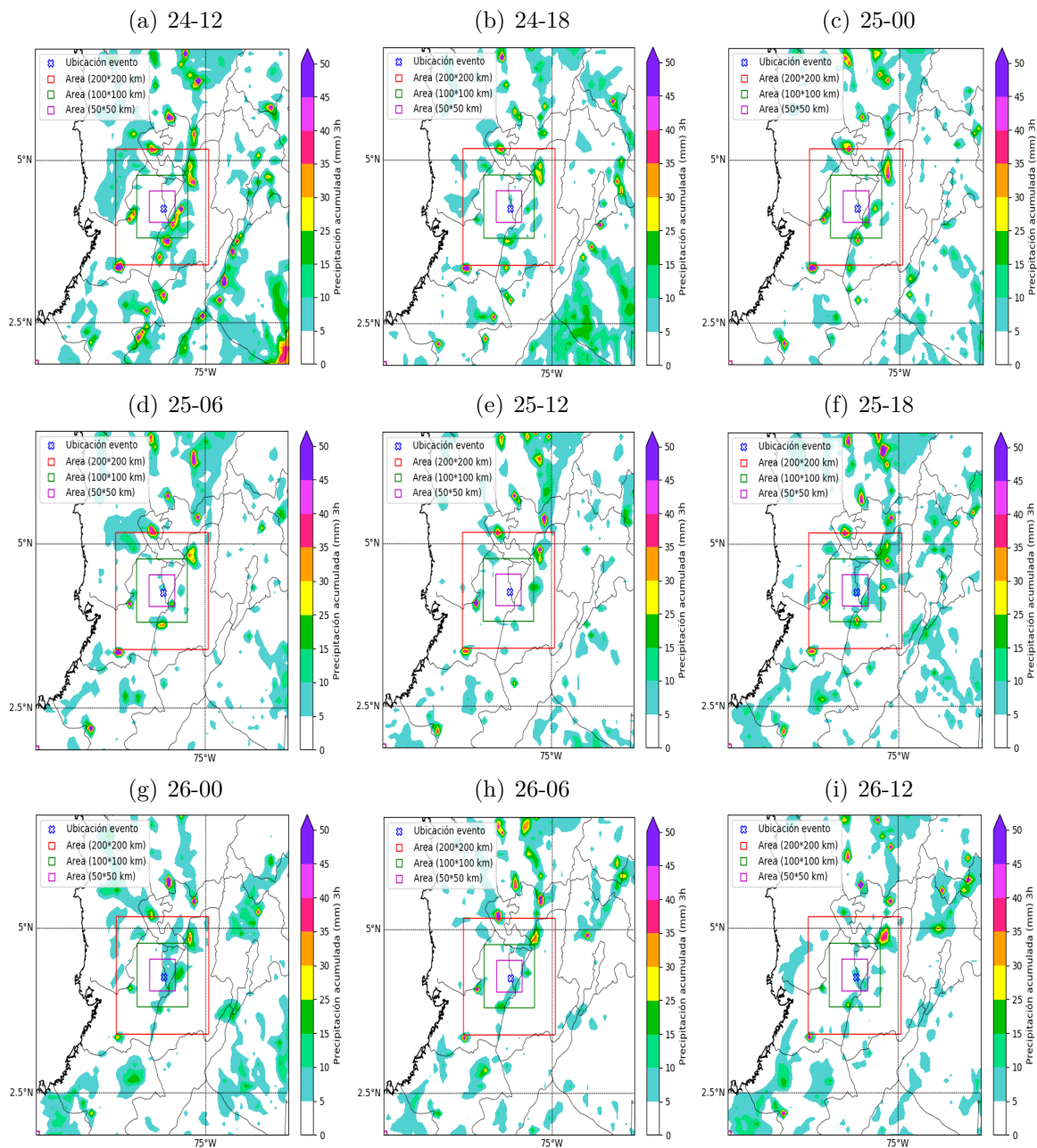


Figura G.3: Resultados de simulación WRF de precipitación acumulada para 3 (de 19:00 a 21:00) horas caso 3.

Caso 4

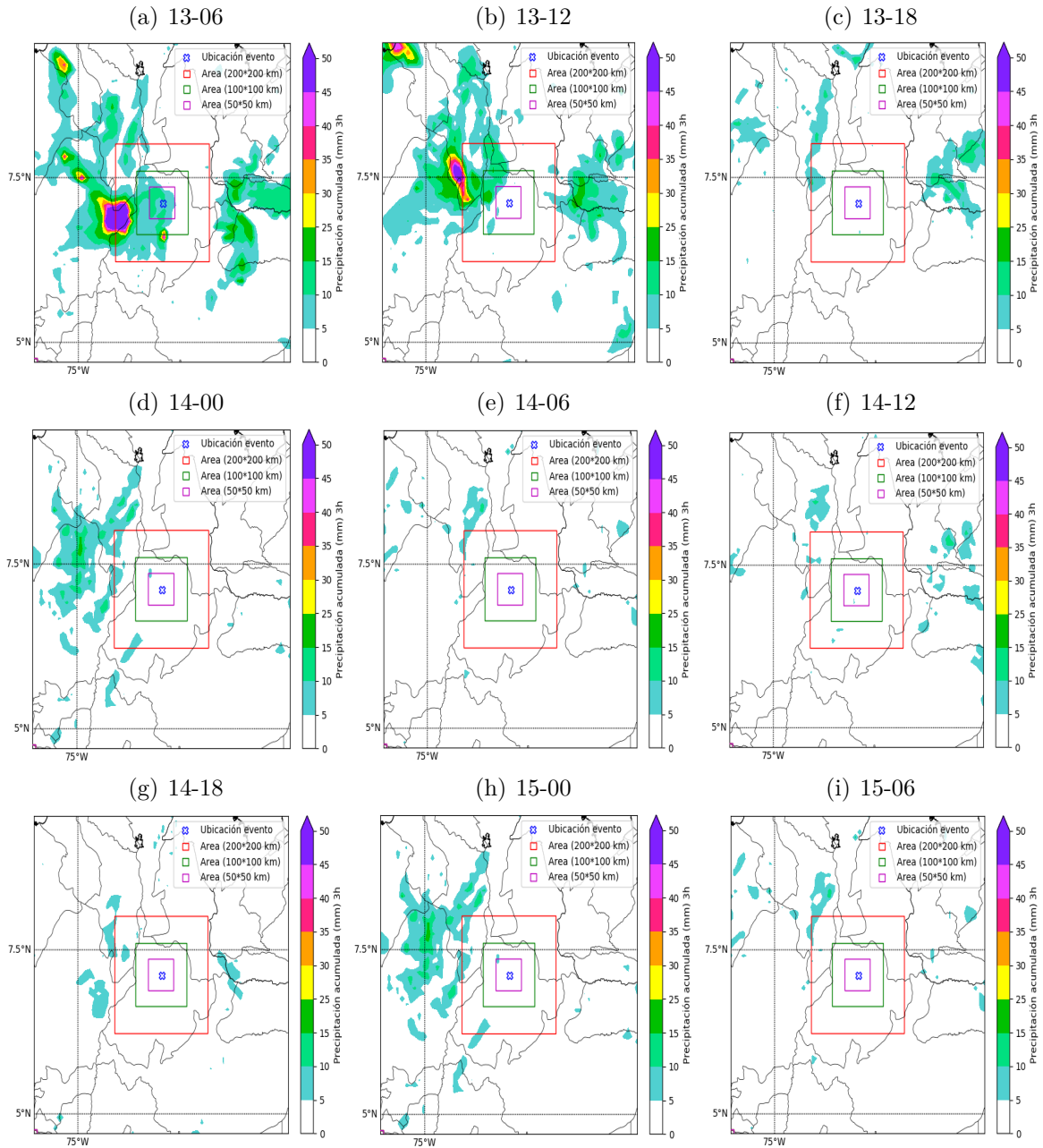


Figura G.4: Resultados de simulación WRF de precipitación acumulada para 3 (de 19:00 a 21:00) horas caso 4.

Caso 5

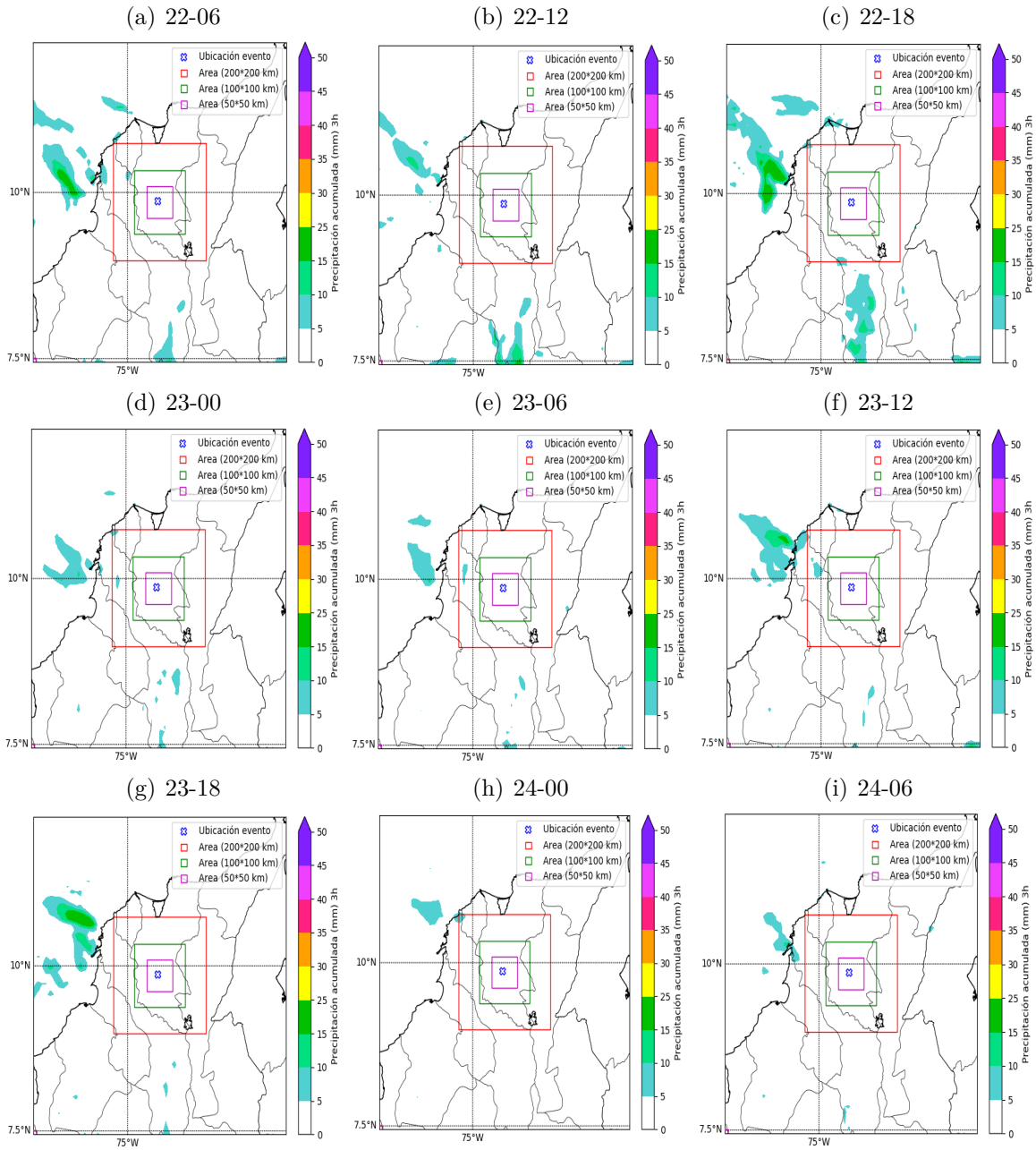


Figura G.5: Resultados de simulación WRF de precipitación acumulada para 3 (de 19:00 a 21:00) horas caso 5.

Caso 6

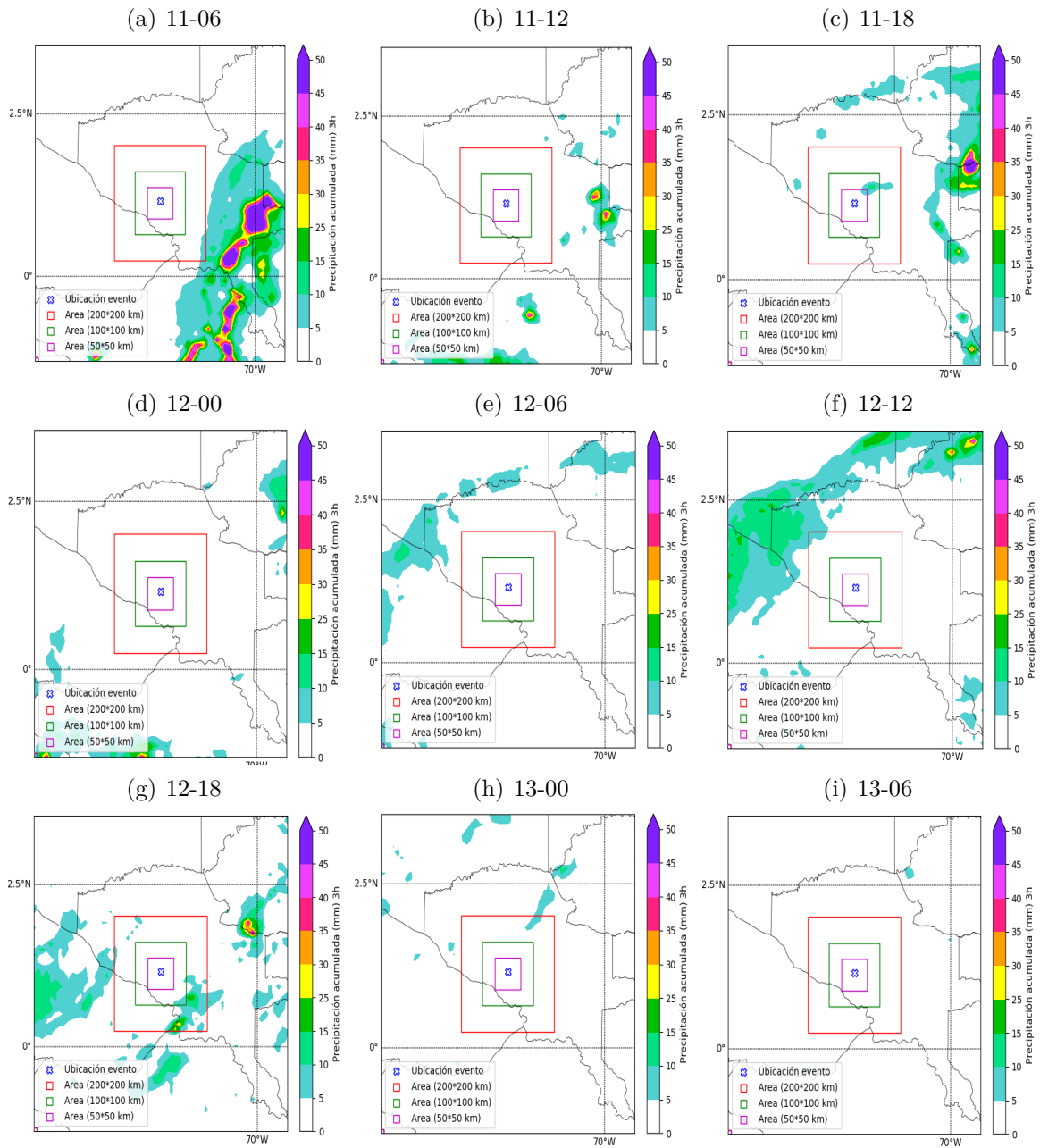


Figura G.6: Resultados de simulación WRF de precipitación acumulada para 3 (de 19:00 a 21:00) horas caso 6.

Caso 7

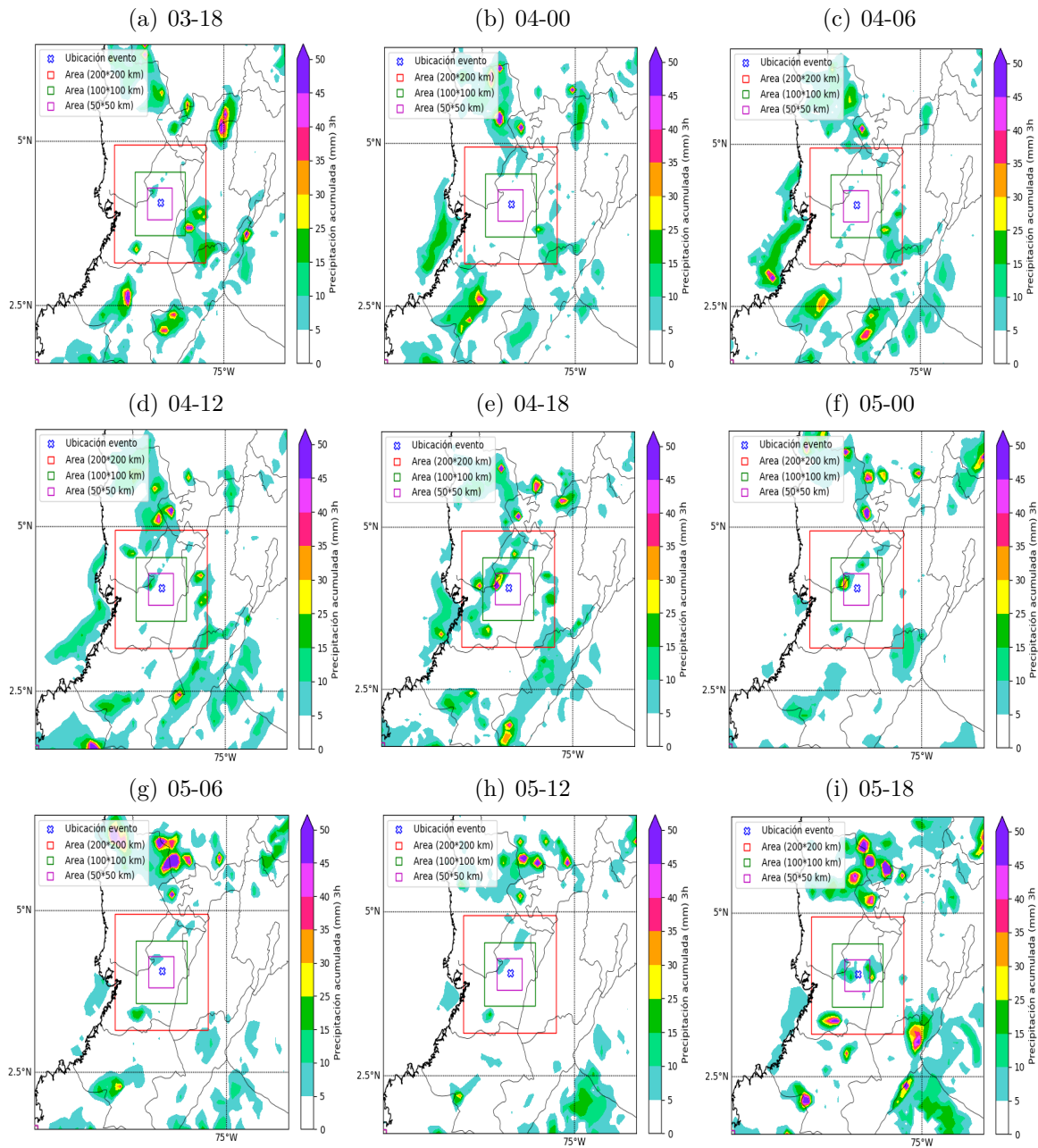


Figura G.7: Resultados de simulación WRF de precipitación acumulada para 3 (de 19:00 a 21:00) horas caso 7.

Caso 8

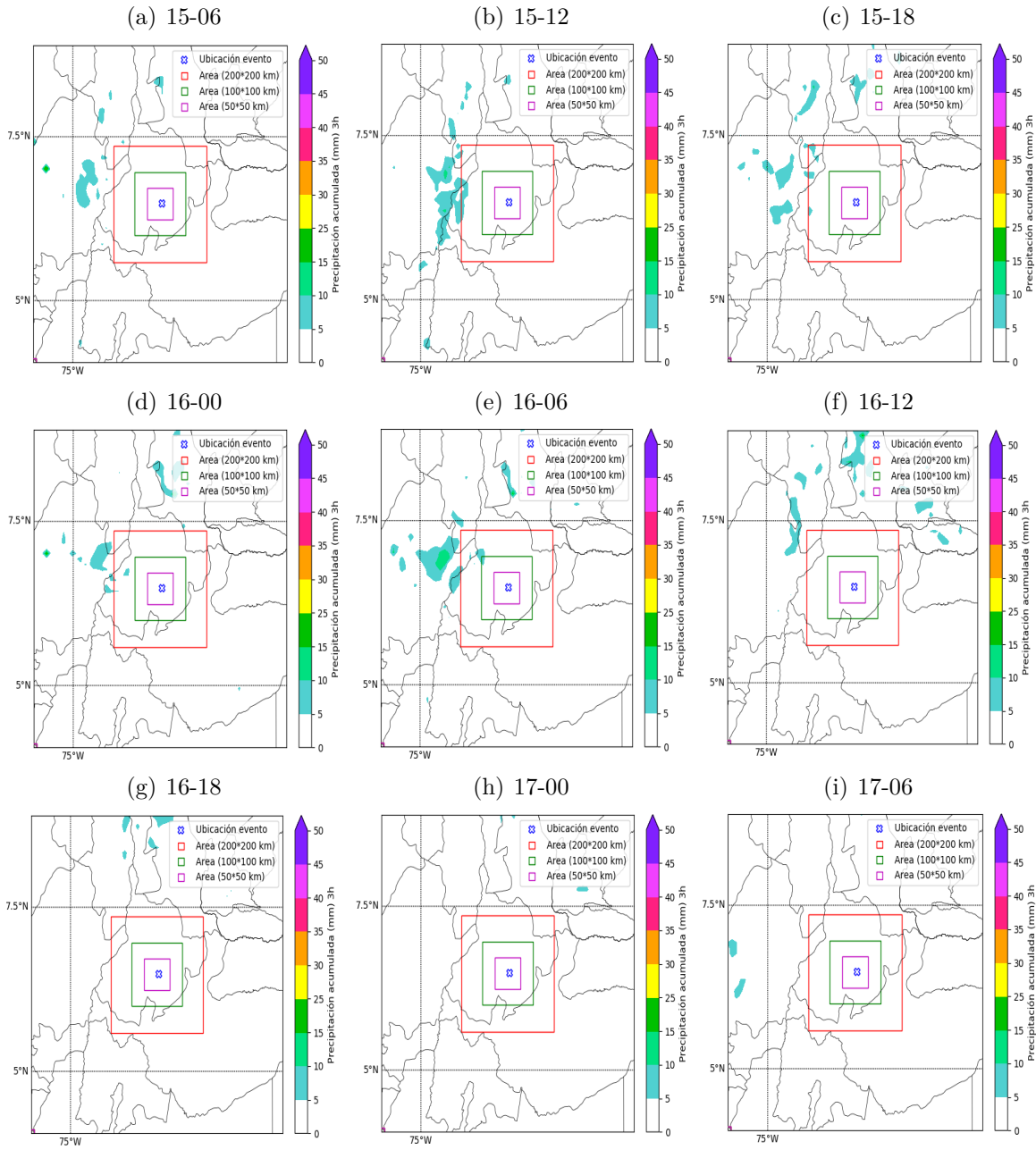


Figura G.8: Resultados de simulación WRF de precipitación acumulada para 3 (de 19:00 a 21:00) horas caso 8.

Apéndice H

Mapas de POTENG Algoritmos CIP-sonde-A Y SLWS

CIP-sonde-A: Caso 1

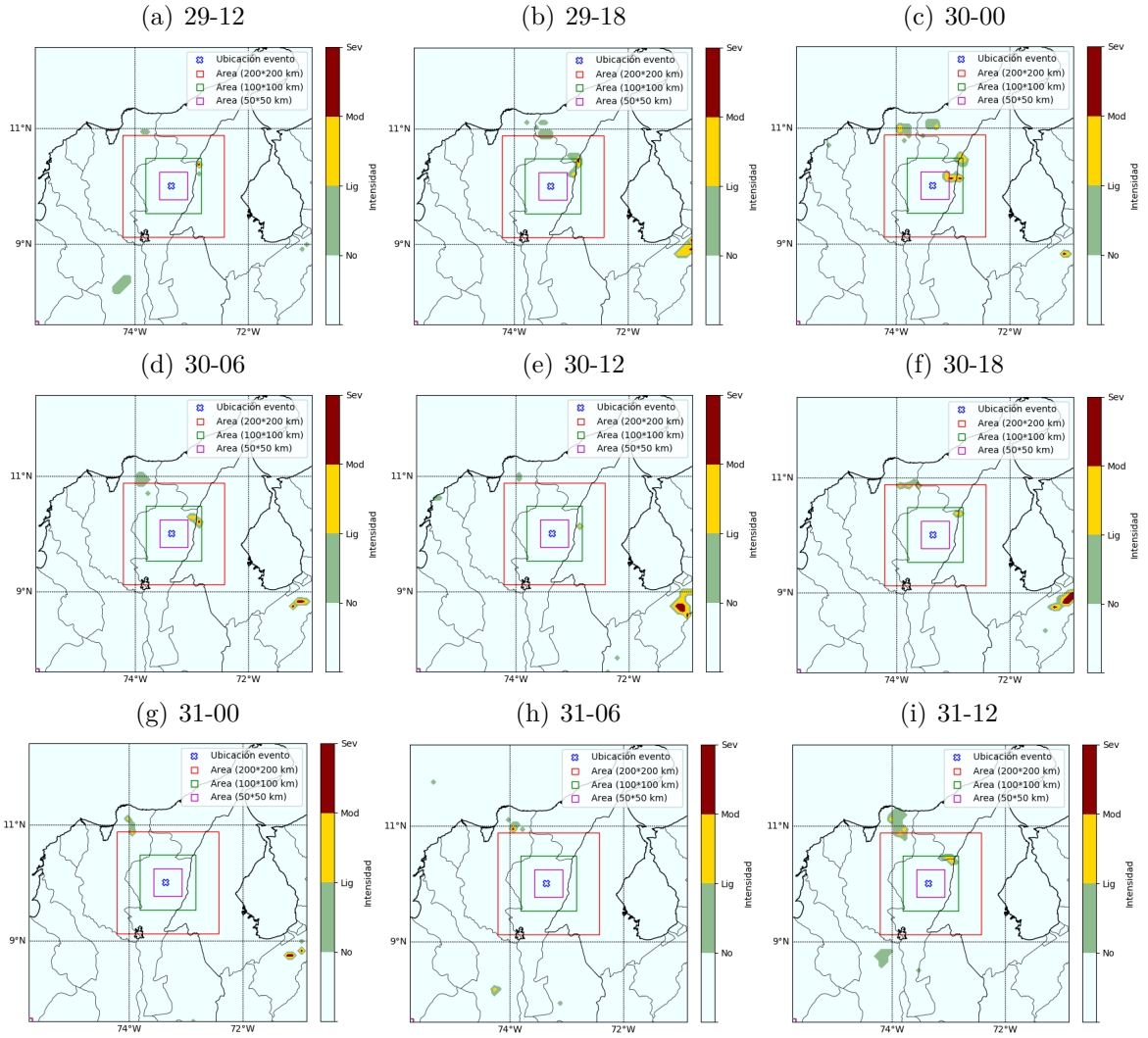


Figura H.1: Resultados de algoritmo CIP-sonde-A para caso 1.

Caso 2

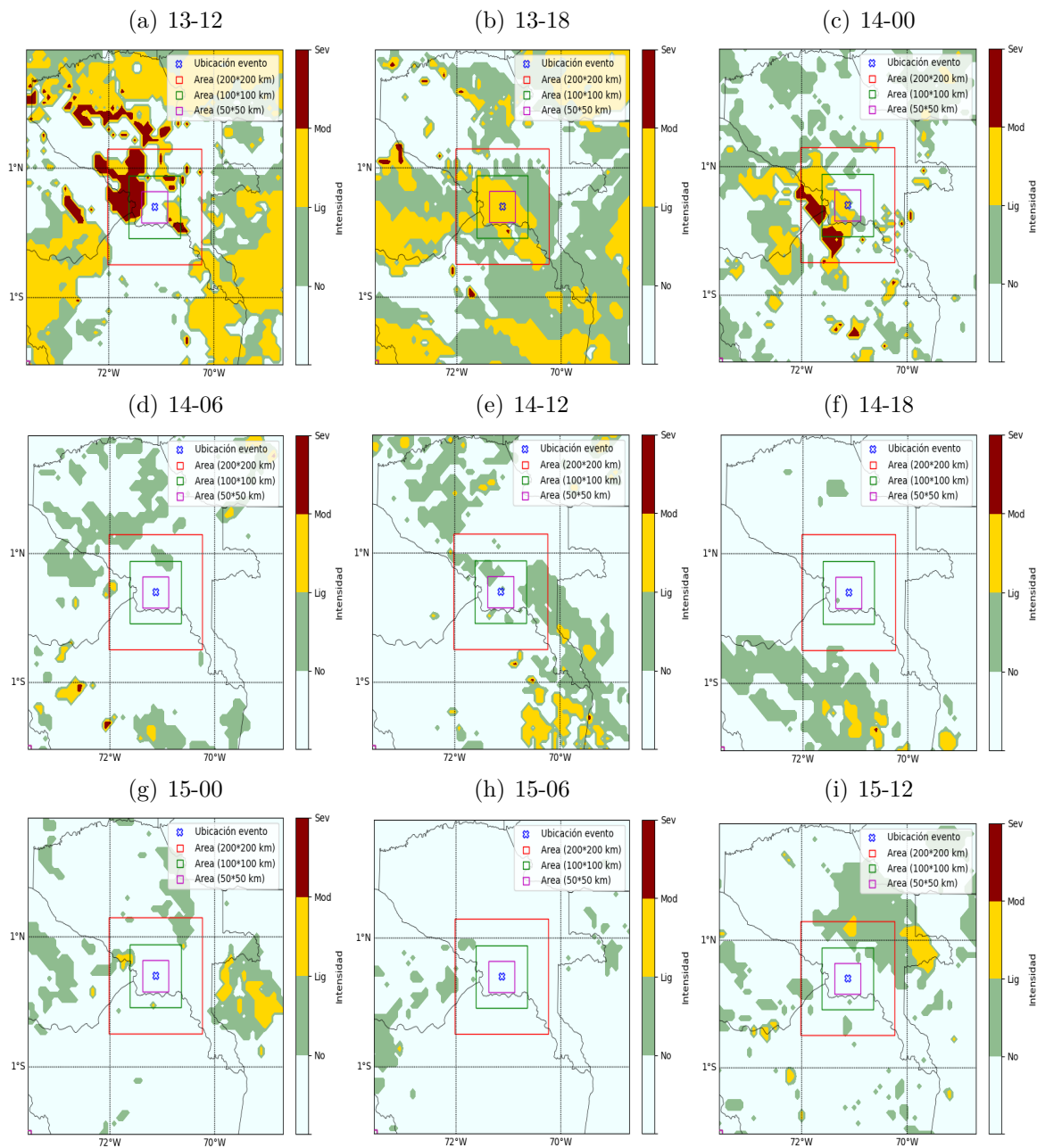


Figura H.2: Resultados de algoritmo CIP-sonde-A para caso 2.

Caso 3

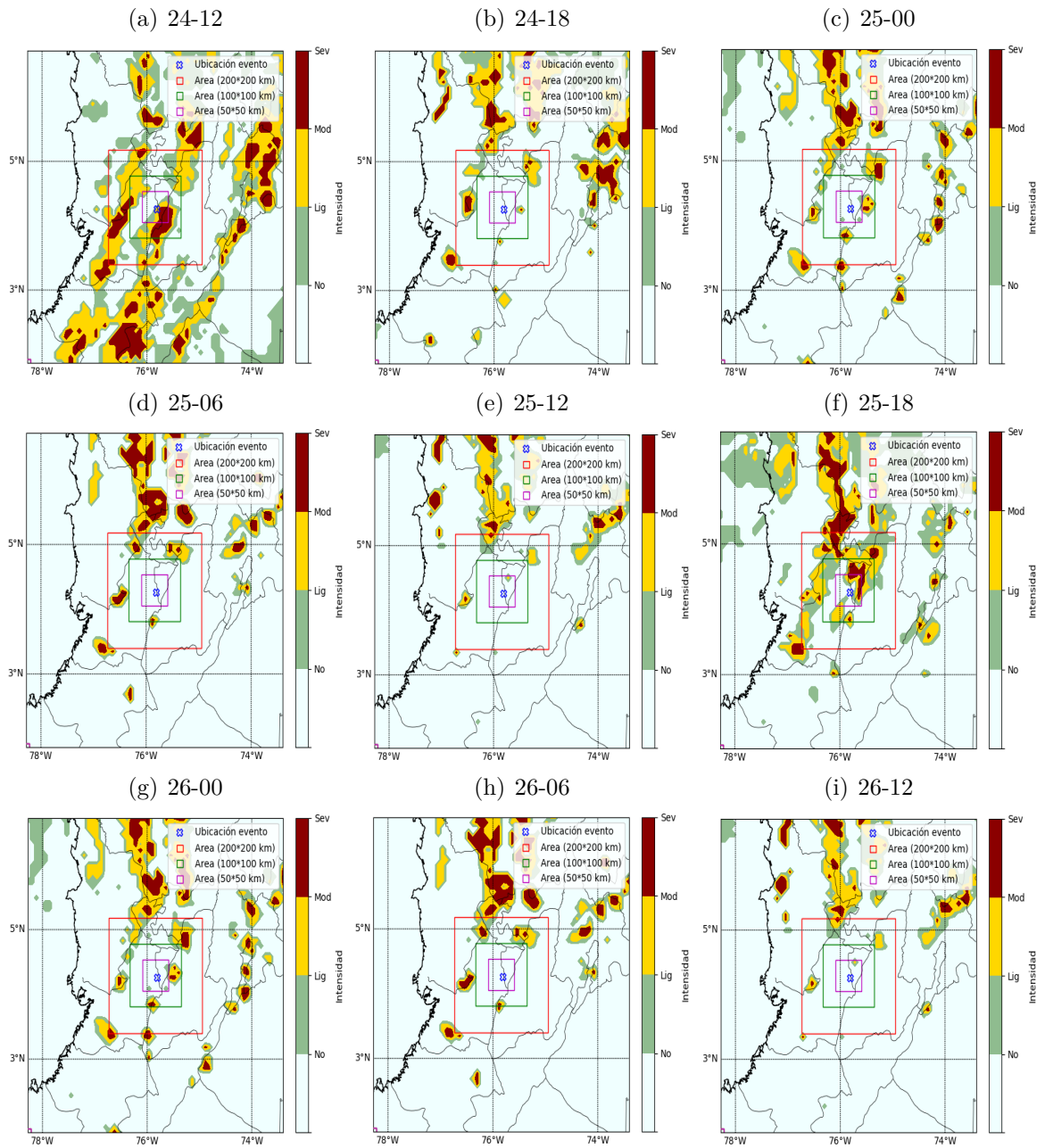


Figura H.3: Resultados de algoritmo CIP-sonde-A para caso 3.

Caso 4

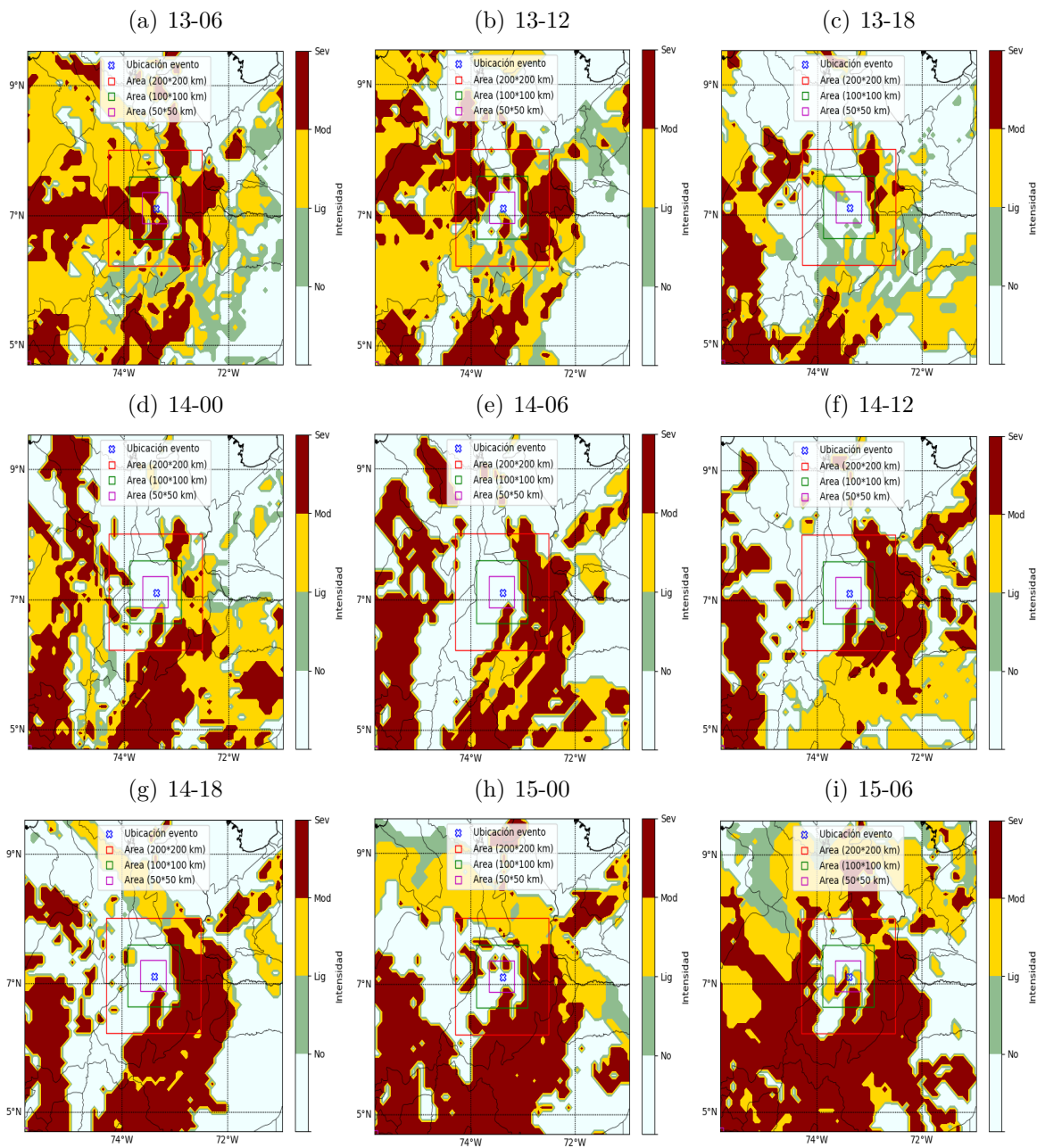


Figura H.4: Resultados de algoritmo CIP-sonde-A para caso 4.

Caso 5

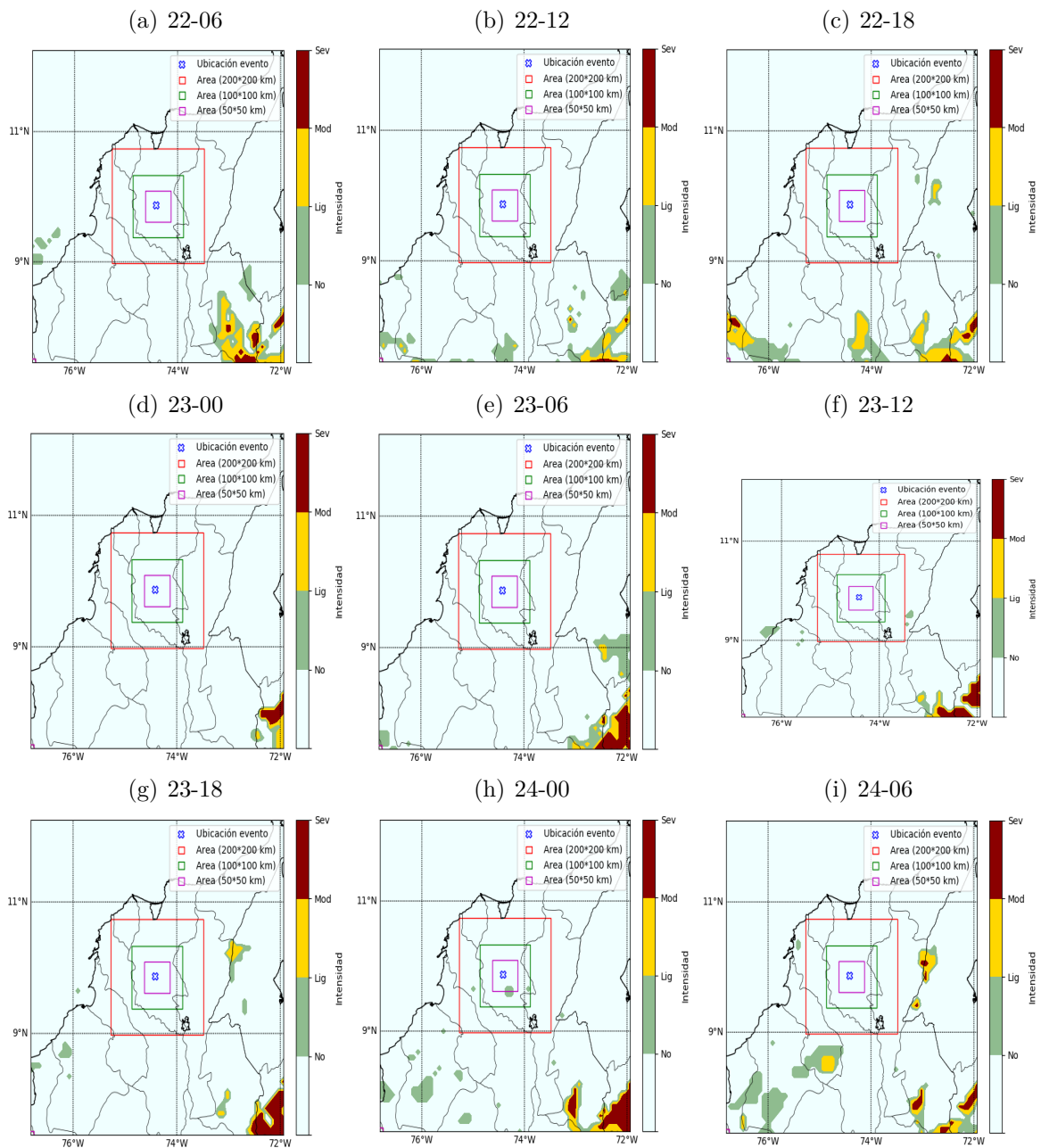


Figura H.5: Resultados de algoritmo CIP-sonde-A para caso 5.

Caso 6

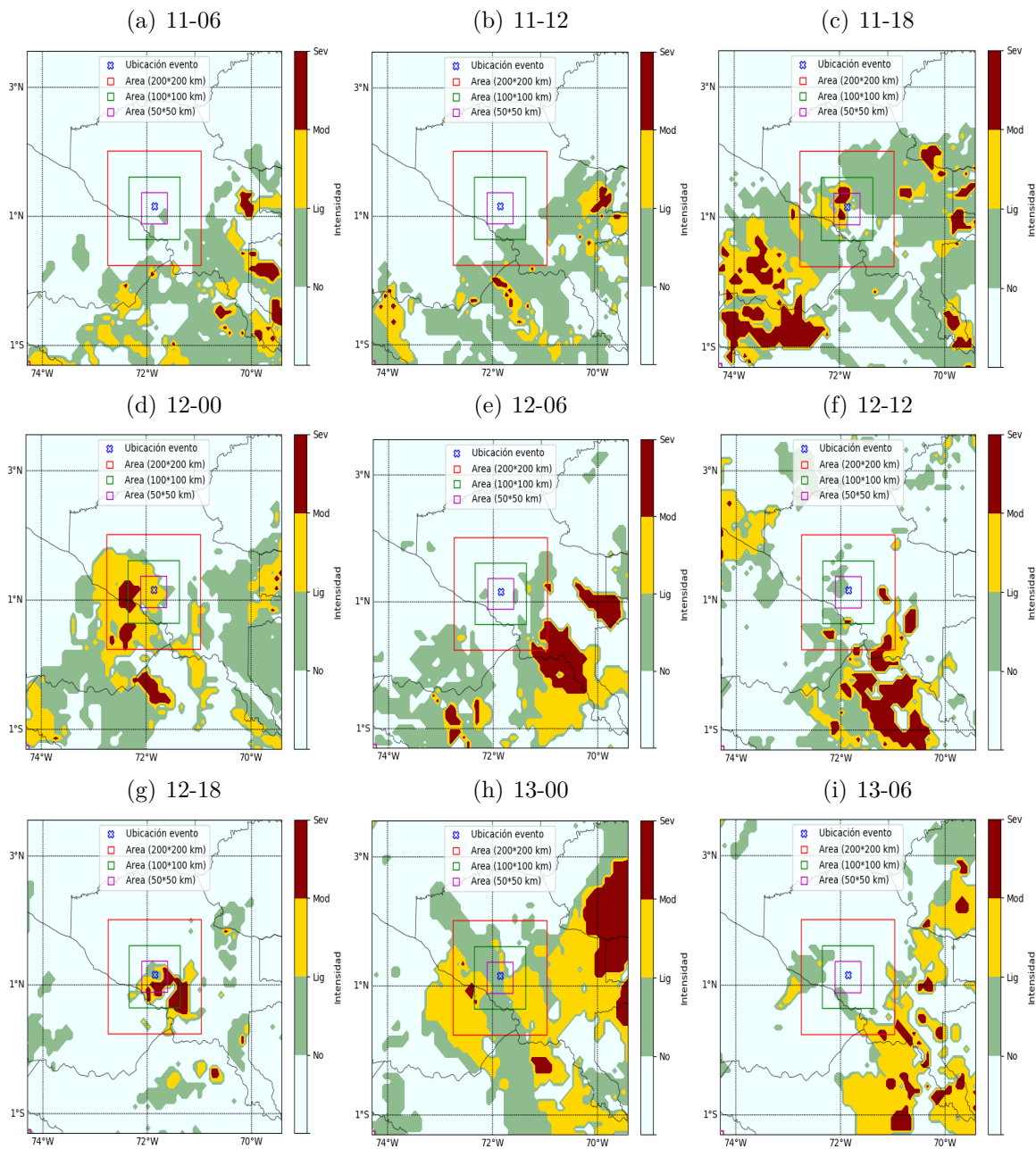


Figura H.6: Resultados de algoritmo CIP-sonde-A para caso 6.

Caso 7

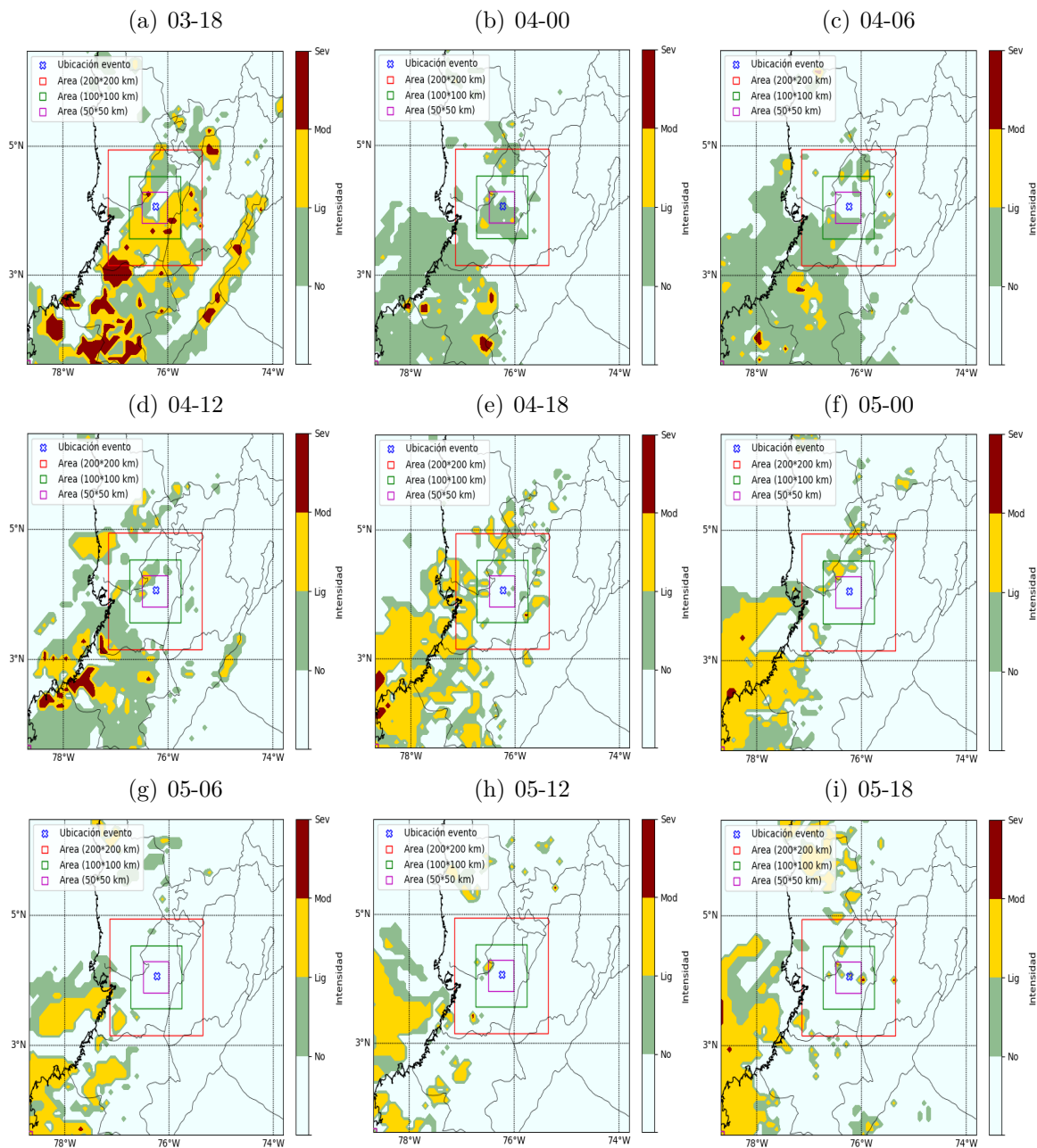


Figura H.7: Resultados de algoritmo CIP-sonde-A para caso 7.

Caso 8

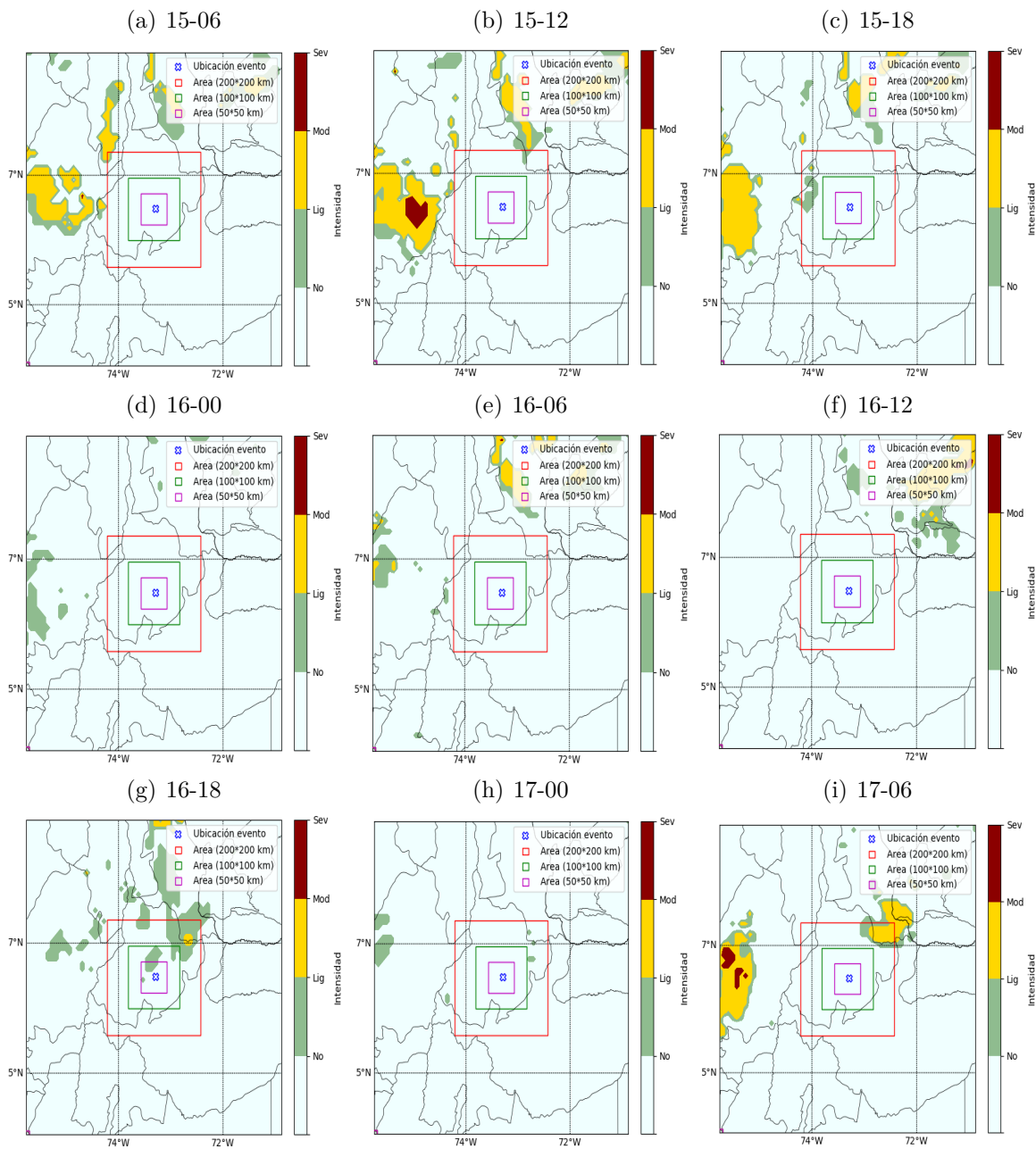


Figura H.8: Resultados de algoritmo CIP-sonde-A para caso 8.

SLWS: Caso 1

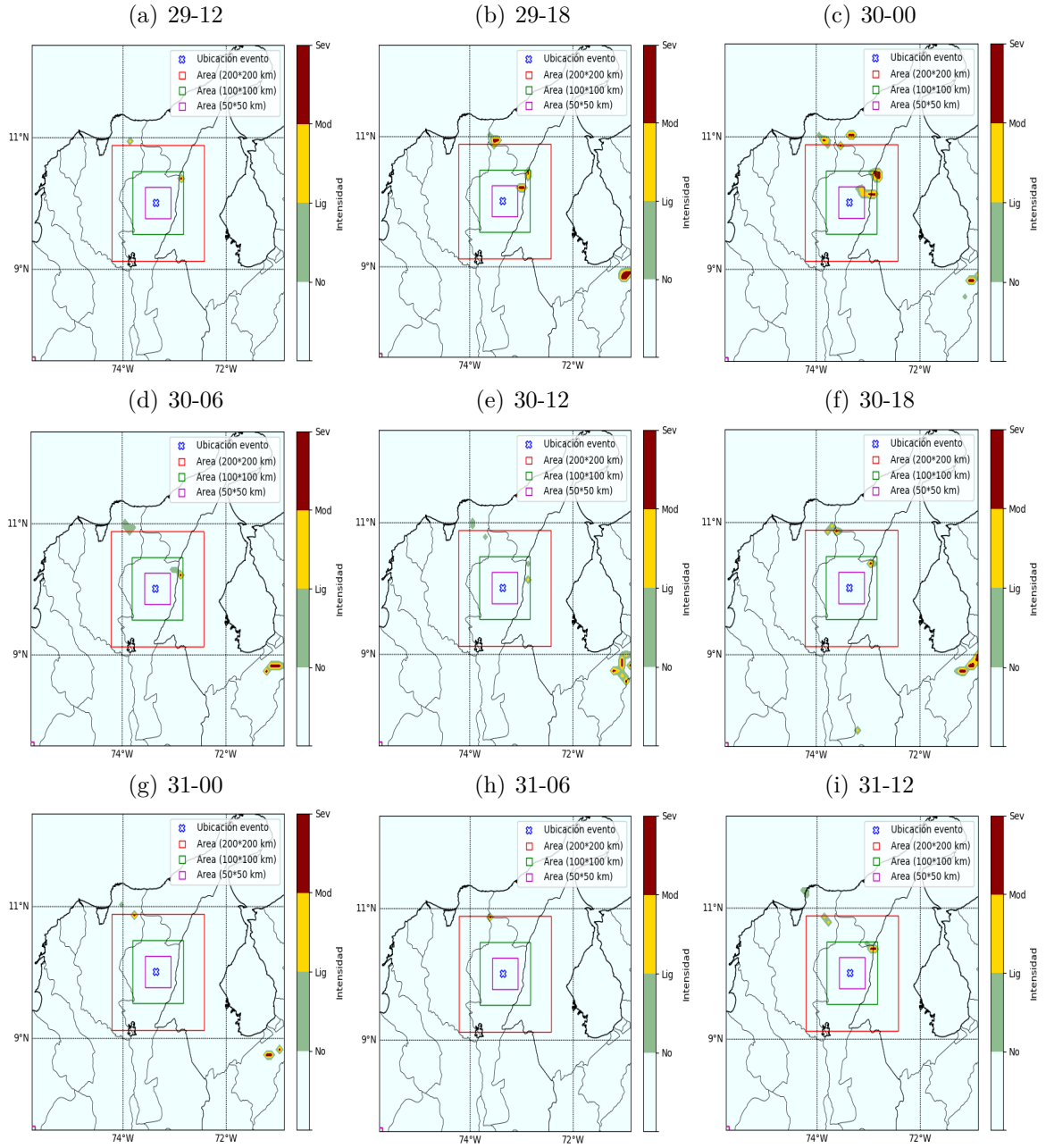


Figura H.9: Resultados de algoritmo SLWS para caso 1.

Caso 2

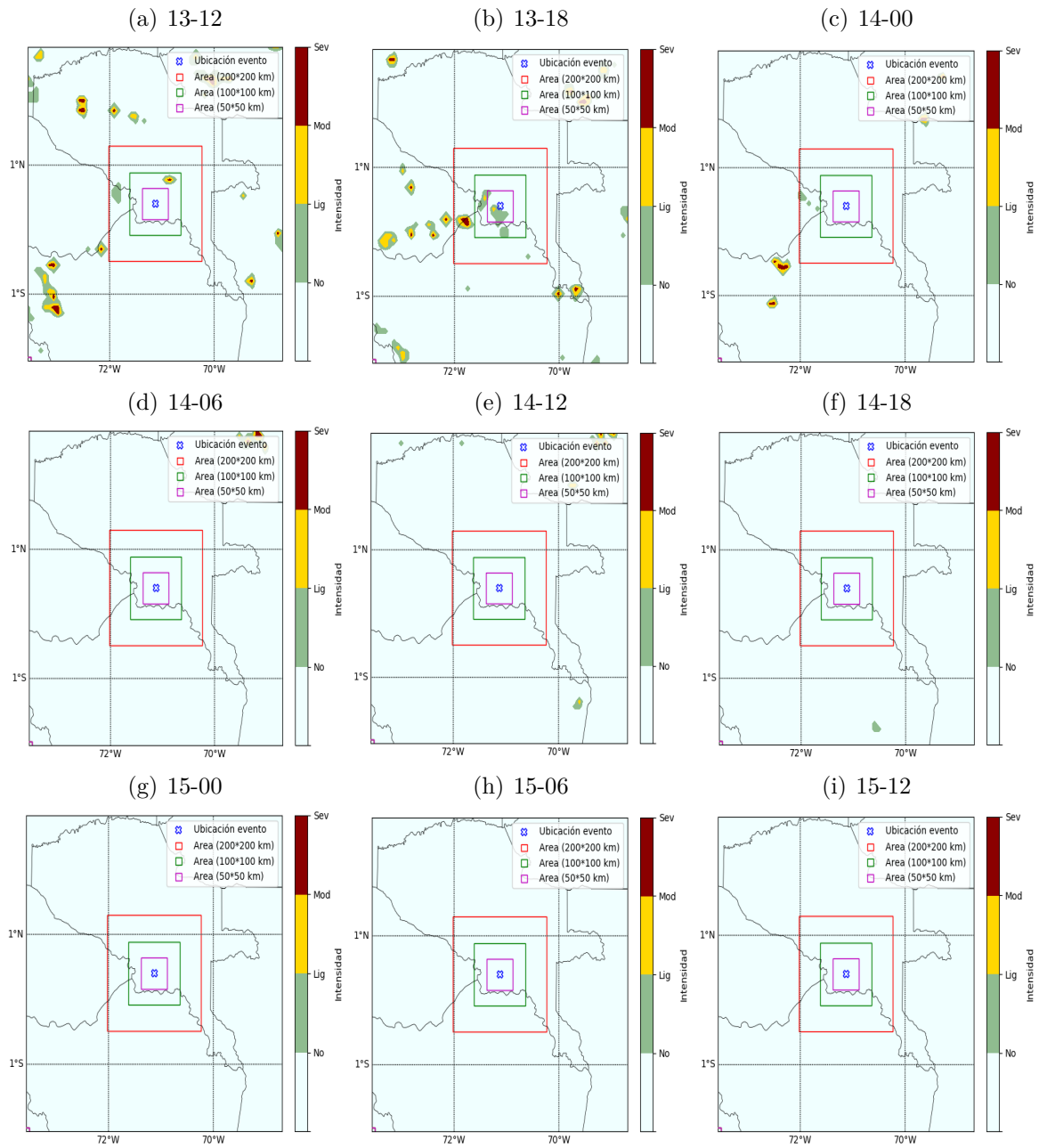


Figura H.10: Resultados de algoritmo SLWS para caso 2.

Caso 3

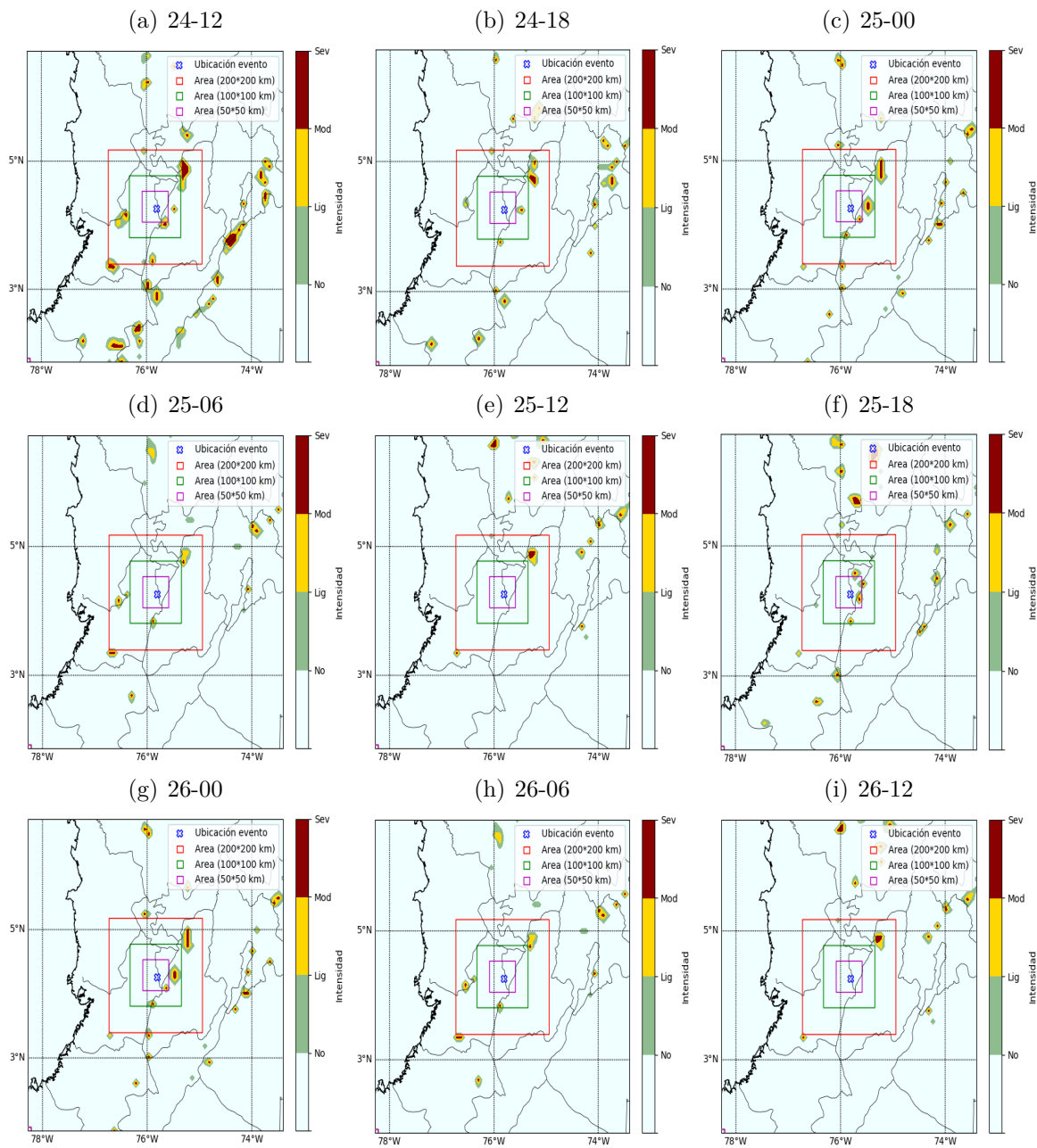


Figura H.11: Resultados de algoritmo SLWS para caso 3.

Caso 4

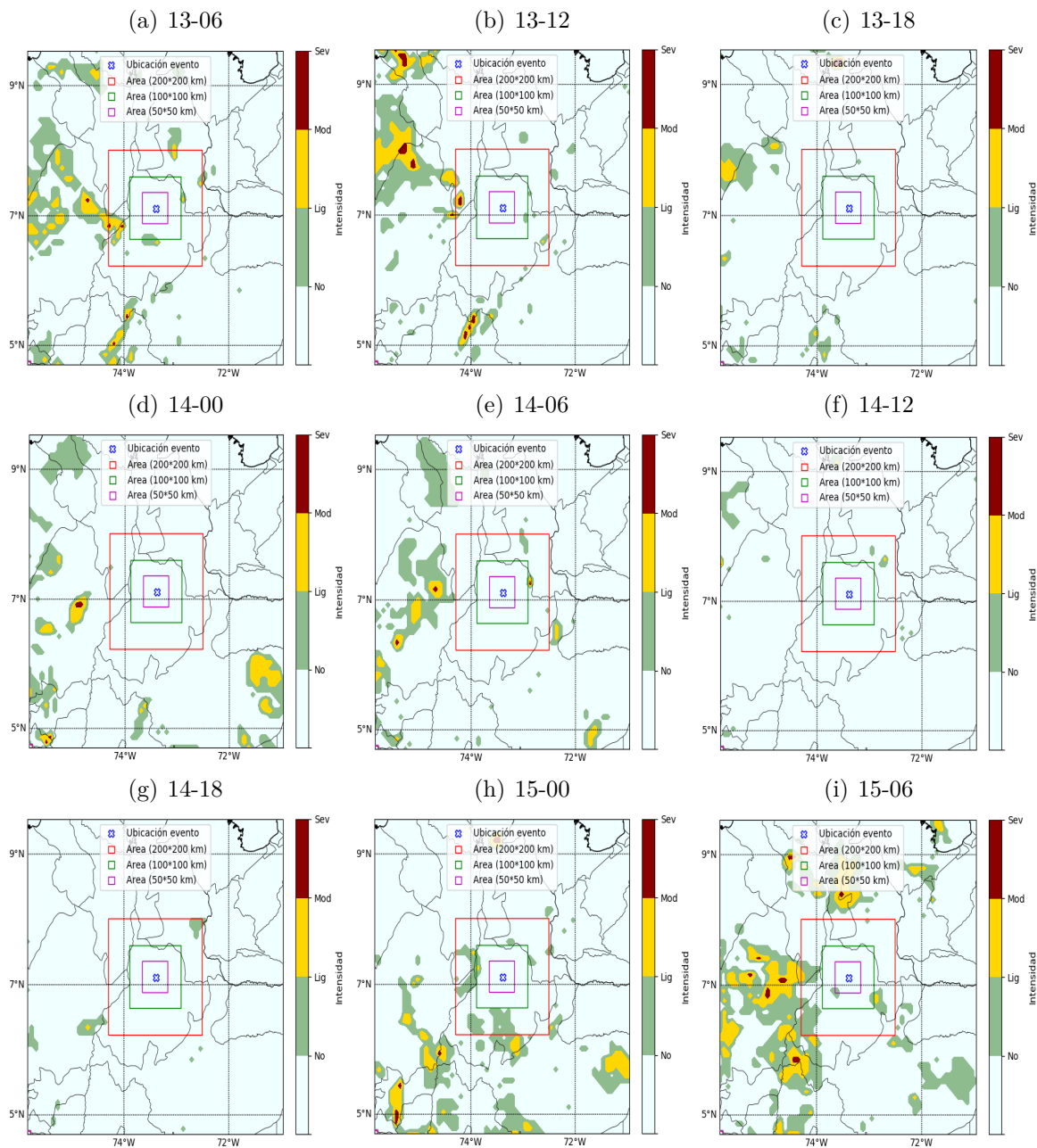


Figura H.12: Resultados de algoritmo CIP-sonde-A para caso 4.

Caso 5

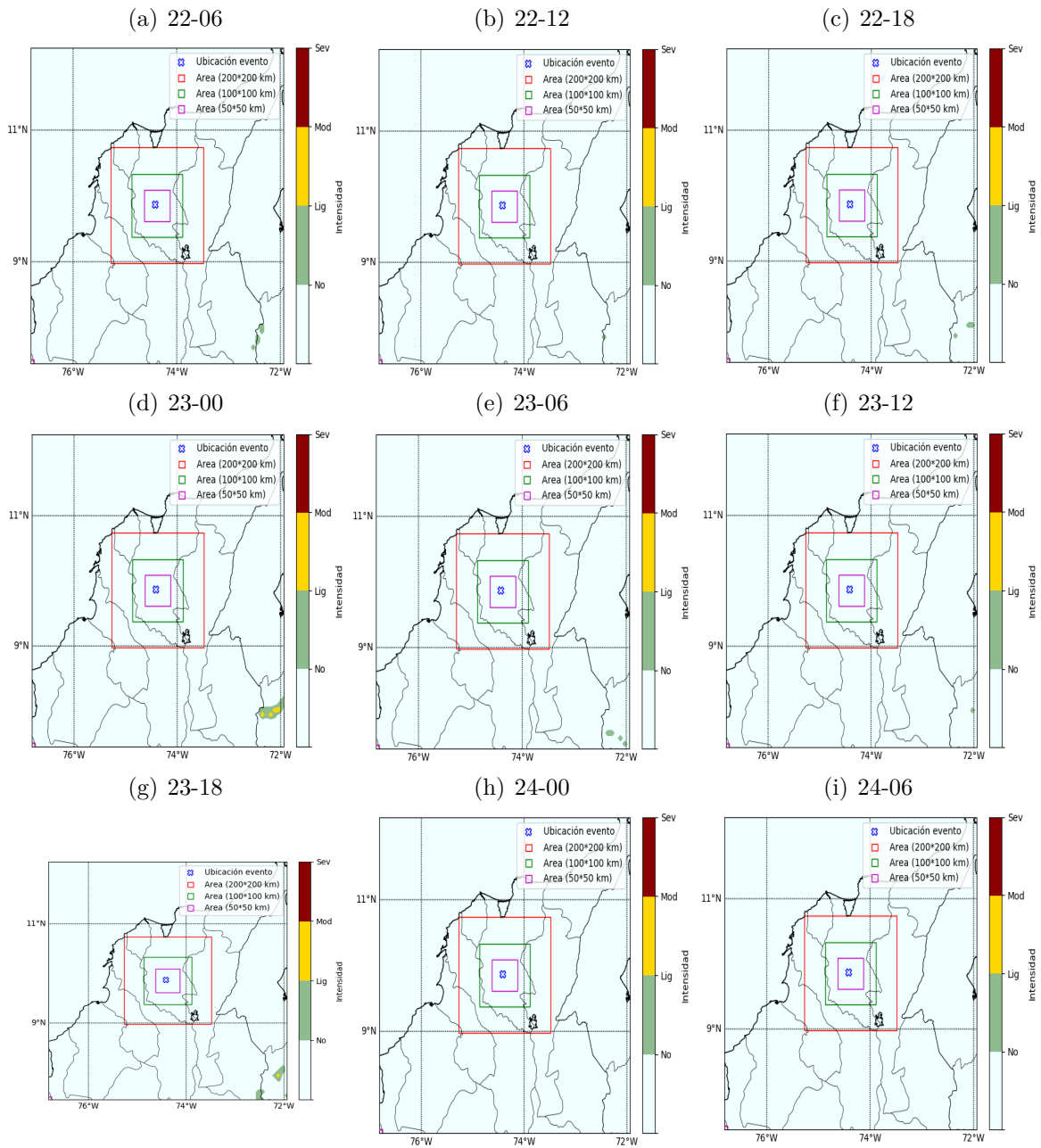


Figura H.13: Resultados de algoritmo SLWS para caso 5.

Caso 6

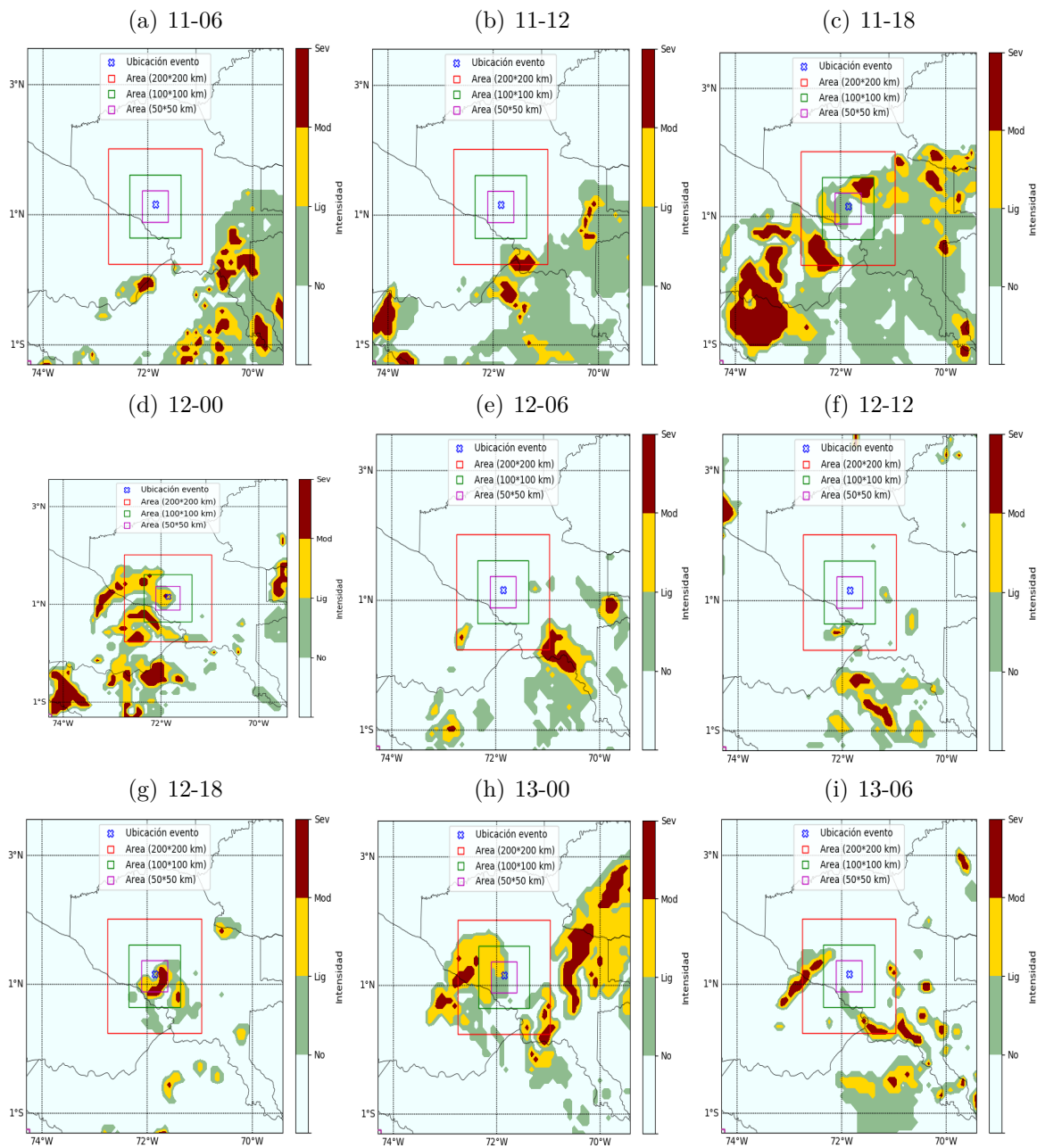


Figura H.14: Resultados de algoritmo SLWS para caso 6.

Caso 7

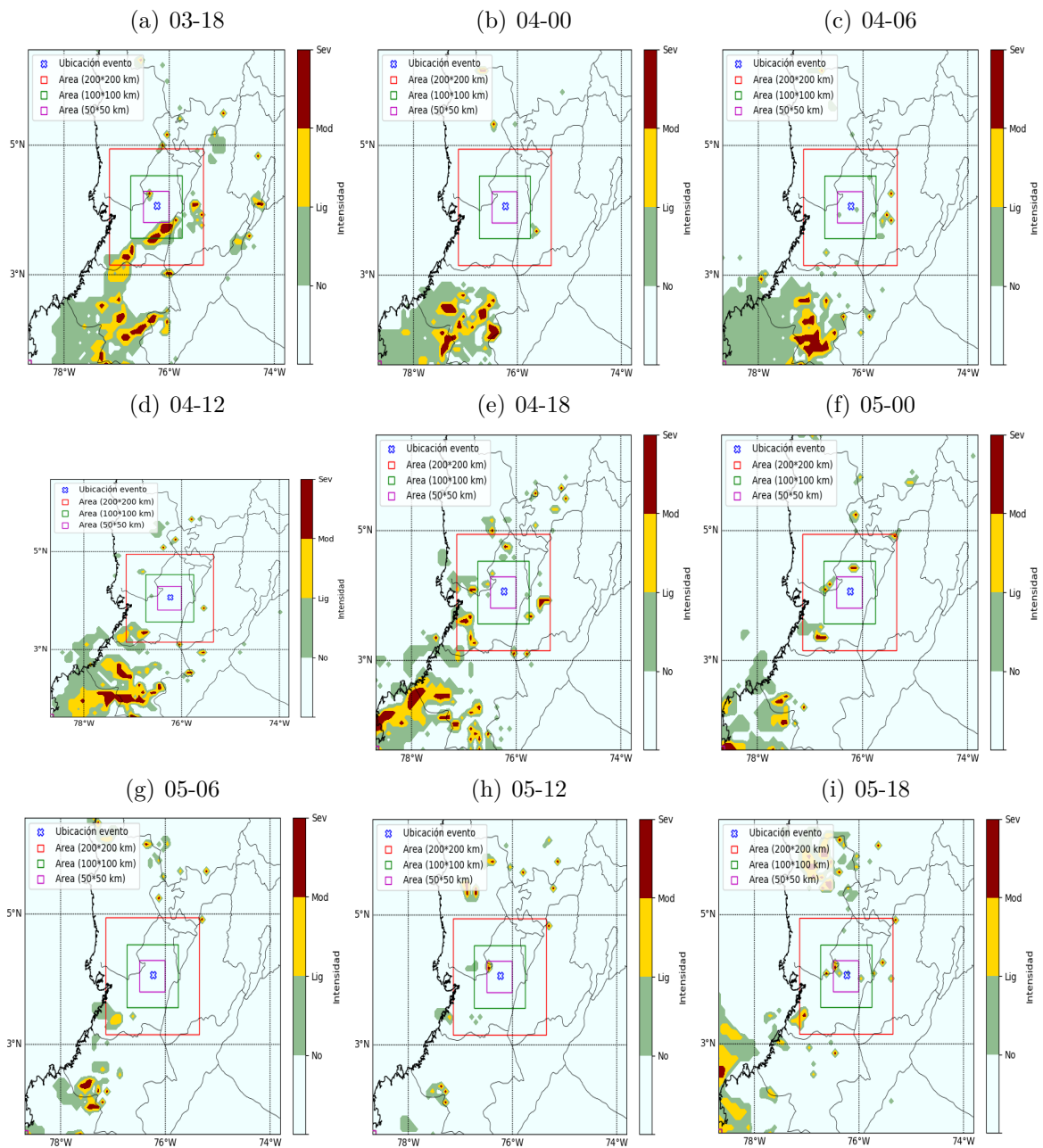


Figura H.15: Resultados de algoritmo SLWS para caso 7.

Caso 8

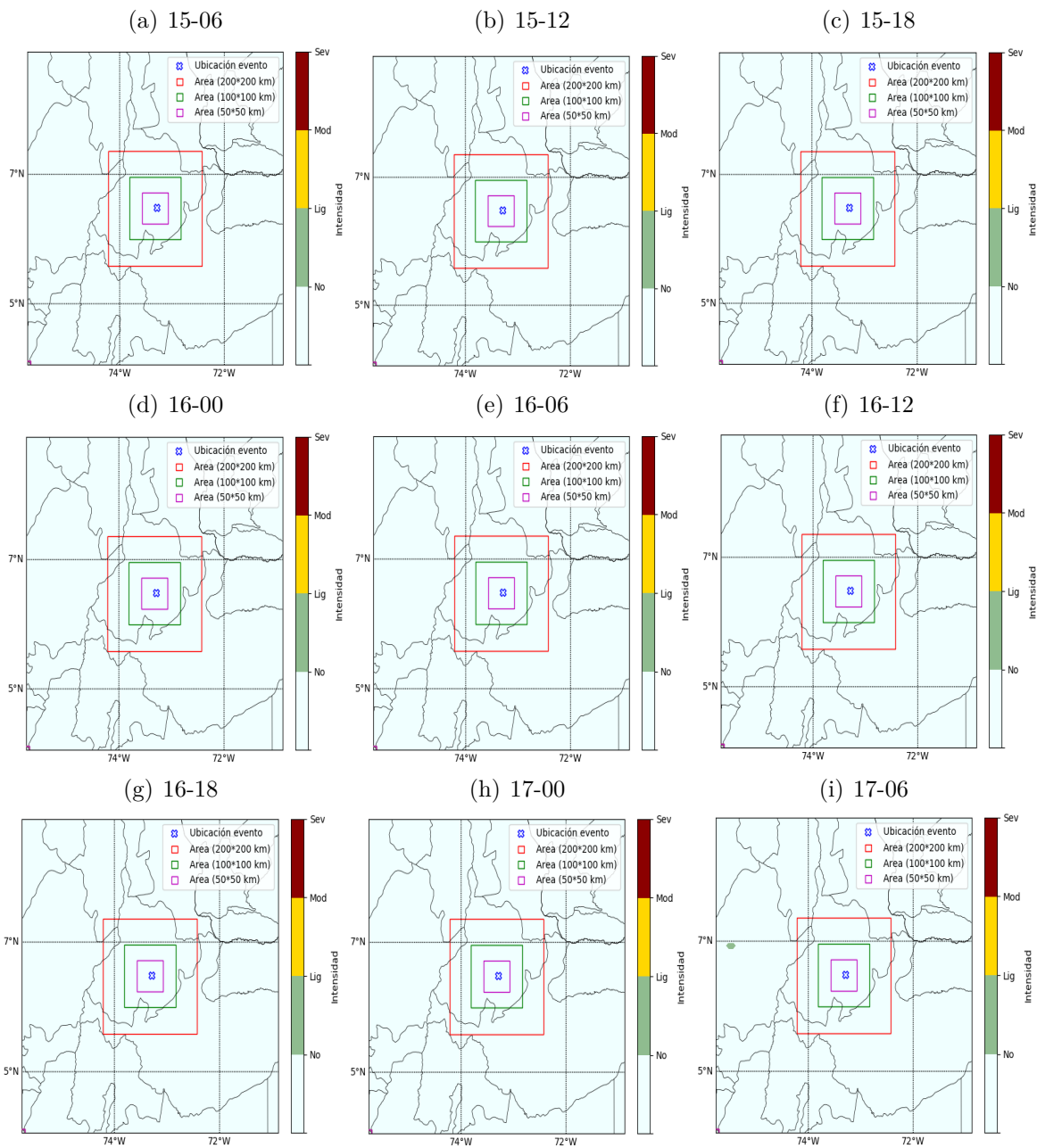


Figura H.16: Resultados de algoritmo SLWS para caso 8.

Bibliografía

- Appiah-Kubi, P. (2011). *U.S. inflight icing accidents and incidents, 2006 to 2010*. PhD thesis.
- AviationSafetyNetwork (2015). (10-09-2018)<https://aviation-safety.net/database/record.php?id=20110518-0&lang=es>.
- AWS (1980). AWS/TR-80/001 Forecasters Guide on Aircraft Icing. Reporte técnico.
- Barbara Brown, Gregory Thompson, Roelof T. Buintjes, Randy Bullock, y Tressa Kane (1997). Intercomparison of In-Flight Icing Algorithms. Part II: Statistical Verification Results. *Weather and Forecasting*, (1993):890–914.
- Belo-Pereira, M. (2015). Comparison of in-flight aircraft icing algorithms based on ECMWF forecasts. *Meteorological Applications*, 22(4):705–715.
- Bernstein, B. y Le Bot, C. (2009). An inferred climatology of icing conditions aloft, including supercooled large drops. Part II: Europe, Asia, and the Globe. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(8):1503–1526.
- Bernstein, B., Wolff, C. A., y McDonough, F. (2007). An Inferred Climatology of Icing Conditions Aloft, Including Supercooled Large Drops. Part I: Canada and the Continental United States. páginas 1857–1877.
- Bernstein, B. C., McDonough, F., Politovich, M. K., Brown, B. G., Ratvasky, T. P., Miller, D. R., Wolff, C. A., y Cuning, G. (2005). Current Icing Potential: Algorithm Description and Comparison with Aircraft Observations. *Journal of Applied Meteorology*, 44(7):969–986.
- Bernstein, B. C., Omeron, T. A., McDonough, F., y Politovich, M. K. (1997). The Relationship between Aircraft Icing and Synoptic-Scale Weather Conditions. *Weather and Forecasting*, 12(4):742–762.
- Cáceres, R. H. (2017). *Meteorología aplicada a la seguridad de las operaciones aéreas*. Number 12.
- Cornell, D., Donahue, C., y Keith, C. (1995). AFCCC/TN-95/004 A Comparasion of Aircraft Icing Forecast Models. Reporte técnico.
- Cortes, A. U. (2012). *Estimación de la capacidad del modelo WRF para pronosticar eventos extremos asociados con altas precipitaciones en la región Andina Colombiana*. PhD thesis.

- Dzambo, A. M. y Turner, D. D. (2016). Characterizing relative humidity with respect to ice in midlatitude cirrus clouds as a function of atmospheric state. *Journal of Geophysical Research*, 121(20):12,253–12,269.
- ECMWF (2018). Tomado de ERA5/ECMWF-<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/archive-datasets/reanalysis-datasets/era5> [20-05-2018].
- Feddes, R. (1974). A Synoptic-Scale Model For Simulating Condensed Atmospheric conditions. página 21.
- Fernández, S., Sánchez, J. L., Gascón, E., López, L., García-Ortega, E., y Merino, A. (2014). Weather features associated with aircraft icing conditions: A case study. *The Scientific World Journal*, 2014:18.
- Gent, R. W., Dart, N. P., y Cansdale, J. T. (2000). Aircraft Icing. *Royal Society*, 358(1776):2873–2911.
- Guzmán, D., Ruíz, J. F., y M., C. (2014). Regionalización de Colombia Según La Estacionalidad De La Precipitación Media Mensual, a través de Análisis de Componentes Principales (ACP). *Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático Subdirección de Meteorología – IDEAM*, páginas 1–55.
- Houze, R. (1993). Cloud Dynamics. página 571. 1 edición.
- IDEAM (2018). Tomado de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/019711/AtlasClimatico1.pdf> [11-08-2018].
- IDEAM (2019a). Tomado de <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/LluviaHoraria-graficos.pdf> [29-11-2019].
- IDEAM (2019b). Tomado de <http://www.meteoaeronautica.gov.co/consulta-metar> [03-03-2019].
- Jaramillo, Á. y Chaves, B. (2000). Distribución de la precipitación en Colombia analizada mediante conglomeración estadística. *Cenicafé*, 51(2):102–113.
- Jeck, R. K. (2001). A History and Interpretation of Aircraft Icing Intensity Definitions and FAA Rules for Operating in Icing Conditions-DOT/FAA/AR-01/91. Reporte técnico November.
- Kalová, J. (2012). *Thermodynamic modeling of supercooled water*. PhD thesis.
- Kelsch, M. y Wharton, L. (1996). Comparing PIREPs with NAWAU turbulence and icing forecasts: Issues and results. *Weather and Forecasting*, 11(3):385–390.

- Keraunos (2018). Tomado de <https://linetview.nowcast.de/linetview/pages/index.html>[23-06-2018].
- Korolev, A. V., Isaac, G. A., Cober, S. G., Strapp, J. W., y Hallett, J. (2003). Microphysical characterization of mixed-phase clouds. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 129(587 PART A):39–65.
- Ladwig (2017). wrf-python (Version 1.3.2) [Software]. Boulder, Colorado: UCAR/NCAR. <https://doi.org/10.5065/D6W094P1>.
- Lozano, M. (2013). *WRF simulation of the atmospheric conditions in some aircraft accidents*. PhD thesis.
- Mcdonough, F., Wolff, C. A., y Politovich, M. K. (2007). Forecasting supercooled large drop conditions. páginas 1–8.
- Mishima, O. y Stanley, H. E. (1998). The relationship between liquid, supercooled and glassy water. *Nature*, páginas 396:329–335.
- NOAA (2018). Tomado de <https://www.bou.class.noaa.gov> [08-06-2019].
- NOAA (2019). Tomado de <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>[01-09-2019].
- NWS (2018). NWS DIFAX Weather Map Archive. Tomado de <http://archive.atmos.colostate.edu/data/misc/QPAA99/>[29-07-2018].
- NWS (2019). Tomado de <https://www.weather.gov/ffc/pop>[01-11-2019].
- OACI (2007). GUÍA PARA LA PREPARACIÓN, DIFUSIÓN Y USO DE LOS MENSAJES SIGMET EN LAS REGIONES CAR/SAM. Reporte técnico.
- OGIMET (2018). Selección de Mensajes Aeronáuticos Metar/Speci/Taf. Tomado de <https://www.ogimet.com/metars.phtml> [07-08-2018].
- Peckham, S. E., Smirnova, T. G., Benjamin, S. G., Brown, J. M., y Kenyon, J. S. (2016). Implementation of a digital filter initialization in the WRF model and its application in the rapid refresh. *Monthly Weather Review*, 144(1):99–106.
- Politovich, M. K. (2003). Aircraft Icing. *National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, USA*, (1998):1–108.
- Poveda, G. (2004). La Hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala interdecadal hasta la escala diurna. *Revista Academia Colombiana de Ciencias*, 28(10):201–222.

- RAOB (2018). (26-11-2018)RAOB:The Universal RAwinsonde OBservation program:<https://www.raob.com>.
- Rauber, R. M., Olthoff, L. S., Ramamurthy, M. K., y Kunkel, K. E. (2000). The relative importance of warm rain and melting processes in freezing precipitation events. *Journal of Applied Meteorology*, 39(7):1185–1195.
- Rogers, R. (1976). Física de las nubes. página 248. 1 edición.
- Shewchuk, J. (2018). RAOB User Manual. Reporte técnico.
- SIMFAC (2018). Tomado de <https://www.simfac.mil.co/login.php>.
- Smit, H. G. J., Strater, I. W., Nedelec, I. P., y Zoger, M. (1998). humidity from passenger aircraft M . Helten D . Kley. 103(98):25,643–25,652.
- Smith, R. (1974). Atmospheric Moisture Parametrization. página 21.
- Thompson, G., Bullock, R., y Lee, T. (1996). Using satellite data to reduce spatial extent of diagnosed icing. *Weather and forecasting*, 12(1):185–190.
- Thompson, G., Field, P. R., Rasmussen, R. M., y Hall, W. D. (2008). Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization. *Monthly Weather Review*, 136(12):5095–5115.
- TRMM (2011). Tomado de https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM_3B42_V7/summary [10-11-2019]Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) (2011), TRMM (TMPA) Rainfall Estimate L3 3 hour 0.25 degree x 0.25 degree V7, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Informat.
- UA (2018). Tomado de http://www.atmo.arizona.edu/students/courselinks/spring08/atmo336s1/courses/fall13/atmo551a/Site/ATMO_451a_551a_files/ClausiusClapeyron.pdf[29-11-2019].
- UCAR (2007). Tomado de https://www.meted.ucar.edu/meteoforum/tropwaves_sp/print_version/05-Tracking_waves.htm#a1, Tomado de [06-12-2019].
- UCAR (2018). WRF model user site.
- USAF (1986). Climatic atlas of icong potential over North America Rep.USEFETAC/DS-86/001, U.S. Air Force. 129 pp.Avail-able from Environmental Technical Applications Center (ETAC), Scott Air Force Base, IL 52225-5458.
- UW (2018). Tomado de <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> [01-02-2018].

- Wang, J. y Rossow, W. (1995). Determination of Cloud Vert Structure From Upper Air Obs.Pdf. *Journal Of Applied Meteorology*, páginas 2243–2258.
- Wilks, D. (2006). Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. En *Academic Press, International geophysics series*, volume 91, página 627. 2 edición.
- Young, G. S., Brown, B. G., y McDonough, F. (2002). An infrared icing climatology – Part I: Estimation From Pilot Reports And Surface Conditions Preprints, 10th Conf. on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Portland, OR, Amer. Meteor. Soc., CD-ROM, J1.5. páginas 1–8.
- Zea, J. (2003). Baja Anclada Del Pacífico the Pacific Anchored Low. *Meteorología Colombiana*, (7):109 – 116.
- Zea, J. A., León, G. E., y Eslava, J. A. (2000). Influencia de sistemas extratropicales en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 1:31–40.
- Zheng, Q., Durben, D. J., Wolf, G. H., y Angell, C. A. (1991). Liquids at large negative pressures: Water at the homogeneous nucleation limit. *Sciense-American Association for the Advancement of Science*, páginas 254:829–832.