

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**APLICACIÓN EN PRONÓSTICOS DE CORTO PLAZO DE ASPECTOS
DE VARIABILIDAD DE LA TROPÓSFERA BAJA COSTARRICENSE
BASADA EN DATOS DE RADIO-SONDEOS METEOROLÓGICOS**

Trabajo final de investigación aplicada sometido a la consideración de la
Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias de la
Atmósfera para optar al grado y título de Maestría Profesional en
Meteorología Operativa

JOSE PABLO VALVERDE MORA

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Costa Rica

2019

Dedicatoria

Sin duda alguna, al único que trasciende en el tiempo, a Dios; al que puso a mi lado a la persona que me incentivó a retomar nuevamente mis estudios, al que me dio una familia de un valor incalculable, al único por el cual estamos todos acá...

Agradecimientos

A mis compañeros de la maestría, los cuales me impulsaban desde México, me motivaban desde El Salvador, y por supuesto a los compañeros nacionales que me dan su hombro día a día.

A los profesores de la maestría que sin ninguna reserva transmiten su conocimiento y comparten ese gran tesoro que es el saber.

A mi tutora MSc. Evelyn Quirós Badilla, que con sus consejos, experiencia y ayuda me dirigió a la mejora de este trabajo.

Finalmente, al Instituto Meteorológico Nacional por su gran apoyo en todo el proceso de esta maestría; desde mi postulación, patrocinio y respaldo.

“Este trabajo final de investigación aplicada fue aceptado por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Profesional en Meteorología Operativa.”



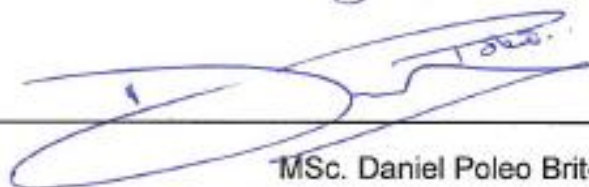
Dra. Gabriela Mora Rojas
Representante del Decano
Sistema de Estudios de Posgrado



MSc. Evelyn Quirós Badilla
Profesora Guía



Dr. Marcial Garbanzo Salas
Lector



MSc. Daniel Poleo Brito
Lector



Dra. Ana María Durán Quesada
Directora
Programa de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera



Jose Pablo Valverde Mora
Sustentante

Índice General

Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Índice General	v
Resumen	ix
Abstract.....	x
Lista de Tablas	xi
Lista de Figuras	xii
Lista de siglas y abreviaturas	xvi
Capítulo 1	1
Introducción.....	1
1.1 Objetivo general.....	1
1.2 Objetivos específicos	1
1.3 Justificación y marco teórico	2
Capítulo 2	4
Marco Conceptual e Índices de Estabilidad Atmosférica.....	4
2.1 Diagrama Termodinámico	4
2.2 Índices de Estabilidad Atmosférica	5
2.2.1 Índice K (KI).....	5
2.2.2 Índice Show (SI).....	5
2.2.3 Índice Lifted (LI)	6
2.2.4 Agua Precipitable (PWAT)	6
2.2.5 Total de Totales (TT).....	7
2.2.6 Energía Potencial Convectiva Disponible (CAPE)	7
2.2.7 Inhibidor Convectivo (CIN).....	8
2.2.8 Temperatura Convectiva (T_c).....	8
2.2.9 Índice de Amenaza de Tiempo Severo (SWEAT)	8
2.3 Turbulencia del Aire Claro (CAT)	9
2.4 Depresión de Punto de Rocío	9
2.5 Célula convectiva unitaria.....	10
2.6 Convección multicelular	10
2.7 Vector de Movimiento de Tormenta.....	11

Capítulo 3	12
Datos y Metodología	12
Capítulo 4	15
Análisis y Resultados	15
4.1 Sondeos Promedio mensuales	15
4.1.1 <i>Enero – Febrero</i>	15
4.1.2 <i>Marzo – Abril</i>	16
4.1.3 <i>Mayo – Junio</i>	21
4.1.4 <i>Julio – Agosto</i>	24
4.1.5 <i>Setiembre – Octubre</i>	24
4.1.6 <i>Noviembre – Diciembre</i>	25
4.2 Promedios mensuales de variables meteorológicas en la vertical	35
4.3 Vector de Movimiento de Tormenta	38
4.4 Rangos de probabilidad para los ‘índices reales’ y comparación con los reportados en los sondeos promedio	39
4.4.1 <i>Valores para el índice K (KI)</i>	39
4.4.2 <i>Valores para el índice ‘Lifted’ (LI)</i>	40
4.4.3 <i>Valores para el índice ‘Total de Totales’ (TT)</i>	40
4.4.4 <i>Valores para el índice ‘Crox Total’ (CT)</i>	41
4.4.5 <i>Valores para el índice ‘Show’ (SI)</i>	43
4.4.6 <i>Valores para el índice ‘Sweat’</i>	43
4.4.7 <i>Valores para el índice ‘Water’ (PWAT)</i>	44
4.4.8 <i>Valores para el índice de Temperatura de Convección (T_c)</i>	44
4.4.9 <i>Resumen de la variación de los índices de estabilidad y otros aspectos relacionados</i>	45
Capítulo 5	48
Casos de estudio y aplicaciones operativas	48
5.1 Casos de estudio para el empleo de índices de estabilidad de los radio-sondeos	48
5.1.1 <i>Caso 1: Tormenta eléctrica fuerte con presencia de granizo</i>	48
5.1.2 <i>Caso 2: Influencia de Tormenta Tropical</i>	51
5.1.3 <i>Caso 3: Tiempo convectivo severo</i>	54
5.1.4 <i>Caso 4: Huracán Otto</i>	57

5.1.5 Caso 5: Onda Tropical entrando al país en el transcurso del día 14 de agosto del 2018.....	61
5.1.6 Caso 6: Onda Tropical sobre Costa Rica y Baja presión en el Pacífico, 20 julio 2017.....	64
5.1.7 Caso 7: Empuje Frío sobre la costa Caribe de Costa Rica, 11 de diciembre, 2017	67
5.2 Implementación operativa.....	71
5.2.1 Diagrama de flujo del Procedimiento de Análisis y Pronóstico mediante sondeo.	74
Capítulo 6	75
Conclusiones y recomendaciones	75
Referencias	78
ANEXOS.....	81
Anexo 1: Niveles en el diagrama termodinámico y hodógrafas características	81
A1.1 Hodógrafa.....	81
A1.2 Nivel de Condensación Convectivo (CCL).....	82
A1.3 Nivel de Condensación por elevación (LCL).....	82
A1.4 Nivel de Convección Libre (LFC).....	82
A1.5 Nivel de Equilibrio (EL).....	82
A1.6 Temperatura del bulbo húmedo (T_w).....	82
Anexo 2: Mensaje TEMP de radio-sondeo y descripción de la decodificación de la sección TTAA	83
Anexo 3: Temperaturas promedio máxima y temperatura de rocío promedio (19 UTC) registradas en la estación meteorológica del aeropuerto Internacional Juan Santamaría y utilizadas para uso en el sondeo pronosticado mensual	85
Anexo 4: Distribución vertical de variables complementarias	86
Anexo 5: Hodógrafas promedio mensuales.....	89
Anexo 6: Índice de Tormentas Severas y Variación mensual de los Índices de estabilidad.....	90
Anexo 7: Reportes Meteorológicos Aeronáuticos de superficie (METAR) para los casos de estudio	92
A7.1: Caso 1.....	92
A7.2: Caso 2.....	93
A7.3: Caso 3.....	94
A7.4: Caso 4.....	95
A7.5: Caso 5.....	97

<i>A7.6: Caso 6</i>	98
<i>A7.7: Caso 7</i>	99
Anexo 8: Ubicación de algunos de los sistemas analizados en los casos de estudio	101

Resumen

La existencia de algunos estudios para la descripción de diferentes variables en la atmósfera libre sobre Costa Rica y que a la vez emplean los datos de sondeos meteorológicos, son los precursores de esta investigación. En este documento, y para fines de pronóstico de corto plazo, se emplean los sondeos lanzados entre los años 2013 al 2017 por el Servicio Meteorológico Nacional (Instituto Meteorológico Nacional, IMN) en la estación experimental Fabio Baudrit (La Garita, Alajuela) y sus cálculos empleados para determinar los valores de los índices de estabilidad más usados (KI, LI, SWEAT, SI, TT, CT, PWAT y T_c) para el pronóstico de tormentas eléctricas.

El promediado de variables en diferentes niveles de la troposfera propicia el cálculo de un sondeo *Skew-T log-P* promedio y característico para cada mes del año, además faculta el establecer los rangos de variación de los índices de estabilidad para los cuales la probabilidad de presencia de tormentas eléctricas aumenta. Esto facilita la descripción de la estabilidad atmosférica a lo largo del año, comparándola con un sondeo para cualquier día en particular. Este sondeo es empleado en el pronóstico a muy corto plazo en especial para alertar las operaciones en tierra de los aeropuertos internacionales del Gran Área Metropolitana (GAM). Por otro lado, el cálculo de series anuales en la troposfera tales como: el viento, humedad relativa, temperatura potencial equivalente, contenido de agua; son indispensables a la hora de poder caracterizar una atmósfera normal de una atípica. Consecuentemente, de estas se desprende que un patrón de vientos del este – sureste en los primeros 8 km de la troposfera costarricense, evidencian un desplazamiento de las células convectivas hacia el noroeste; esto por medio del cálculo del *Vector de Movimiento de Tormentas*.

Finalmente, se analizan casos de estudio para evidenciar lo práctico y explícito que puede ser el empleo de los índices para ciertos días, en los cuales las condiciones resultan ser más idóneas para la formación de tormentas eléctricas (por ejemplo para los casos de ondas tropicales, bajas presiones, calentamientos diurnos moderados y fuertes); mientras que para otros casos de estudio, en los que pese a la inestabilidad y alto contenido de agua precipitable, solo se han presentado lluvias de variable intensidad alternadas con nieblas y nubosidades bajas (por ejemplo para influencias por tormentas tropicales, empujes fríos, huracanes).

Palabras clave: Índices de Estabilidad, Nivel de Convección Libre, Pronóstico, PWAT, *Skew-T Log-P*, Sondeo Promedio Mensual, Tormenta Eléctrica, Vector Movimiento de Tormenta.

Abstract

The existence of some studies about variable description at the free atmosphere over Costa Rica and that at the same time using meteorological soundings data, are the precursors of this research. In the present document and for short-term forecasting purposes, the surveys launched between 2013 to 2017 by the National Weather Service (Instituto Meteorológico Nacional, IMN) in Fabio Baudrit experimental station (La Garita, Alajuela), and their method used to determine the values of the most used stability indexes (KI, LI, SWEAT, SI, TT, CT, PWAT and T_c) for the forecast thunderstorms.

The averaging of variables at different levels of the troposphere leads to the calculation of an average and characteristic Skew-T log-P probes for each month of the year, it allows to establish the stability variation ranges of the indexes for which the probability of the presence of thunderstorms increases and facilitates the description of the atmospheric stability throughout the year, comparing with a radiosonde for any particular day. This survey is used in the very short-term forecast, especially to alert the operations of the Great Metropolitan Area's international airports. On the other hand, the computation of annual series in the troposphere such as: wind, relative humidity, equivalent potential temperature, water content; are indispensable when characterizing a normal atmosphere of an atypical one. In addition, it can be deduced from these that a winds pattern from the east - southeast in the first 8 km of the Costa Rican troposphere, shows a displacement of the convective cells toward the northwest, this through the technique of the *Storm Motion Vector*.

Lastly, study cases are analyzed to show how practical and explicit can be the use of indices for certain days in which the conditions are more suitable for the formation of thunderstorms (for instance; cases of tropical waves, low pressures, moderate and strong diurnal heating), while for other study cases, even with good instability and high contents of precipitable water, only the presence of variable intensity rains is reported, alternated with fogs and low cloud cover (for example; influences from tropical storms, cold thrusts, hurricanes).

Key words: Stability Index, Leve of Free Convection, Forecast, PWAT, Skew-T Log-P, Monthly Average Sounding, Thunderstorms, Storm Motion Vector.

Lista de Tablas

Capítulo	PP.
Capítulo 3	
Tabla 1. Número de sondeos analizados por mes.....	12
Capítulo 4	
Tabla 2: Principales índices de estabilidad para Sondeos Promedio de las 12 UTC [Intervalo de variación]. Periodo de registro de radio-sondeos: 2013-2017.....	16
Tabla 3: Rangos de variación de los índices de estabilidad para Costa Rica.....	47
Capítulo 5	
Tabla 4: Rangos de variación de los índices de estabilidad para caso de estudio del 27 de abril, 2018; 12 UTC (observado) y 19 UTC (pronosticado).....	51
Tabla 5: Rangos de variación de los índices de estabilidad para caso de estudio del 05 de octubre, 2017; 12 UTC (observado) y 17 UTC (pronosticado).....	54
Tabla 6: Rangos de variación de los índices de estabilidad para caso de estudio del 24 de mayo, 2018; 12 UTC (observado) y 19 UTC (pronosticado).....	56
Tabla 7: Rangos de variación de los índices de estabilidad para caso de estudio del 24 de noviembre, 2016; 12 UTC (observado) y 20 UTC (pronosticado).....	60
Tabla 8: Rangos de variación de los índices de estabilidad para caso de estudio del 14 de agosto, 2018; 12 UTC (observado) y 19 UTC (pronosticado).....	64
Tabla 9: Rangos de variación de los índices de estabilidad para caso de estudio del 20 de julio, 2017; 12 UTC (observado) y 20 UTC (pronosticado).....	67
Tabla 10: Rangos de variación de los índices de estabilidad para caso de estudio del 11 de diciembre, 2017; 12 UTC (observado) y 20 UTC (pronosticado).....	70
Anexo 3	
Tabla A3.1: Temperaturas Promedio Máxima Mensual. Estación 78762 - Aeropuerto Int. Juan Santamaría.....	85
Tabla A3.2: Temperatura de Rocío Promedio a las 19 UTC. Estación 78762 - Aeropuerto Int. Juan Santamaría.....	85

Lista de Figuras

Capítulo

PP.

Capítulo 2

Figura 1: Diagrama termodinámico Skew-T Log-P para la estación 78762 – MROC, Aeropuerto Internacional Juan Santamaría lanzado desde la Garita de Alajuela; fecha: 08 de febrero, 2017..... 4

Figura 2: **A)** Estructura de célula convectiva unitaria (Fuente: COMET Program, 2013-2016) y **B)** ejemplo de este tipo de convección en Costa Rica (imagen satelital GOES-16) 10

Figura 3: **A)** Estructura convectiva multicelular (Fuente: COMET Program, 2003-2016) y **B)** ejemplo de este tipo de convección en Costa Rica (imagen satelital GOES-16)..... 11

Capítulo 3

Figura 4: Reporte de casos de días con tormenta eléctrica y que contaban con su respectivo radio-sondeo. Estación Aeronáutica: Aeropuerto Internacional Juan Santamaría. Periodo: 2013 - 2017..... 14

Capítulo 4

Figura 5: Sondeo Promedio (A) y Pronosticado (B) para el mes de ENERO..... 17

Figura 6: Sondeo Promedio (A) y Pronosticado (B) para el mes de FEBRERO..... 18

Figura 7: Sondeo Promedio (A) y Pronosticado (B) para el mes de MARZO..... 19

Figura 8: Sondeo Promedio (A) y Pronosticado (B) para el mes de ABRIL..... 20

Figura 9: Sondeo Promedio (A) y Pronosticado (B) para el mes de MAYO..... 22

Figura 10: Sondeo Promedio (A) y Pronosticado (B) para el mes de JUNIO..... 23

Figura 11: Sondeo Promedio (A) y Pronosticado (B) para el mes de JULIO..... 26

Figura 12: Sondeo Promedio (A) y Pronosticado (B) para el mes de AGOSTO..... 27

Figura 13: Sondeo Promedio (A) y Pronosticado (B) para el mes de SETIEMBRE..... 28

Figura 14: Sondeo Promedio (A) y Pronosticado (B) para el mes de OCTUBRE..... 29

Figura 15: Sondeo Promedio (A) y Pronosticado (B) para el mes de NOVIEMBRE..... 31

Figura 16: Sondeo Promedio (A) y Pronosticado (B) para el mes de DICIEMBRE..... 32

Figura 17: Sondeos promedio mensual sobre la atmósfera de Costa Rica para las 12 UTC. Periodo 2013-2017..... 33

Figura 18: Sondeos pronosticado mensual sobre la atmósfera de Costa Rica para las 19 UTC. Periodo 2013-2017..... 34

Figura 19: Velocidad y dirección promedio mensual del viento en función de la altura. Periodo 2013-2017.....	36
Figura 20: Depresión del Punto de Rocío promedio mensual en función de la altura. Periodo 2013-2017.....	36
Figura 21: Humedad Relativa promedio mensual en función de la altura. Periodo 2013-2017.....	37
Figura 22: Temperatura Potencial Equivalente promedio mensual en función de la altura. Periodo 2013-2017.....	38
Figura 23: Probabilidad para los valores del índice KI.....	40
Figura 24: Probabilidad para los valores del índice LI.....	41
Figura 25: Probabilidad para los valores del índice TT.....	42
Figura 26: Probabilidad para los valores del índice CT.....	42
Figura 27: Probabilidad para los valores del índice SI.....	43
Figura 28: Probabilidad para los valores del índice SWEAT.....	44
Figura 29: Probabilidad para los valores del índice PWAT.....	45
Figura 30: Probabilidad para los valores del índice T_c	47
Capítulo 5	
Figura 31: Sondeo meteorológico para el día 27 de abril del 2018 (12 UTC).....	49
Figura 32: Sondeo meteorológico pronosticado para el día 27 de abril del 2018 (19 UTC)....	50
Figura 33: Sondeo meteorológico para el día 5 de octubre del 2017 (12 UTC).....	52
Figura 34: Sondeo meteorológico pronosticado para el día 05 de octubre del 2018 (17 UTC).....	53
Figura 35: Sondeo meteorológico para el día 24 de mayo del 2018 (12 UTC).....	55
Figura 36: Sondeo meteorológico pronosticado para el día 24 de mayo del 2018 (19 UTC)..	56
Figura 37: Sondeo meteorológico para el 24 de noviembre del 2016 (12 UTC).....	58
Figura 38: Sondeo meteorológico pronosticado para el 24 de noviembre del 2016 (20 UTC).....	59
Figura 39: Sondeo meteorológico para el día 14 de agosto del 2018 (12 UTC).....	62
Figura 40: Sondeo meteorológico pronosticado para el 14 de agosto del 2018 (19 UTC).....	63
Figura 41: Sondeo meteorológico para el 20 de julio del 2017 (12 UTC).....	65
Figura 42: Sondeo meteorológico pronosticado para el 20 de julio del 2017 (20 UTC).....	66
Figura 43: Sondeo meteorológico para el 11 de diciembre del 2017 (12 UTC).....	68

Figura 44: Sondeo meteorológico pronosticado para el 11 de diciembre del 2017 (20 UTC). 69

Anexo 1

Figura A1.1: Hodógrafas del viento típicas para convección (a) celular unitario, (b) multicelular y (c) supercelular..... 81

Anexo 2

Figura A2: Mensaje TEMPALL de radio-sondeo meteorológico de la estación 78762 - Aeropuerto Internacional Juan Santamaría, para el 04 de junio del 2015..... 83

Anexo 4

Figura A4.1: Detalle de la velocidad promedio mensual del viento a las 19 UTC. Periodo 2013-2017..... 86

Figura A4.2: Componente zonal promedio mensual del viento. Periodo 2013-2017..... 86

Figura A4.3: Componente meridional promedio mensual del viento. Periodo 2013-2017..... 87

Figura A4.4: Turbulencia de aire claro (CAT) debida a la cortante del viento promedio mensual. Periodo 2013-2017..... 87

Figura A4.5: Contenido de Agua Precipitable promedio mensual en función de la altura..... 88

Figura A4.6: Variación promedio mensual de los Niveles CCL y LCL. Periodo 2013-2017.... 88

Anexo 5

Figura A5.1: Hodógrafa promedio mensual característica en la capa de 0 a 6000 m. Periodo 2013-2017..... 89

Anexo 6

Figura A6.1: Probabilidad para los valores del índice 'Severity'..... 90

Figura A6.2: Variación promedio mensual para índices: CT, SWEAT y TT. Periodo 2013-2017..... 90

Figura A6.3: Variación promedio mensual para los índices: KI, LI y SI. Periodo 2013-2017.. 91

Figura A6.4: Altura y tendencia de los niveles LCL, CCL y LFC para los 222 sondeos de las 12 UTC, que registraron tormenta eléctrica en horas de la tarde en el GAM. Periodo 2013-2017..... 91

Anexo 7

Figura A7.1: Reportes METAR caso 1..... 92

Figura A7.2: Reportes METAR caso 2..... 93

Figura A7.3: Reportes METAR caso 3..... 94

Figura A7.4: Reportes METAR caso 4..... 95

Figura A7.5: Reportes METAR caso 5..... 97

Figura A7.6: Reportes METAR caso 6.....	98
Figura A7.7: Reportes METAR caso 7.....	99

Anexo 8

Figura A8.1: Ubicación de la Tormenta Tropical NATE. 05 de octubre, 2017 (Caso 2).....	101
Figura A8.2: Ubicación del Huracán OTTO. 24 de noviembre, 2016 (Caso 4).....	102
Figura A8.3: Ubicación de la Onda Tropical y Baja presión. 20 de julio, 2017 (Caso 6).....	103
Figura A8.4: Ubicación del sistema frontal – EF. 11 de diciembre, 2017 (Caso 7).....	104

Lista de siglas y abreviaturas

AGL:	Altura sobre el nivel de superficie.
AMS:	Sociedad Americana de Meteorología.
BCFG:	Código de la OACI para bancos de niebla.
BKN:	Código de la OACI para nubosidad quebrada (5-7 octas).
BR:	Código de la OACI para bruma.
CAPE:	Índice de Energía Potencial Convectiva Disponible.
CAT:	Turbulencia de Aire Claro.
CCL:	Nivel de Condensación Convectivo.
CIN:	Índice de Inhibición Convectiva.
CRRH:	Comité Regional de Recursos Hidráulicos.
CT:	Índice 'Crox Total'.
DZ:	Código de la OACI para llovizna.
EL:	Nivel de Equilibrio.
FEW:	Código de la OACI para nubosidad poca (1-2 octas).
FF:	Frente Frío.
FG:	Código de la OACI para niebla.
FM:	Indicativo del Sistema de Numeración de Claves de la OMM.
GAM:	Gran Área Metropolitana.
GOES:	"Geostationary Operational Environmental Satellite".
IMN:	Instituto Meteorológico Nacional.
<i>IR</i> :	Índice Real.
KI:	Índice K.
LCL:	Nivel de Condensación por Elevación.
LFC:	Nivel de Convección Libre.
LI:	Índice 'Lifted'.
LLWS:	Cortante del Viento de Bajo Nivel.
LM:	Nivel Superior de Capa de Mezcla.
METAR:	Reporte Meteorológico de Aeródromo o Terminal Aérea.
MRLB:	Código de la OACI para el Aeropuerto Internacional Daniel Oduber Quirós.
MRLM:	Código de la OACI para el Aeropuerto Internacional de Limón.
MROC:	Código de la OACI para el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría.

MRPV:	Código de la OACI para el Aeropuerto Internacional Tobías Bolaños Palma.
NCEI:	Centro Nacional de Información para el Ambiente.
NL:	Nivel de Boyantes Neutra.
OACI:	Organización de Aviación Civil Internacional.
OMM:	Organización Meteorológica Mundial.
OVC:	Código de la OACI para un cubierto de nubosidad (8 octas).
PWAT:	Agua Precipitable o contenido de Agua 'Water'.
RA:	Código de la OACI para lluvia.
RAOB:	Programa de Observación de Radiosondas.
SCT:	Código de la OACI para nubosidad dispersa (3-4 octas).
SH:	Código de la OACI para chubascos.
SI:	Índice 'Show'.
SPECI:	Reporte Meteorológico Especial.
SWEAT:	Índice 'SWEAT'.
T _c :	Temperatura Convectiva.
TEMP:	Informe de Observación en altitud de la Presión, la Temperatura, la Humedad y el Viento proveniente de una estación terrestre fija.
TS:	Código de la OACI para tormenta eléctrica.
TSRA:	Código de la OACI para tormenta con lluvia.
TT:	Índice 'Total Totals'.
T _{w0} :	Altura de nivel cero del Bulbo Húmedo.
UTC:	Tiempo Coordinado Universal.
VCSH:	Código de la OACI para chubascos en las vecindades.
VT:	Índice 'Vertical Total'.
VV:	Código de la OACI para visibilidad vertical.



Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Jose Pablo Valverde Mora, con cédula de identidad 1-1235-0891, en mi condición de autor del TFG titulado APLICACIÓN EN PRONÓSTICOS DE CORTO PLAZO DE ASPECTOS DE VARIABILIDAD DE LA TROPÓSFERA BAJA COSTARRICENSE BASADA EN DATOS DE RADIO-SONDEOS METEOROLÓGICOS.

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO *

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

INFORMACIÓN DEL ESTUDIANTE:

Nombre Completo: Jose Pablo Valverde Mora

Número de Carné: A35417 Número de cédula: 1-1235-0891

Correo Electrónico: vmorajp@gmail.com

Fecha: 20-11-2019 Número de teléfono: 6043 9255

Nombre del Director (a) de Tesis o Tutor (a): MSc. Evelyn Quirós Badilla

FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

Capítulo 1

Introducción

El uso de diagramas termodinámicos continúa siendo una valiosa herramienta de gran utilidad para el pronóstico, esto debido a que es un gráfico con una amplia variedad de elementos meteorológicos obtenidos de sondeos de altura, los cuales representan la *infografía técnica* vertical de las condiciones atmosféricas presentes. El establecer umbrales de acierto de los valores obtenidos para los índices de estabilidad será importante para este estudio, ya que pueden identificar patrones claves que serán la base para el pronóstico y en los que el meteorólogo se apoyará por medio de métodos objetivos. Estos métodos se pueden demostrar por medio de casos de estudio.

En la actualidad no existen para Costa Rica estudios previos que, como el propuesto en la presente investigación, se basen en los sondeos meteorológicos para la descripción de la tropósfera en la vertical y *su aplicación en la elaboración de pronósticos de corto plazo*. Además, en la presente investigación se utiliza un enfoque que permite obtener valores de la estabilidad e inestabilidad atmosférica para cada mes del año. El considerar los sondeos meteorológicos como una de las mediciones más precisas de la atmósfera en la vertical, posiciona a este tipo de muestreo entre los más importantes para la incorporación de datos en las modelaciones numéricas y pronósticos diarios, además de justificar la presente investigación respecto a sondeos meteorológicos y su importancia en el pronóstico.

1.1 Objetivo general

Caracterizar la tropósfera baja costarricense por medio de un sondeo promedio mensual que permita determinar las principales diferencias de estabilidad e inestabilidad atmosférica a lo largo del año.

1.2 Objetivos específicos

- a) Estudiar las principales consideraciones dinámicas y termodinámicas presentes en la atmósfera de Costa Rica a lo largo del año.
- b) Calcular el sondeo promedio mensual característico basado en los radiosondeos del periodo de registro que comprende los años del 2013 al 2017.
- c) Determinar un pronóstico modelado de las condiciones a esperar para cada patrón de atmósfera típico por mes, así como el posible desplazamiento de actividad convectiva por medio del vector de movimiento de tormenta.
- d) Fijar los rangos de variación de los principales índices de inestabilidad para tormentas eléctricas de cada mes, en el Gran Área Metropolitana.

- e) Determinar los umbrales de acierto de los índices del sondeo promedio para pronóstico de tiempo convectivo, por medio del uso de las observaciones meteorológicas de tormenta eléctrica realizadas en los aeropuertos del Gran Área Metropolitana.

1.3 Justificación y marco teórico

La necesidad de caracterizar la atmósfera costarricense para diferentes propósitos y aplicaciones ha generado varias investigaciones desde diferentes enfoques. Entre estos se encuentra la investigación realizada por Alvarado y Fernández (2001), donde se analizan la mayoría de las variables atmosféricas en los diferentes niveles troposféricos (e inclusive estratosféricos), por medio de la descripción y análisis de la atmósfera desde el punto de vista de estabilidad e inestabilidad a lo largo del año. Por ejemplo, este estudio describe la *capa convectivamente inestable*, donde se puede discernir cuando la atmósfera presenta una convección limitada y cuando la convección puede ser intensa (Alvarado y Fernández, 2001).

Una descripción más enfocada a las condiciones diurnas prevalecientes durante los veranos del hemisferio norte, y otra profundización de estas variables meteorológicas para los inviernos, fue la realizada por Garbanzo (2011). En este estudio se realizó una caracterización desde el nivel de superficie hasta la estratósfera, específicamente en cuatro horas particulares a lo largo del día (00, 06, 12, 18 UTC) y con variables atmosféricas dinámicas como el viento (magnitud dirección), componentes meridional, zonal y cortante; además de variables termodinámicas como temperaturas, razón de mezcla, humedad y su variabilidad asociada. Hallazgos importantes del estudio de Garbanzo (2011) son acerca de la presencia del viento en superficie del sur - suroeste en los sondeos de las 18 UTC y 00 UTC, además de la correlación inversa entre la cortante del viento y las precipitaciones entre los meses de junio a agosto, ya que las mismas denotan una marcada disminución.

Respecto a la ocurrencia de tormentas eléctricas, Fernández y Hidalgo (1997) establecen que las principales horas en las que se presentan las tormentas difieren entre las regiones climáticas de Costa Rica y con respecto a las vertientes donde se presentan. Para el caso del Aeropuerto Internacional Juan Santamaría, los autores describen una correspondencia directa entre la distribución de precipitación y el número de días con tormenta, o sea a mayor (menor) precipitación, mayor (menor) cantidad de días con tormenta; esto para el periodo de horas de las 6 a 18 (hora local). Por otro lado, Rapp, Peterson, Frauenfeld, Quiring y Roark (2014) denota que, por medio de su caracterización de tormentas mediante el radar de precipitación TRMM, las principales horas donde la frecuencia de tormentas es mayor son las presentes entre el rango horario de las 18 a las 01 UTC; con porcentajes mayores para las regiones del noroeste y suroeste (correspondientes a toda la vertiente Pacífico). Además, ellos concluyen que la tasa de lluvia convectiva ocurre dos horas después del máximo calentamiento diurno, con porcentajes mayores también para las regiones de Pacífico Central y Sur.

El empleo y aplicación de sondeos meteorológicos incorporados en el análisis diario de las condiciones atmosféricas, es documentado en diferentes investigaciones de latitudes medias. A continuación, se describen algunas de ellas y sus métodos empleados.

Estudios como los de Manzato (2005), desarrollado con el objetivo de establecer un análisis multivariado de pronóstico a corto plazo para tormentas eléctricas, emplea índices

derivados de los sondeos meteorológicos en las regiones planas de Venecia (Italia). Para el estudio el autor utiliza en la validación sondeos, conteos de descargas eléctricas, la lluvia y viento de la red mesoescalar de estaciones en la región en estudio.

Un análisis de la actividad de descargas eléctricas sobre Nanjing (China), es realizado por medio del estudio de datos de sondeos de 156 días con tormenta eléctrica y de 164 días de buen tiempo para un periodo de registro de cinco años de los cuales, se calculan los valores de varios de los índices. Para este caso se emplea un análisis singular espectral para el filtrado de índices como el CAPE, KI, JI y SWEAT; los cuales son parte de los datos de entrada para el modelo mediante un análisis bivariado lineal (Wang, Sheng, Zhou y Zhou, 2013).

Una investigación que describe la complejidad del pronóstico de ocurrencia de tormentas con granizo es la llevada a cabo por López, García-Ortega y Sánchez (2006), los cuales por medio de la determinación de condiciones preconvectivas propias del inicio de convección, utilizan los índices de los radiosondeos para determinar cuáles de estos son más relevantes en caracterizar las condiciones pre-convección. Posteriormente establecen un modelo objetivo de pronóstico a corto plazo para tormentas basado en varios parámetros meteorológicos para la localidad de estudio, en España. La predicción de estos eventos meteorológico se complica debido al corto periodo de afectación del evento y a la pequeña área espacial involucrada, por ello se concluye que los modelos basados en índices de estabilidad deberán ser separados para diferentes áreas geográficas (López et al., 2006).

Por otra parte, con respecto a la preferencia del diagrama *Skew-T Log-P* descrita en AWS (1979), se manifiesta que se basa en criterios como: tener la mayoría de sus líneas (variables) rectas con las que se logra mejor percepción para el análisis, la variable presión en la vertical asemeja la altura de la atmósfera, la razón existente entre el área del diagrama y la energía termodinámica es constante en todo el diagrama y además, permite el empleo del método de la parcela para analizar y describir la atmósfera sobre el punto de observación.

Al saber que el pronóstico aeronáutico es indispensable para la planificación y seguridad de las operaciones aéreas en todo aeródromo, la información presente en los radiosondeos es analizada e interpretada a diario para incluirla en la predicción del tiempo convectivo severo dentro del área del aeropuerto. El predecir la posibilidad de tormentas eléctricas, su intensidad y su duración involucra la posibilidad de aparición de alertas por turbulencia asociada a su formación nubosa; además de la ocurrencia de retrasos en vuelos y hasta el mismo cese de operaciones por la presencia de fuertes descargas eléctricas, de visibilidades restringidas o de grandes acumulados de agua que imposibilitan las operaciones en tierra.

2.2 Índices de Estabilidad Atmosférica

En sí mismo, un índice de estabilidad representa valores numéricos que cuantifican rasgos atmosféricos a diferentes niveles de presión (altura); estos son de utilidad al pronosticador para determinar la probabilidad de ocurrencia de fenómenos meteorológicos a menor escala, como por ejemplo tormentas eléctricas, tornados y granizo (Ahrens, C. D., 2008). En seguida se exponen los índices analizados en el desarrollo de este trabajo.

2.2.1 Índice K (KI)

Es definido por George (1960) como la suma entre la razón de cambio de la temperatura existente entre las capas de 850 mb y 500 mb, más la humedad (representada por la temperatura de punto de rocío) entre las capas de 850 mb y 700 mb.

$$KI = (T_{850} + T_{500}) + T_{o\ 850} - (T_{700} - T_{o\ 700}) \quad (1)$$

Donde: T_{850} : Temperatura en 850 mb (°C).

$T_{o\ 850}$: Temperatura de punto de rocío en 850 mb (°C).

T_{500} : Temperatura en 500 mb (°C).

T_{700} : Temperatura en 700 mb (°C).

$T_{o\ 700}$: Temperatura de punto de rocío en 700 mb (°C).

La física detrás del cálculo del índice está en determinar qué tan frías se encuentran las capas medias de la atmósfera respecto a capas cercanas a superficie, más la humedad existente entre las capas bajas. Se debe mencionar que la probabilidad de presentarse chubascos con tormenta eléctrica aumenta conforme los valores del índice KI se incrementan.

2.2.2 Índice Show (SI)

Diferencia entre la temperatura ambiente en el nivel de 500 mb y la temperatura de la parcela a ese mismo nivel; esta última ha sido ascendida por un proceso adiabático seco (hasta saturarse) y luego por uno adiabático húmedo, ambos procesos desde el nivel de 850 mb al de 500 mb (Showalter, 1947).

Se calcula por medio de:

$$SI = T_{500} - T_p \quad (2)$$

Donde: T_{500} : Temperatura en 500 mb (°C).

T_p : Temperatura de Parcela en 500 mb (°C).

De acuerdo con Showalter (1947), es para valores de cero o inferiores que el potencial de chubascos y tormentas aumenta.

2.2.3 Índice Lifted (LI)

Presenta la variante respecto al *SI* de que la parcela que asciende desde superficie, lo realiza por un proceso adiabático seco que pasa por la temperatura máxima predicha para la tarde de ese día particular y además, usa la razón de mezcla media de los 900 m más bajos del sondeo. Para el caso de un sondeo donde no se espera más calentamiento (o un sondeo realizado por la tarde), se tomará la temperatura potencial media de los 900 m más bajos, como la temperatura de lanzamiento para la parcela ascendida. Su expresión original desarrollada por Galway (1956) es:

$$LI = T_p - T_{500} \quad (3)$$

Donde: T_{500} : Temperatura en 500 mb (°C).

T_p : Temperatura de Parcela en 500 mb (°C).

La física del índice expresa, cuanto más caliente es la parcela ascendida respecto a su entorno, esto a niveles medios de 500 mb (ecuación 3). Se debe tener especial cuidado en qué método se utiliza para el ascenso de la parcela, ya que juega un papel importante con el valor estimado para este índice. Para fines de este estudio, el método se realiza tomando el promedio ponderado de la temperatura (y el punto de rocío) en un espesor de los 100 mb más bajos de la atmósfera (Programa de Observación de Radiosondas, RAOB 6.1).

Los valores de *LI* son inferiores a los de *SI* y dependientes de la forma en la cual se define el proceso de ascenso de la parcela.

2.2.4 Agua Precipitable (PWAT)

Definida como la cantidad total de vapor de agua contenido en una columna de sección transversal unitaria entre dos niveles (de presión) específicos. Es expresada en términos de altura de sustancia condensada en un recipiente de misma sección transversal (AMS, 2015). Se calcula como:

$$PWAT = \frac{1}{\rho g} \int_{p_1}^{p_2} r dp \quad (4)$$

Donde: $r = r(p)$: es la razón de mezcla dependiente de la presión.

p_1 y p_2 : es la capa atmosférica delimitada entre ambas presiones.

g : aceleración de la gravedad.

ρ : densidad del agua.

Como se observa de su forma de cálculo, el índice no representa consideraciones dinámicas, sino que es una cuantificación a una hora específica, por ello es posible tener un contenido de agua elevado y a la misma vez un tipo de precipitación que es estratificada (no convección profunda), y consecuente con importantes montos de precipitación asociados a este. También se le conoce simplemente como agua ('Water') contenida en la atmósfera.

2.2.5 Total de Totales (TT)

Definido por Miller (1972) como la suma de los índices “Cross Totals” (CT) y “Vertical Totals” (VT):

$$TT = VT + CT \quad (5)$$

con:

$$VT = T_{850} - T_{500}. \quad (6)$$

$$CT = T_{o\ 850} - T_{500}. \quad (7)$$

Donde:

T_{850} y T_{500} : Temperatura en 850 mb y 500 mb (°C).

$T_{o\ 850}$: Temperatura de punto de rocío en 850 mb (°C).

El CT es influenciado por la humedad existente en 850 mb, por lo que aumentarían la probabilidad de chubascos con tormenta para valores de $TT \in [30 - 50]$ (Miller, 1972).

Físicamente este índice representa nuevamente, un grado de diferencia entre temperaturas de niveles bajos y medios (VT), tomando en cuenta la humedad existente en capas cercanas a la superficie (CT); o sea, se tendrá un índice alto y con alta probabilidad de chubascos con tormenta eléctrica para una atmósfera húmeda en el nivel de 850 mb (CT alto en ecuaciones 5, 6 y 7).

2.2.6 Energía Potencial Convectiva Disponible (CAPE)

Para una parcela estáticamente inestable, este índice es considerado como la medida de la energía cinética posible que puede acumular. Su ascenso es considerado sin interactuar con su entorno (Holton, 2013). Para un diagrama termodinámico el índice CAPE sería el área comprendida entre la curva de la parcela que asciende, y la curva de temperatura ambiente del sondeo. Su cálculo en unidades de energía por unidad de masa [J/Kg] se realiza por medio de:

$$CAPE = \frac{w_{max}^2}{2} = \int_{z(LFC)}^{z(NL)} g \left(\frac{T_p - T}{T} \right) dz \quad (8)$$

Donde: T : Temperatura ambiente (°C).

T_p : Temperatura de la parcela (°C).

g : Gravedad (m/s²).

w_{max} : Máxima velocidad vertical (m/s).

LFC y NL : Nivel de convección libre y Nivel de boyantes neutra.

2.2.7 Inhibidor Convectivo (CIN)

Índice considerado como la energía necesaria para ascender una parcela hasta el nivel de LCL mediante un proceso adiabático, y luego hasta el LFC mediante un proceso pseudo-adiabático. En el diagrama termodinámico sería el área negativa comprendida a la izquierda de la temperatura ambiente y el recorrido de la parcela ascendida por sus procesos; o sea es la cantidad de energía cinética que debe ser sumada a la parcela para llevarla al LFC. Para valores de *CIN* muy grandes, la convección profunda podría no formarse (AMS, 2017).

$$CIN = \int_{z(LM)}^{z(LFC)} g \left(\frac{T_p - T}{T} \right) dz \quad (9)$$

Donde: *T*: Temperatura ambiente (°C).

T_p: Temperatura de la parcela (°C).

g: Gravedad (m/s²).

LM y *LFC*: Nivel superior de la capa de mezcla y Nivel de convección libre.

2.2.8 Temperatura Convectiva (T_C)

Es la temperatura más baja que debe alcanzar el calentamiento del aire superficial, para poder iniciar la formación de nubes convectivas. Lo anterior es antes de que la parcela ascienda por un proceso adiabático seco hasta el nivel CCL. Para determinarla, se inicia en el CCL bajando por un proceso adiabático seco hasta el nivel de presión de superficie (AWS, 1979). También se le conoce como 'Temperatura de Disparo' para la cual, a diario es estimada la temperatura máxima alcanzada y se comparan con *T_C* para determinar la ocurrencia de tiempo convectivo de importancia para la aviación.

2.2.9 Índice de Amenaza de Tiempo Severo (SWEAT)

Utilizado para analizar el potencial de tormentas severas y definido como:

$$SWEAT = 20(TT - 49) + 12T_{o\ 850} + 2V_{850} + V_{500} + 125[\sin(\Delta VD_{500-850}) + 0.2] \quad (10)$$

Donde: *TT*: Índice Total Totals (igualado a 0 para *TT* < 49).

T_{o 850}: Temperatura de punto de rocío en 850 mb (°C).

V₈₅₀ y *V₅₀₀*: Velocidad del viento en 850 mb y 500 mb (kt).

ΔVD : Diferencia de direcciones del viento entre los niveles de 500 y 850 mb (°).

El término ΔVD es asignado a 0 si no se cumple alguna de las condiciones siguientes:

- a- $VD_{850} \in [130^\circ - 250^\circ]$. b- $VD_{500} \in [210^\circ - 310^\circ]$.
 c- $\Delta VD_{500-850} > 0$. d- $V_{850} > 14 \text{ kt}$ y $V_{500} > 14 \text{ kt}$.

Lo complejo del cálculo del este índice se debe a que involucra tres de las condiciones que presentan algunos de los otros índices, a saber; diferencias de temperaturas entre capas bajas y medias, humedad en capas bajas y la cortante del viento asociada entre capas bajas y medias. Para valores cercanos a los 300 o superiores es que la amenaza de tormentas severas aumenta (Miller, 1972).

2.3 Turbulencia del Aire Claro (CAT)

Al tener un perfil de vientos promedio para cada mes, se puede realizar graficas de las áreas que en promedio presentan turbulencia en la vertical de importancia para la aviación. Conocer la presencia de cortantes del viento asegura las maniobras de aterrizaje y despegue cerca de los aeródromos.

Aunque teóricamente se establece que la turbulencia puede tener no solo orígenes dinámicos si no también termodinámicos (OMM, 1969), para fines del presente estudio se considera esta como un fenómeno asociado solo a la cortante del viento (o variación local del vector viento). En otras palabras y en acuerdo con el programa empleado (RAOB 6.1), CAT será la turbulencia dinámica que es función solo de la cortante del viento.

2.4 Depresión de Punto de Rocío

Es la diferencia entre la temperatura del sondeo y la temperatura de punto de rocío (OMM, 2010). Para decodificar del dato DD del sondeo su valor, se considera lo siguiente:

Si DD está entre 00 y 50, su valor es de $DD/10$.

DD entre 51 y 55, no se usa estos valores.

Si DD es > 55 , su valor es de $DD - 50$.

En el Manual de Claves de la Organización Meteorológica Mundial ed-2010, se describe la decodificación de los mensajes TEMP, además de la tabla de cifrado 0777 referente a la depresión del punto de rocío (OMM, 2010).

Respecto a las tormentas eléctricas observadas en Costa Rica, estas presentan los cambios típicos no solo en su intensidad, sino que también diferencias en su evolución; por ejemplo, algunas son aisladas y de corta duración, mientras que otras suelen ser más generalizadas y de mayor duración (Pagen, 1992).

Un aspecto importante en pronóstico de tiempo convectivo severo, y por ende, para determinar el tipo de tormenta posible a desarrollarse en determinado ambiente termodinámico; es el uso de la hodógrafa y las cortantes del viento, las cuales caracterizan a determinados sistemas convectivos (NWSTC, 2000). Ejemplos de las principales hodógrafas

características se presentan en el Anexo 1; además, seguidamente se describen los rasgos principales de la convección profunda típica en Costa Rica.

2.5 Célula convectiva unitaria

Convección de corta duración y con dirección del flujo medio bajo los 8 km. Presente en entornos de baja cortante vertical inferior a 20 kt en los 4 km inferiores (Holton, 2013). En la Figura 2A se aprecia la estructura vertical y el tiempo de duración de una célula convectiva unitaria (COMET Program, 2003-2016); en el caso de la Figura 2B, la imagen satelital del GOES-16 ejemplifica la célula convectiva unitaria mostrando este tipo de tormentas (marcadas en los tres círculos rojos superiores) en la región Zona Norte. En estos tres círculos se marca con flechas el desplazamiento de la célula observada en tiempo posterior, se determina que es la misma célula unitaria debido a un único patrón de flujo predominante de viento modelado con dirección noroeste.

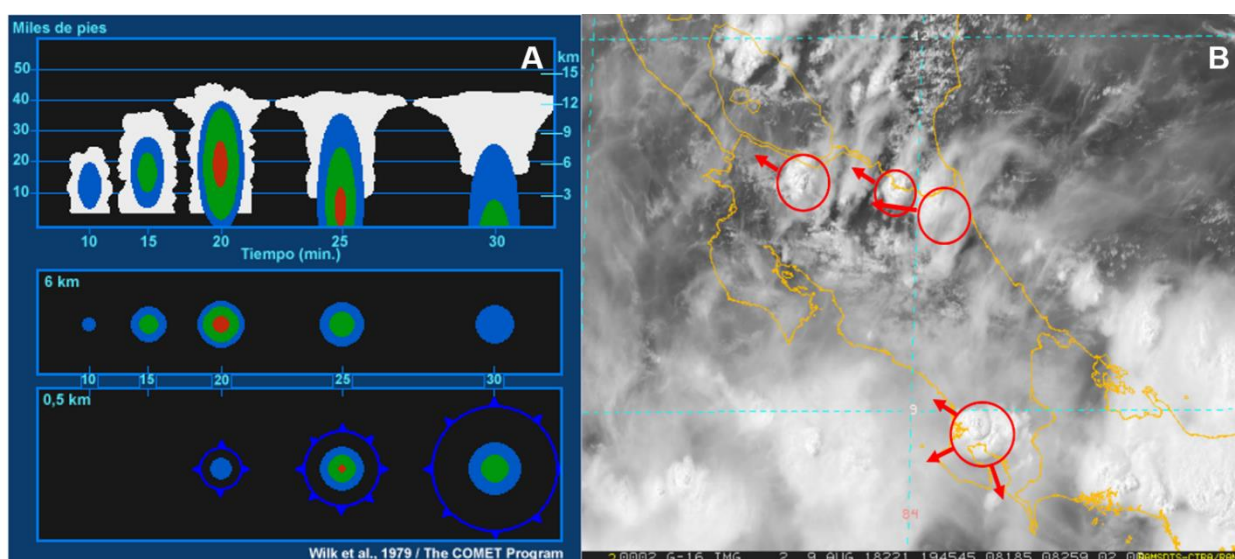


Figura 2: **A)** Estructura de célula convectiva unitaria (Fuente: COMET Program, 2013-2016) y **B)** ejemplo de este tipo de convección en Costa Rica (imagen satelital GOES-16).

2.6 Convección multicelular

El tiempo de vida de la tormenta completa es de varias horas y la generación de nuevas células convectivas es a lo largo del frente de ráfaga de aire frío que asciende el aire condicionalmente inestable. Se presentan en entornos de cortante vertical superior a 20 kt en los primeros 4 km desde la superficie (Holton, 2013). La Figura 3A muestra la estructura vertical y el frente de brisa o bolsa de aire superficial de una tormenta multicelular (COMET Program, 2003-2016); además, en la Figura 3B se presentan dos ejemplos de desarrollos convectivos multicelulares (GOES-16), específicamente uno hacia Golfo Dulce en el Pacífico Sur y otro hacia el noroeste del Valle Central. En estos dos círculos se marca con flechas el desplazamiento y/o la creación de nuevas células observadas en tiempo posterior (la imagen en la Figura 3B es de las 20:45 UTC, es decir una hora después de la hora de la imagen en

la Figura 2B), determinándose que las nuevas células son consecuencia de la anterior debido al patrón de flujo cortante de viento modelado (alisios y brisas marinas) con direcciones contrapuestas primordialmente (este-noreste y suroeste-oeste).

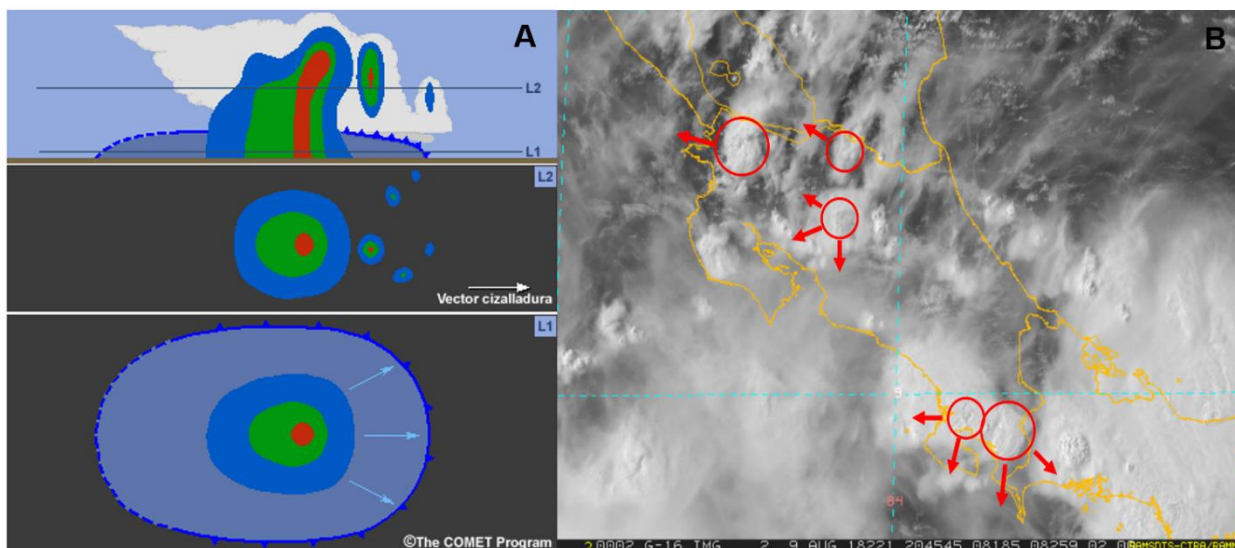


Figura 3: **A)** Estructura convectiva multicelular (Fuente: COMET Program, 2003-2016) y **B)** ejemplo de este tipo de convección en Costa Rica (imagen satelital GOES-16).

2.7 Vector de Movimiento de Tormenta

De acuerdo con unas condiciones iniciales dadas, dirección del viento y su intensidad, se puede estimar la posible dirección de desplazamiento de una tormenta cuando estas condiciones se consideran invariantes en el tiempo. Para esto se utiliza el llamado 'Método Tradicional' incorporado en el programa de sondeos empleado para el estudio (RAOB 6.1) y observable en la gráfica de hodógrafa de la Figura 1.

El método consta en considerar una capa de dirección del flujo desde superficie hasta una altura de 6000 m (\approx 500 mb). El vector representa una desviación angular ajustada de 30° y además un 75% está asociado a la velocidad de dirección del flujo (Davies y Johns, 1993; Maddox, 1976).

Capítulo 3

Datos y Metodología

Desde el año 2012 el Instituto Meteorológico Nacional adquirió el nuevo set de radiosondas meteorológicas (modelo RS41-SG) con las cuales pasa a realizar los lanzamientos de sondeos desde las instalaciones de la Universidad de Costa Rica, en la estación experimental Fabio Baudrit (Latitud Norte 10.00, Longitud Oeste -84.26) ubicada en La Garita de Alajuela.

Se toma para el estudio el periodo de registro de cinco años comprendidos desde el 2013 al 2017 para un total de 1057 sondeos, estos se realizan de lunes a viernes entre las 11 y 12 UTC (5am y 6am hora local). El sondeo recorre la tropósfera hasta llegar a niveles estratosféricos cercanos a los 20 milibares (≈ 27 km) midiendo variables como: presión, temperatura, humedad (depresión de punto de rocío) y viento (magnitud y dirección). Estas variables se registran en los niveles característicos de: Superficie, *1000 mb, *925 mb, 850 mb, 700 mb, 500 mb, 400 mb, 300 mb, 250 mb, 200 mb, 150 mb, 100 mb, Nivel de Tropopausa, 70 mb, 50 mb, 30 mb, 20 mb y 10 mb (dependiendo de la altura particular alcanzada por el globo). Además, datos en niveles significativos a cualquier altura, esto para cambios relevantes en el viento y del propio gradiente de temperatura. Los niveles de *1000 mb y *925 mb no presentan datos debido a la elevación de 840 m.s.n.m. (≈ 917 mb) a la que se encuentra la estación de lanzamiento en La Garita de Alajuela (Figura 1).

Para fines de esta investigación y con el propósito de su uso futuro en pronóstico, se decide tomar los datos solo en los niveles característicos hasta el nivel de 100 mb (≈ 16 km), esta región baja de la atmósfera es donde se desarrollan los principales fenómenos meteorológicos que se relacionan con el diario vivir de la población general. Adicionalmente, es de momento la principal región de estudio y análisis de la meteorología operativa a cargo del pronóstico diario nacional y del pronóstico aeronáutico, en este caso en particular para las labores operativas de la aviación en los aeropuertos internacionales del Área Metropolitana. En el Anexo 2 se da un ejemplo del formato de datos utilizados (mensaje FM 35 - TEMP) y una breve descripción de cómo se decodifica la parte A del mensaje TTAA (OMM, 2010) utilizada para el presente trabajo.

Se procede a promediar los datos para 5 años en los niveles de: 917 mb (Nivel de estación), 850 mb, 700 mb, 500 mb, 400 mb, 300 mb, 250 mb, 200 mb, 150 mb y 100 mb. En la Tabla 1 se presenta el número de sondeos analizados en cada año y en cada mes para el periodo en cuestión.

Tabla 1: Número de sondeos analizados por mes.

Año/Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.
2013	13	20	17	22	22	20	23	22	21	23	21	1
2014	15	20	21	16	21	20	23	21	22	23	20	5
2015	5	20	20	19	21	22	16	19	22	20	21	14
2016	5	21	1	0	0	9	18	23	22	23	24	12
2017	12	20	21	15	22	21	21	23	22	21	21	16
TOTAL	50	100	79	71	86	92	98	108	109	110	106	48

El ploteo de los diagramas *Skew-T Log-P Mensuales Promedio* se realizó por medio del Programa de Observación de Radiosondas (RAOB, por sus siglas en inglés) en la versión 6.1, provisto por el Centro Nacional de Previsión del Tiempo-Servicio Meteorológico Nacional (NCEP-NWS) de los Estados Unidos (en la Figura 1 se muestra un ejemplo del uso del programa para sondeos). Este programa faculta la posibilidad de predecir las condiciones futuras utilizando los datos de viento térmico derivados de los vientos registrados con el sondeo; esto cuando se tiene solo una única estación para pronosticar con sondeos reales. En otras palabras, solo se realiza cambios en el perfil de *Temperatura Ambiente*, manteniendo sin modificación la *Temperatura de Rocío* y el *Perfil de Viento*. Así por ejemplo, es posible obtener estimados de la advección de temperatura horizontal y su dependencia vertical ($\nabla_p T$), conociendo el viento geostrófico (V_g) de la ecuación 11 (ecuación de viento térmico) y en una única localización, o viceversa (Holton, 2013).

$$\frac{\partial \vec{V}_g}{\partial \ln p} = -\frac{R}{f} \vec{k} \times \vec{V}_p T \quad (11)$$

También es posible incorporar otros cambios previamente analizados de las condiciones previstas como, por ejemplo: ingresar datos de cambios en la dirección del viento como el de vientos alisios del noreste a viento del oeste asociado a la brisa marina (Muñoz, Fernández y Gutiérrez, 2002), además de permitir la incorporación de calentamiento superficial propio del ciclo diurno y el humedecimiento de la atmósfera estrechando la depresión del punto de rocío. Estos dos últimos se realizan por medio de la temperatura promedio máxima y del punto de rocío promedio a las 19 UTC (Tabla A3.1 y Tabla A3.2 en Anexo 3).

Con el promedio mensual de la atmósfera para cada mes registrada en los sondeos, se crearon las distribuciones verticales de las variables meteorológicas más representativas para el análisis de estabilidad que a la vez permita describir mejor las características de la atmósfera a lo largo del año. Entre estas están: viento y sus componentes zonal y meridional (u , v), depresión del punto de rocío, humedad relativa, contenido de agua (PWAT) y temperatura potencial equivalente.

Después de calcular un sondeo promedio para cada mes del año, se obtienen los índices de estabilidad atmosférica descritos anteriormente y que son usados para pronóstico local. Estos índices se comparan con el “índice real (IR)” que, en este punto son definidos como, el rango de valores promedio para cada índice en cada uno de los meses y obtenido de cada día que se reportó con actividad eléctrica (tormenta) en la estación aeronáutica del Aeropuerto Internacional Juan Santamaría (IMN, 2016a). Se basa en el criterio de ocurrencia para el cual el índice corresponde a un acierto. La Figura 4 muestra el histograma obtenido del número de casos reportados con tormenta eléctrica para el periodo de años en estudio y que corresponden a un día con lanzamiento de sondeo meteorológico, lo cual es de suma importancia para determinar la variación que presentan los días más inestables a lo largo del año.

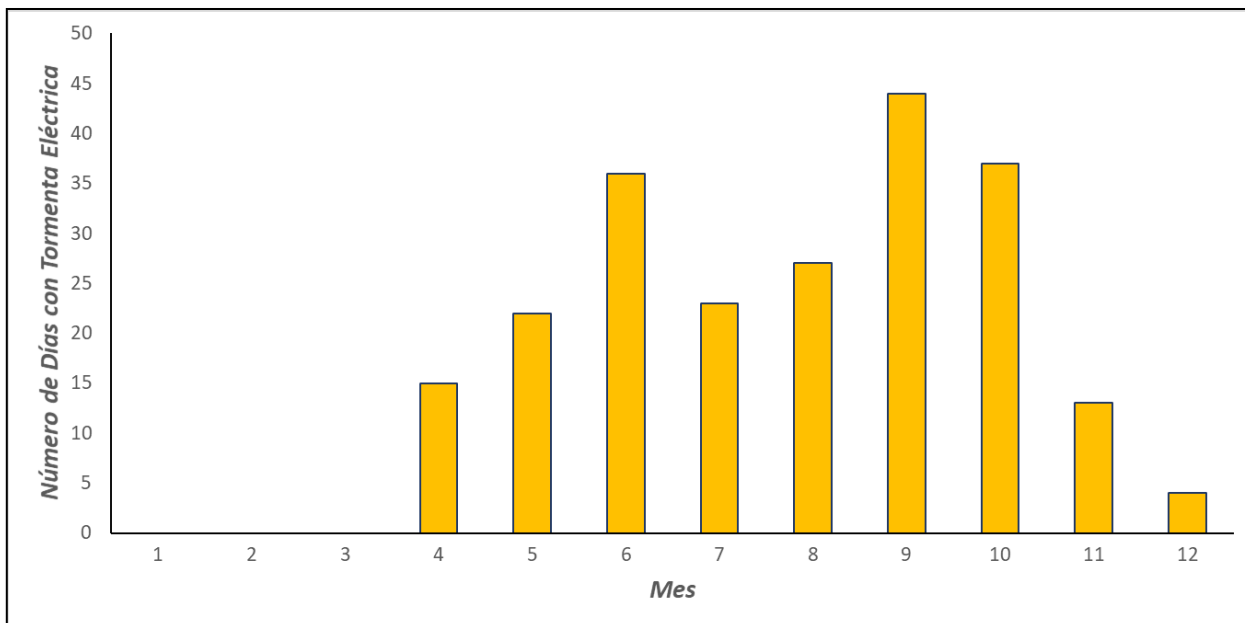


Figura 4: Reporte de casos de días con tormenta eléctrica y que contaban con su respectivo radio-sondeo. Estación Aeronáutica: Aeropuerto Internacional Juan Santamaría. Periodo: 2013 - 2017.

Los meses sobre los cuales se calculan los rangos de variación de los índices son de abril a diciembre, siendo este último mes el que registró menos casos (4 casos), por el contrario, junio, setiembre y octubre los de mayor cantidad de casos (36, 44 y 37 respectivamente), ver Figura 4.

Para determinar los rangos de variación de cada índice para Costa Rica, y en especial para el Gran Área Metropolitana (GAM), lo que se hace es registrar el valor de cada uno de estos índices para los días en los cuales se reporta tormenta; posteriormente estos valores se ajustan a una distribución normal con el menor número de clases posibles para así determinar donde se encuentra la mayor cantidad de datos de la muestra. Como los intervalos de confianza pueden ser establecidos por los valores donde las pruebas estadísticas no están dentro de la región de rechazo (Wilks, 2006), se tomará un intervalo donde al menos se encuentren el 80% de los datos, con el cual se ofrece una estimación mejor de la variación de dichos índices dejando por fuera posible valores atípicos. El registro de reportes de tormenta eléctrica (para todas las intensidades registradas) se toma de los informes locales horarios de la estación aeronáutica ubicada en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría.

Finalmente se comparan los *IR* obtenidos para días reportados con tormenta eléctrica, con los índices obtenidos de los sondeos promedio, con esto se puede determinar qué tan semejantes son ambos valores y establecer cuáles serán los rangos de variación para Costa Rica de estos índices de estabilidad.

Capítulo 4

Análisis y Resultados

A la hora de discutir los resultados y características de cada uno de los sondeos promedio mensuales, se utilizan herramientas descriptivas en las figuras para puntualizar mejor la información documentada, adicionalmente los meses se discuten en pares para que sean afines a las transiciones estacionales en Costa Rica.

Respecto a las suposiciones realizadas para las estimaciones a las 19 UTC de cada mes (pronósticos), se usa el fundamento climático respecto a la dirección del viento predominante del este (oeste) para finales de otoño, invierno e inicio de primavera (finales de primavera, verano e inicio de otoño) documentado en IMN (2016a); además del fundamento teórico-práctico expuesto por Garbanzo (2011) respecto a los sondeos realizados a las 18 UTC, que asocia la persistencia de viento del este (oeste) para los inviernos (veranos) boreales en niveles cercanos a la superficie.

4.1 Sondeos Promedio mensuales

4.1.1 Enero – Febrero

Los meses de enero y febrero son típicos de la estación seca de la vertiente del Pacífico (IMN - CRRH, 2008), con el análisis de los sondeos de estos dos meses se evidencia que ambos se caracterizan por presentar una atmósfera seca desde niveles superficiales de 850 mb hasta niveles altos de la tropósfera rondando los 100 mb, o sea cercanos a la tropopausa ((1) en Figura 5A y Figura 6A). El perfil de viento mostrado para estos dos meses tiene la particularidad de presentar viento del sur y suroeste en niveles superiores a los 500 mb (con velocidad máxima de ≈ 35 kt), junto a viento del este y noreste en niveles inferiores (con velocidad máxima de ≈ 15 kt), lo cual ratifica la presencia de fuerte cortante vertical que disminuye la posibilidad de convección profunda ((2) en Figuras 5A y 6A); esto se ve reflejado en los índices de estabilidad indicados en la Tabla 2, que presentan valores bajos comparados con los demás meses. El viento moderado de 15 kt cerca de la superficie (850 mb) es otro punto que destacar para ambos meses, además del contenido de agua el cual es el más bajo del año con valores que rondan los 2.1 cm (Tabla 2).

Considerando una temperatura convectiva (de disparo) de 27°C para enero y de 28°C para febrero, ambas reportadas en IMN (2016a), como los valores de la temperatura promedio máxima (Tabla A3.1); se pronostican las posibles variaciones en la estabilidad durante horas de la tarde para un día promedio de estos meses, cuando ya el calentamiento superficial de las parcelas de aire más bajas adquieren energía en forma de calor almacenado para estimar el posible ascenso de estas (sondeo mostrado en Figura 5B y Figura 6B). Con lo anterior se observan índices de estabilidad con valores muy bajos como el caso de KI, LI, SWEAT, SI, TT y CT; además, la posibilidad de que en enero y febrero existan valores de CAPE es nula (solo el inhibidor CIN es más probable ((3) en Figura 5B y Figura 6B).

El ascenso desde superficie de las parcelas de aire es un proceso estable (barra azul) en niveles cercanos a la superficie, para luego ser un proceso condicionalmente inestable (barra verde) desde superficie hasta los 350 mb para enero ((4) en Figura 5B) y febrero ((4)

en Figura 6B) respectivamente. Esto lo que indica es que esta inestabilidad es condicional a la saturación de la parcela de aire (Holton, 2013, p.62), lo cual es poco probable que esté involucrada con precipitaciones debido a la poca humedad en la atmósfera para estos meses. Por consiguiente, niveles como CCL y LCL se encuentran a un nivel elevado como para ser alcanzados, aún hasta por ascensos mecánicos.

4.1.2 Marzo – Abril

El mes de marzo presenta una atmósfera que continúa siendo seca en toda su estructura vertical, pero su sondeo promedio nos permite identificar la particularidad de tener una atmósfera levemente menos seca en niveles medios que la presentada por los meses de enero y febrero. La presencia de una significativa cortante del viento y de condiciones de viento acelerado para direcciones del suroeste y oeste en niveles desde 500 mb hasta los 100 mb sigue siendo la constante ((1) en Figura 7A). Se acentúa la no presencia de convección profunda, además de tener un contenido de agua (PWAT, mostrado como 'Water') cercano a los 2.24 cm que es considerado bajo (Tabla 2).

Tabla 2: Principales índices de estabilidad para Sondeos Promedio de las 12 UTC [Intervalo de variación]¹. Periodo de registro de radio-sondeos: 2013-2017.

<i>Índices de estabilidad. Sondeos Promedios</i>															
ÍNDICE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	Mín	Promedio	Máx
<i>K-IX</i>	16.9	15.7	16.1	27.5	30.4	34.7	32.6	32.1	33.6	33.5	32	26.9	27.5	32.1	34.7
<i>LI</i>	6	6	5.4	2.2	1.8	0	0.6	1.1	0.8	0.8	1.9	3.3	0	1.2	2.2
<i>TT</i>	37.2	36.8	37.6	42	42.1	44.8	44.1	43.6	43.9	43.4	41.9	40.4	41.9	43.2	44.8
<i>CT (croxTT)</i>	15.1	14.9	15.3	18.5	18.6	20.5	19.8	19.3	19.8	20.1	19	17.7	18.5	19.5	20.5
<i>SI (Show)</i>	5.2	5.4	5	1.5	1.5	-0.5	0.4	0.8	0.4	0.4	1.5	2.7	-0.5	0.8	1.5
<i>CAPE (tt) [J/Kg]</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>SWEAT</i>	172.6	169.6	169.6	201	193.8	214.8	208.6	198.6	201	205	199.2	198.4	193.8	202.8	214.8
<i>Severity</i>	4.5	4.4	4.4	4.6	4.6	4.5	4.3	4.4	4.6	4.6	4.5	4.3	4.3	4.5	4.6
<i>WATER [cm]</i>	2.19	2.14	2.24	3.07	3.61	4.2	3.84	3.76	4.05	4.08	3.7	3.07	3.07	3.8	4.2
<i>Tc [°C]</i>	37.2	36.7	37	33.5	32.5	30.8	31.4	31.6	30.8	29.6	30.3	33.5	29.6	31.3	33.5
<i>Fog Threat</i>	13.3	13.5	13.3	8.9	7.9	6.7	7.5	7.7	7	6.2	6.8	8.6	6.2	7.3	8.9
<i># Días de TS (GAM)</i>	0	0	0	15	22	36	23	27	44	37	13	4			

En el caso del mes de abril (considerado de transición entre la época seca y lluviosa de las cuencas con influencia del clima tipo Pacífico, IMN - CRRH, 2008), presenta una condición ligeramente de más humedad en niveles de la tropósfera baja y en los niveles de la tropósfera alta ((1) en Figura 8A). Viento aún del sur y suroeste en niveles de los 400 mb a 150 mb, pero de menor intensidad (≈ 20 Kt) que los presentados en los primeros 3 meses del año (Figura 8A). La inestabilidad medida con los índices (KI, TT, CT, LI) muestra un leve aumento con temperaturas más elevadas o cercanas al límite inferior (valor *Mín* de T_c en Tabla 2), asociados con la formación de nubes cúmulos que provocan la presencia de chubascos con tormenta eléctrica ((2) en Figura 8A), así como un contenido de agua superior a la de los tres meses anteriores (enero, febrero, marzo) y reflejada en el valor de PWAT en aumento (Water) que ronda los 3.07 cm (Tabla 2).

¹ [Mínimo, Promedio, Máximo].

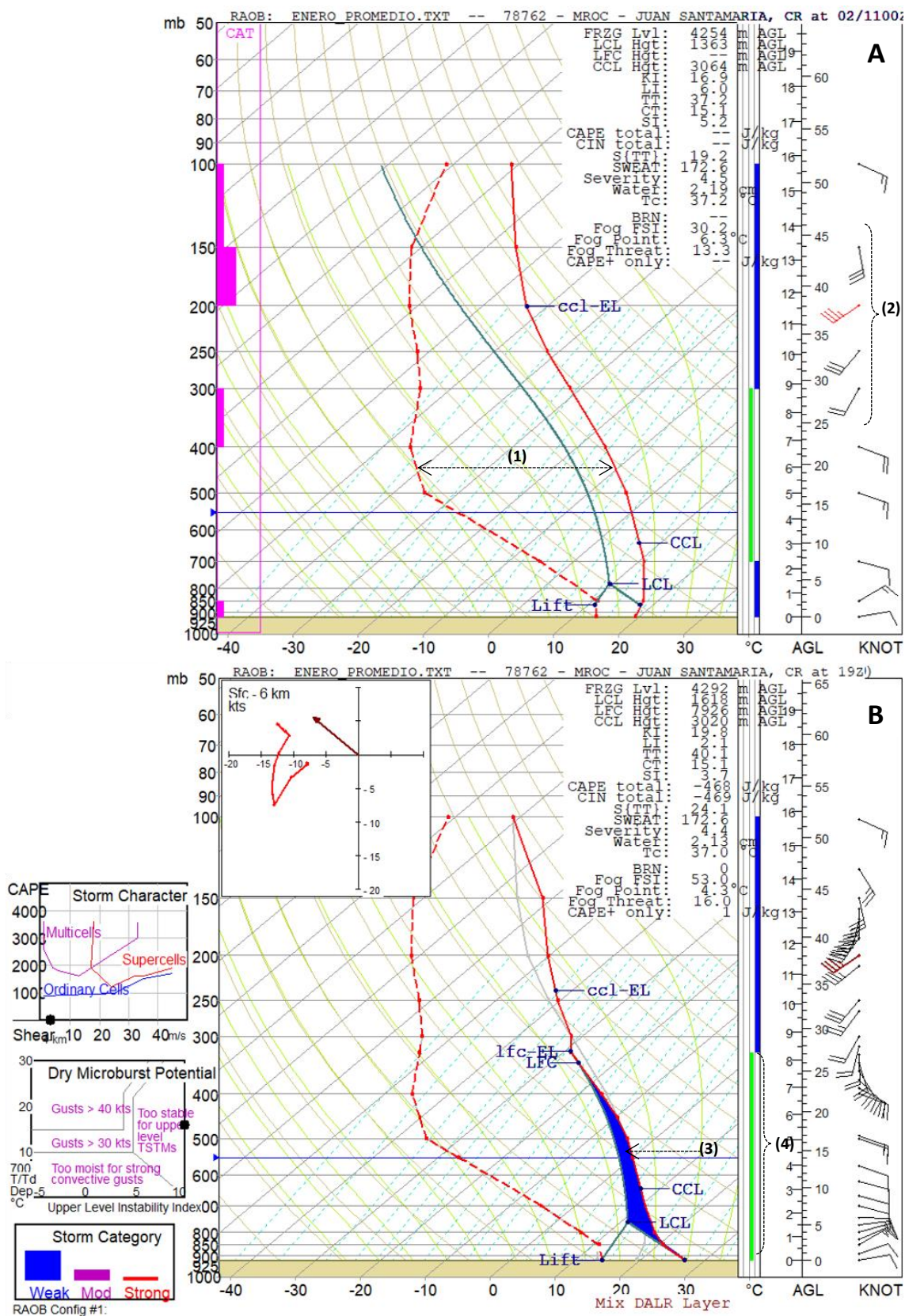


Figura 5: Sonda Promedio (A) y Pronosticado (B) para el mes de ENERO.

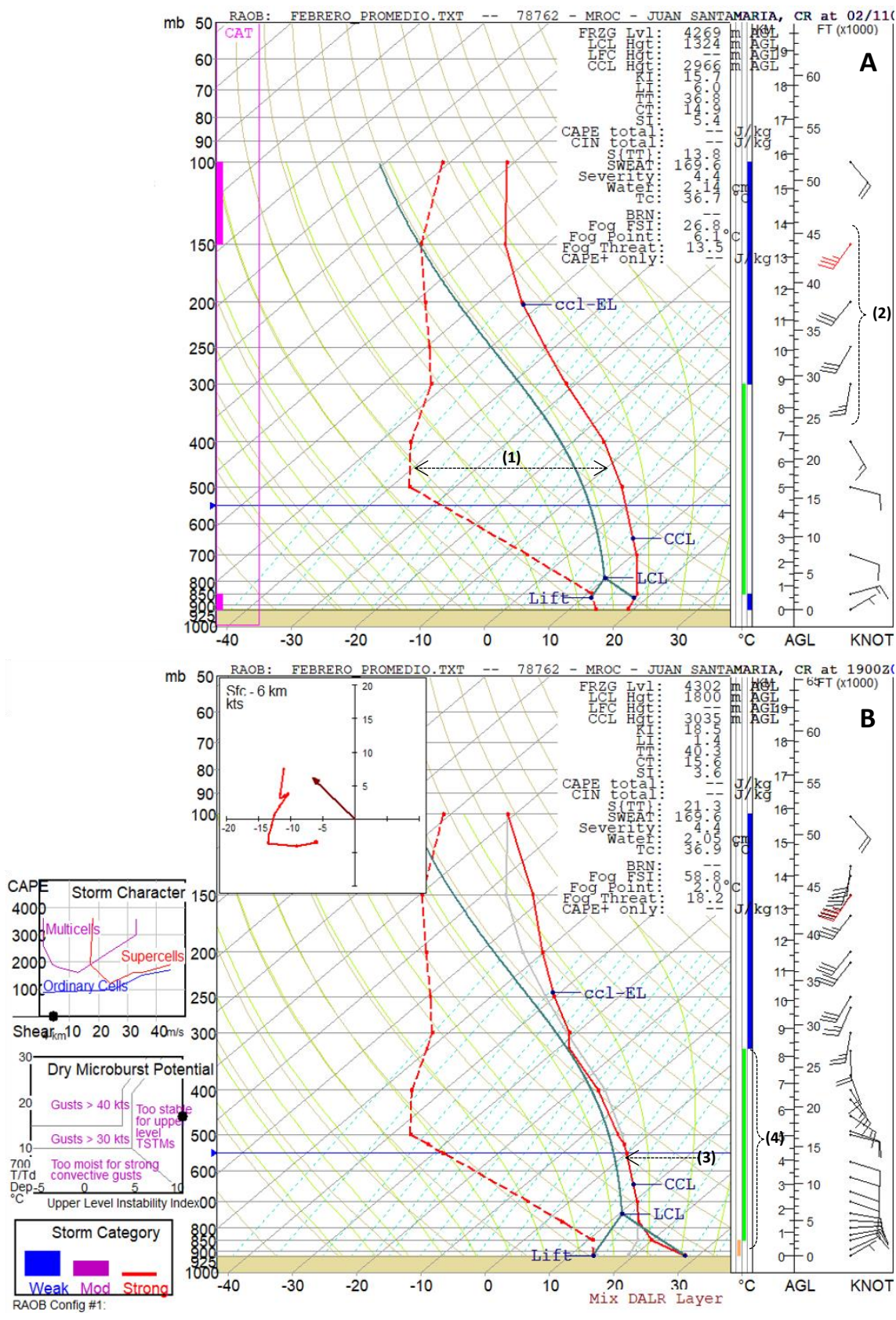


Figura 6: Sonda Promedio (A) y Pronosticada (B) para el mes de FEBRERO.

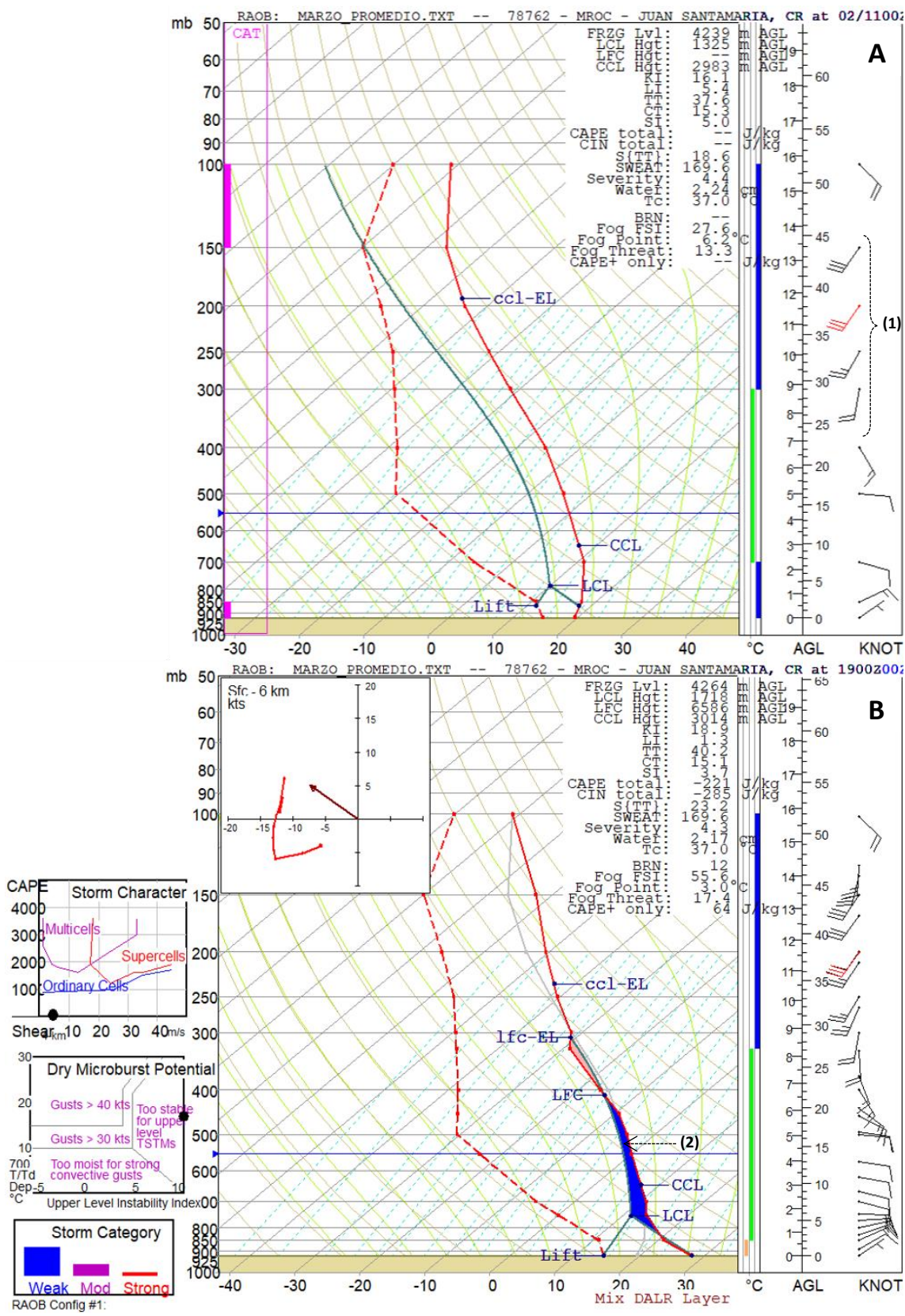


Figura 7: Sondeo Promedio (A) y Pronosticado (B) para el mes de MARZO.

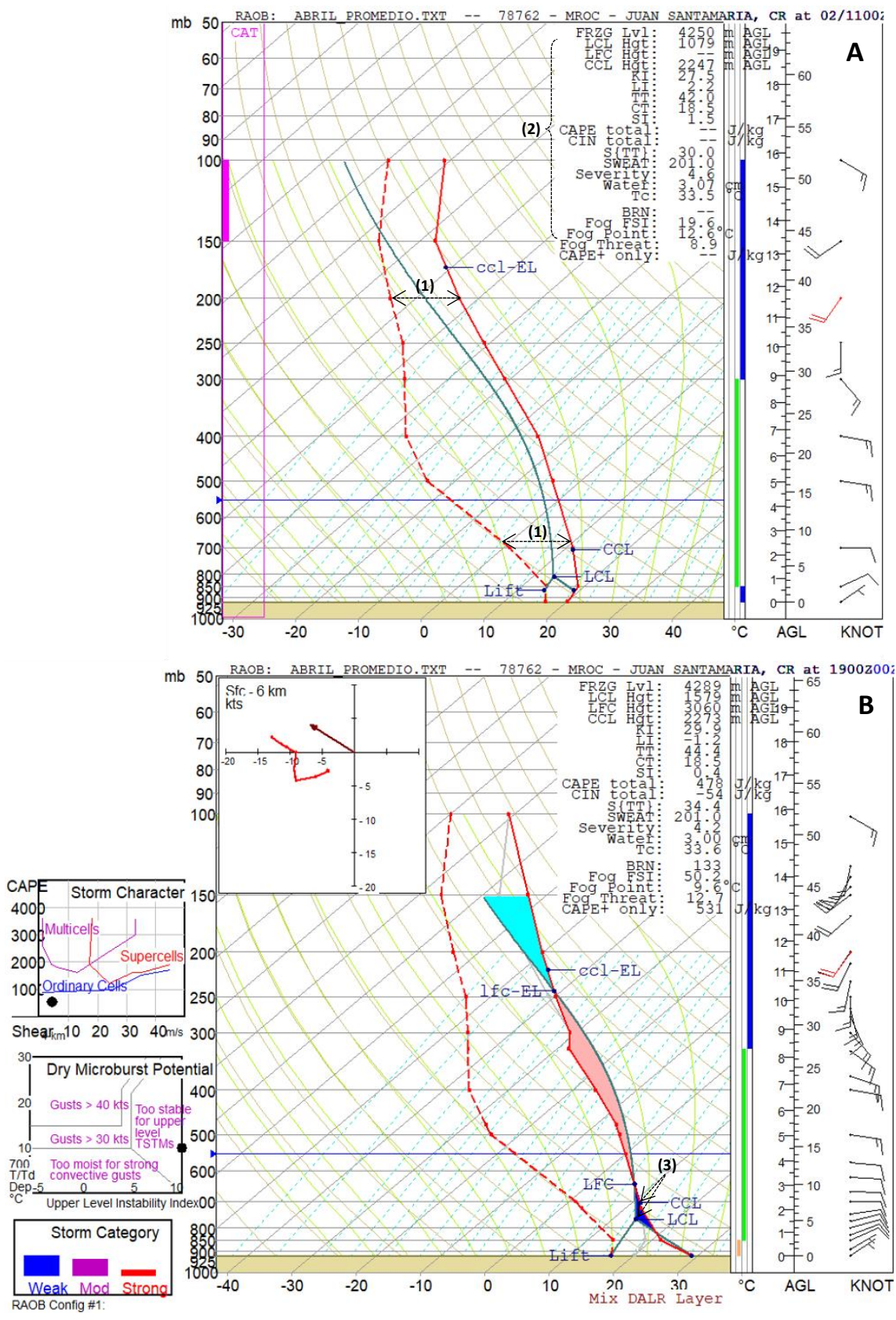


Figura 8: Sondeo Promedio (A) y Pronosticado (B) para el mes de ABRIL.

En el caso del pronóstico estimado para los dos tipos de patrones atmosféricos de estos meses, se utilizan las temperaturas promedio máximas correspondientes a 28°C para marzo y 29°C para abril (Tabla A3.1 y A3.2). En el caso de marzo se observa su característica atmósfera seca y estable, presenta índices altos del inhibidor CIN desde superficie hasta alrededor de los 400 mb ((2) en Figura 7B). Desde ese nivel es que se presenta una pequeña capa de valor CAPE de tan solo 100 mb extendiéndose hasta alrededor de los 300 mb. El índice SWEAT es el único que presenta un ligero aumento y como resultado estas características se asocian a una tendencia baja de que se presente alguna lluvia y tendría la característica de ser aislada; los demás índices se mantienen dentro de un rango asociado a baja probabilidad de actividad convectiva.

Como es típico de un mes de transición, las curvas de temperatura ambiente y temperatura de punto de rocío se encuentran aún separadas entre sí, pero a pesar de ello, una atmósfera un poco más inestable y con una energía potencial convectiva más evidente es reflejada en el pronóstico presente en la Figura 8B. Además, los niveles de CCL y LCL ((3) en Figura 8B) están cerca del LFC e inferiores a los 700 mb, por otro lado índices como KI de 29.9, LI de -1.2, TT de 44.4 y el índice SWEAT ya superior a los 200, muestran condiciones propicias para la posibilidad de actividad convectiva en forma de chubascos acompañados por algunas tormentas eléctricas (Figura 8).

4.1.3 Mayo – Junio

Los meses de inicio de la época lluviosa para la vertiente del Pacífico ((1) en Figura 9A y Figura 10A), están caracterizados dinámicamente por la persistencia en promedio de viento del este en toda la capa troposférica (ausencia de cortante de niveles medios y altos) con valores que rondan los 10 kt en niveles medios. Viento moderado del este se observan en niveles altos entre los 300 mb y 150 mb en ambos meses, lo que facilita la ventilación de sistemas convectivos más profundos (≈ 20 kt).

El patrón de atmósfera encontrado de mayor humedad para mayo y junio, presenta un contenido de agua precipitable promedio de 3.61 cm y 4.2 cm respectivamente (Tabla 2); además, los índices de estabilidad denotan condiciones inestables desde tempranas horas de la mañana, que es cuando se realiza el sondeo meteorológico ((2) en Figura 9A y Figura 10A). Los puntos del sondeo llamados LCL y CCL se encuentra ahora más bajos que los registros de enero a abril, pasando de niveles cercanos a los 650 mb y 800 mb, a niveles de 700 mb y 875 mb respectivamente (Figura A4.6).

El pronóstico de mayo de la Figura 9B empleando una temperatura de disparo de 28°C, lleva el valor de índices como el KI, TT, CT y SI, a valores dentro del rango de posibles chubascos con tormentas eléctricas dispersas. La presencia de un elevado CAPE ((3) en Figura 9B) es otra característica del mes (997 J/Kg). La brisa húmeda del Océano Pacífico, que disminuye la depresión del punto del rocío en superficie, es otro aspecto incorporado en el pronóstico de la Figura 9B (4). En suma, la convección del tipo célula ordinaria es la desprendida del modelo para ambos meses.

En el caso de junio, se presenta una temperatura de disparo media de 27°C y en semejanza al mes de mayo, se observa la presencia de brisa húmeda del Océano Pacífico en niveles superficiales ((3) en Figura 10B). En el caso del CAPE (4), este es más elevado que el mes anterior (1267 J/Kg) y los niveles LCL y LFC están alrededor de los 800 mb ((5) en Figura 10B), lo que se puede considerar un valor bajo que fácilmente permite la convección.

4.1.4 Julio – Agosto

La distribución vertical de la temperatura ambiente y la temperatura del punto de rocío para estos dos meses es semejante a la presentada para el mes de junio y a la vez, se observa menos estrecha que la presentada para los meses posteriores. Estos sondeos promedio reflejan la típica característica en el patrón de vientos de la época lluviosa, viento del este – sureste primordialmente, aunque más acelerados en comparación con los demás meses de esta época (≈ 15 a 20 kt), lo cual está en correspondencia con lo expuesto por Amador (1998) respecto al máximo aceleramiento del Jet de Bajo Nivel del Oeste del Caribe sobre el istmo centroamericano ((1) en Figura 11A y Figura 12A). Por otro lado, los índices en su mayoría reflejan inestabilidad desde tempranas horas de la mañana, destacándose la particularidad en que el contenido de agua de ambos meses disminuye respecto al mes anterior, con valores de 3.84 cm para julio y de 3.76 cm para agosto.

El patrón de modelado vespertino de la atmósfera correspondiente a julio y agosto, utiliza una temperatura de disparo de 27°C ((2) en Figura 11B y Figura 12B) la cual es inferior a la utilizada en los primeros meses de época lluviosa, debido al hecho de tener un aceleramiento del viento en niveles cercanos a la superficie, con posibles incursiones de nubosidad proveniente del sector Caribe a algunos sectores del Valle Central, inclusive bajando en ocasiones la sensación térmica para dichos meses. A pesar de lo anterior, la inestabilidad reflejada en los índices es mayor a la exhibida por los meses iniciales de la temporada lluviosa del Pacífico ((3) en Figura B de ambos meses).

Al ir aumentando la inestabilidad y por ende los valores del índice CAPE ((4) en Figura 11B y Figura 12B), se hace más evidente la posibilidad de tormentas eléctricas características del tipo multicelulares; caso contrario a lo presentado hasta el mes de junio donde el modelo lo que describe es mayor probabilidad de células ordinarias. El patrón de vientos visiblemente acelerados desde niveles bajos a medios (800 mb – 400 mb) facilita el aumento de inestabilidad para estos meses, esto según lo expuesto por Holton (2013, p.306) donde la presencia de cortante moderada (20 a 40 kt) para niveles bajo los 700 mb, favorece la formación de tormentas multicelulares.

Se debe destacar que este aumento del viento se ve muchas veces reflejado en la no ocurrencia de la brisa del suroeste en regiones del Valle Central y del Pacífico Norte, especialmente por el aceleramiento del viento a sotavento debido a su interacción con los pasos de montaña (Muñoz et al., 2002); por tanto, la inestabilidad vespertina de estos meses podrá no verse traducida en actividad convectiva o tormentas eléctricas.

4.1.5 Setiembre – Octubre

El patrón de atmósfera promedio más húmeda de todo el año se encuentra en setiembre y octubre (Figura 13A y Figura 14A). Una característica común es una evidente saturación promedio en el nivel de superficie, acentuando fuertemente la inversión superficial de capa límite ((1) LCL bajo en figuras A), lo que facilita la formación de nieblas de radiación para estos meses (IMN, 2016a). Semejante a los anteriores meses de época lluviosa en la vertiente Pacífico, existe la presencia de viento del este en toda la capa, pero con la variante de ser de intensidad moderada (≥ 15 kt) solo a niveles superiores de los 400 mb ((2) en Figura 13A y Figura 14A). Al igual que se presentó en junio, los valores del contenido de agua disponible en la atmósfera son los mayores registrados para los sondeos promedio, estos rondan los 4.0 cm para ambos meses (ver “Water” en Tabla 2).

El pronóstico estimado a partir del sondeo promedio para setiembre (ver (3) en Figura 13B) utiliza una temperatura de disparo de 27°C y a una disminución de la depresión de punto de rocío en superficie (20°C), estos valores producto de la entrada de la brisa húmeda proveniente del Océano Pacífico (Anexo 3). Estas condiciones generan para horas de la tarde que los índices de estabilidad aumenten, reflejando condiciones más inestables (KI, LI, TT, CT, SI, SWEAT) y una mayor energía potencial convectiva disponible (CAPE = 1822 J/Kg), la cual favorece la posibilidad de convección multicelular para este mes (ver (4) en Figura 13B). Junto a los meses de junio y agosto, setiembre es el mes con el nivel de equilibrio (EL) más alto en la troposfera, el cual ronda los 200 mb e inclusive superior a esta altura (ver (5) en Figura 13B).

En el caso de la proyección vespertina para el mes de octubre se utiliza una temperatura de disparo de 26°C ((3) en Figura 14B), la cual es inferior a la utilizada en todos los meses de época lluviosa, debido al hecho de tener la atmósfera más húmeda y saturada del año, situación que permite la formación de nubosidad a horas más tempranas (inclusive nieblas en horas de la mañana). Además, la ocurrencia de brisa del suroeste también por las mañanas provoca que disminuyan las temperaturas y, por tanto, limita el calentamiento diurno el cual presenta generalmente un máximo entre 10 am y 1 pm (IMN, 2016a).

Con la temperatura de disparo de 26°C y una disminución de la depresión de punto de rocío provocada por la brisa húmeda del Océano Pacífico, se establece una atmósfera inestable semejante a la del mes de setiembre. La variante que se genera es la de un valor inferior del índice CAPE (1111 J/Kg) respecto al mes anterior, por lo que la actividad convectiva cambia de ser del tipo multicelular en setiembre, a ser de célula ordinaria de acuerdo con el modelo empleado ((4) en Figura 14B).

4.1.6 *Noviembre – Diciembre*

El mes de noviembre conocido como la transición de fin de época lluviosa e inicio de la época seca, presenta la misma característica que el mes de transición que marca el inicio de la época lluviosa (abril), a saber; una atmósfera húmeda en niveles bajos y niveles altos, con la presencia de una zona levemente más seca en niveles medios ((1) en Figura 15A). La diferencia con abril es que noviembre es, en términos generales, más húmedo y con un patrón de vientos del este que se mantiene en toda la capa troposférica, mientras que en abril persisten los vientos suroestes en altura ((2) en Figura 15A).

Por otra parte, diciembre presenta el patrón típico de una atmósfera más seca y estable. Las curvas de temperatura y punto de rocío son cercanas (húmedo) en superficie y separadas (seco) hacia niveles medios y altos, con la diferencia de que esta humedad en superficie es mayor que la observada en los tres primeros meses de inicio de año ((1) en Figura 16A). La distribución del viento en la vertical y hacia niveles altos (300 – 100 mb) es del suroeste a oeste, con un máximo promedio de 30 kt ubicado cerca a los 200 mb (ver (2) en Figura 16A). Valores de índices de estabilidad bajos, pero con un contenido de agua disponible que se mantiene alto (3.07 cm) como se observa en la Tabla 2.

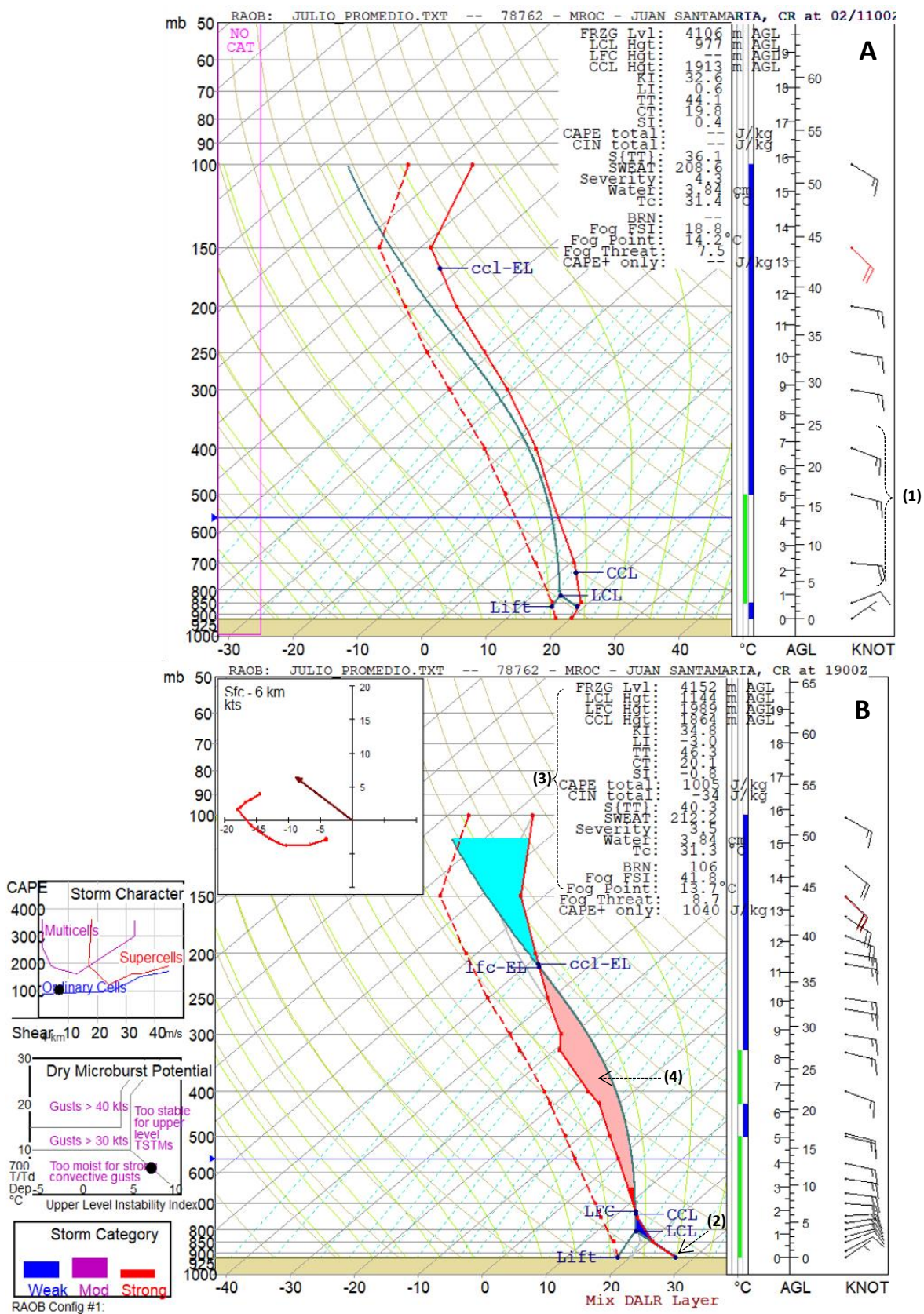


Figura 11: Sondeo Promedio (A) y Pronosticado (B) para el mes de JULIO.

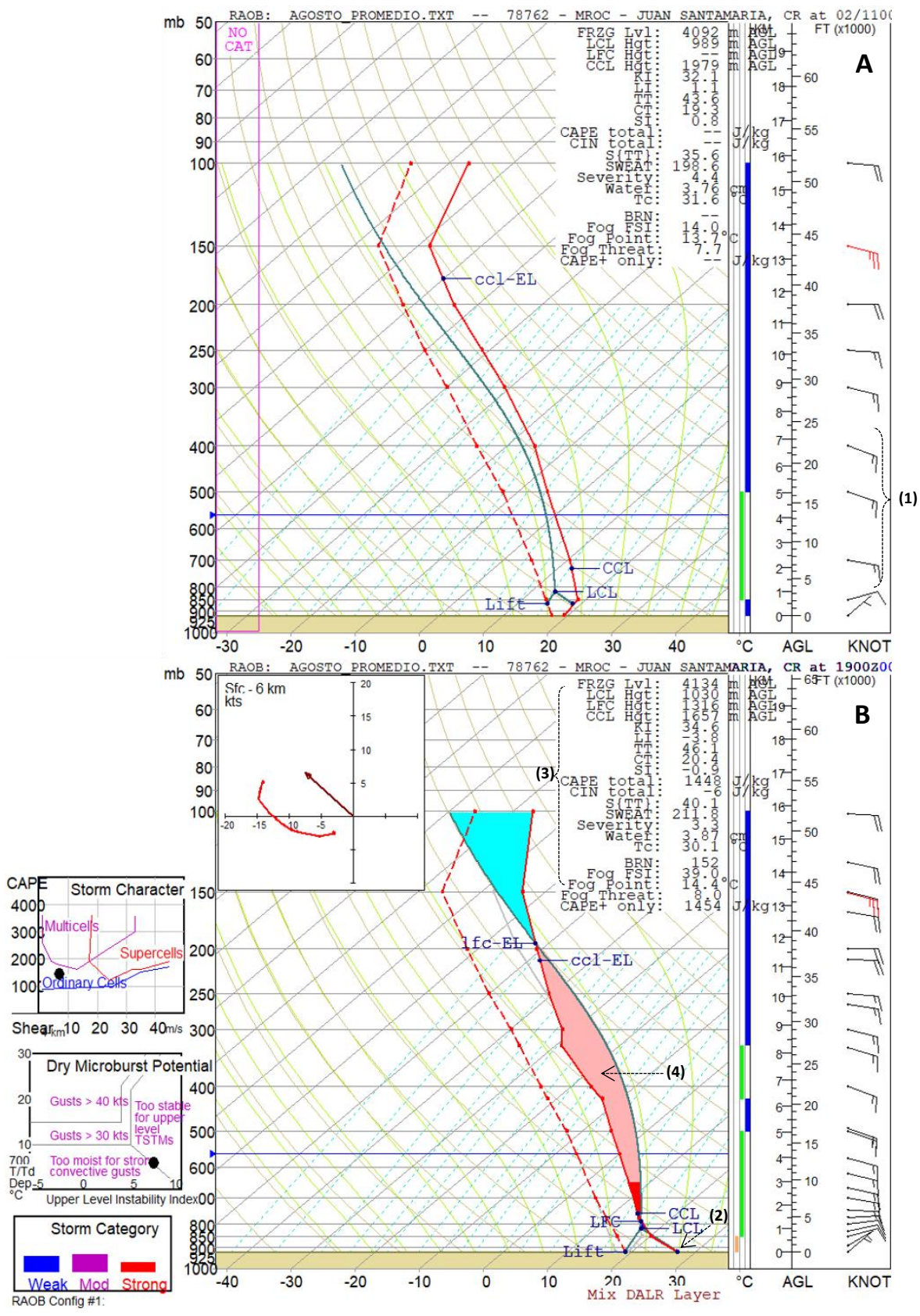


Figura 12: Sondeo Promedio (A) y Pronosticado (B) para el mes de AGOSTO.

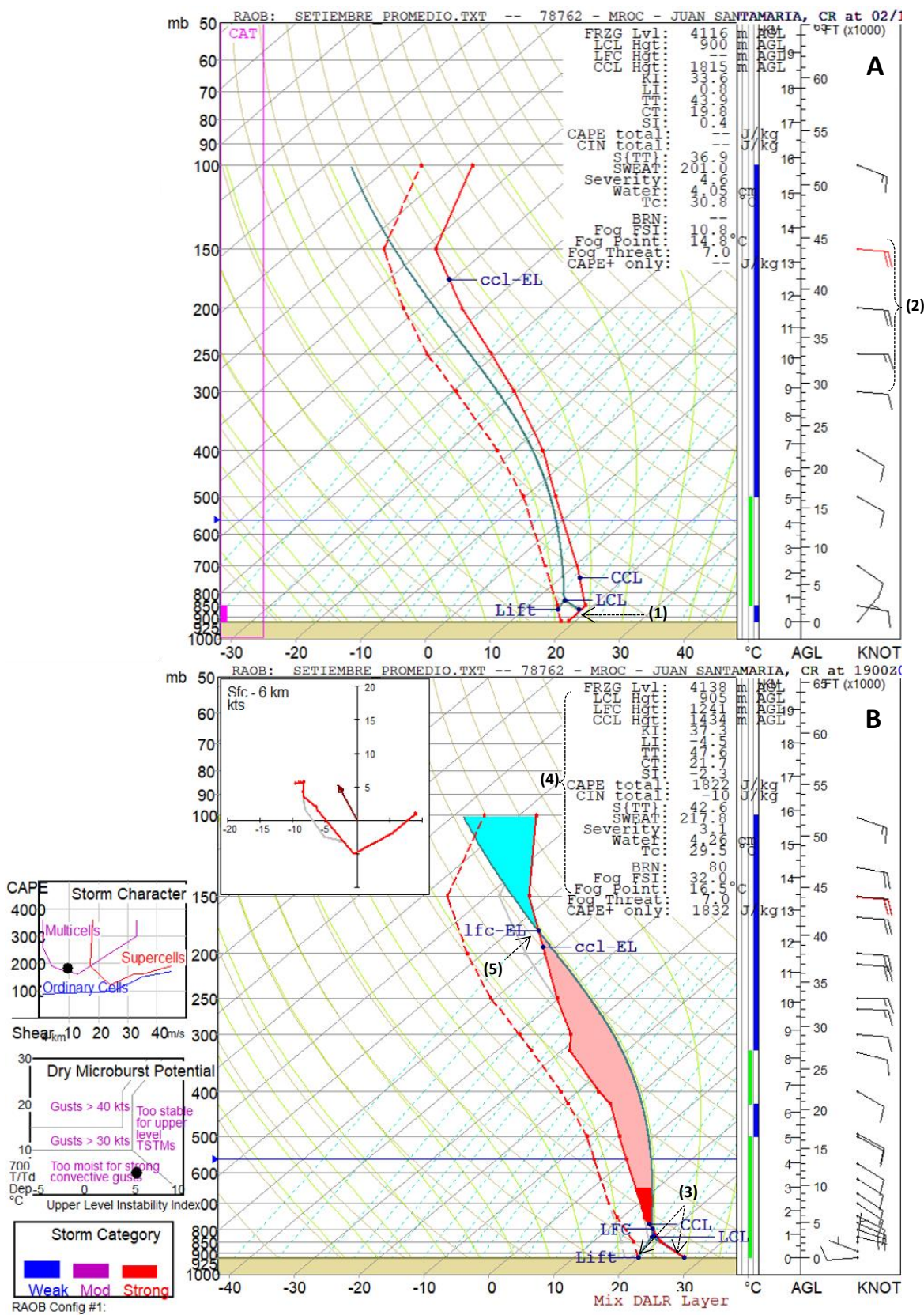


Figura 13: Sondeo Promedio (A) y Pronosticado (B) para el mes de SETIEMBRE.

La proyección para horas de la tarde del mes de noviembre, con temperatura de disparo de 26°C ((3) en Figura 15B) indica que, al igual que los meses de época lluviosa de la vertiente Pacífico, la inestabilidad y contenido de agua (3.7 cm) son altos. Al utilizar una temperatura de disparo baja de 26°C se genera un menor valor de CAPE (643 J/Kg) que el desarrollado para el mes de octubre (1111 J/Kg), esto producto de las condiciones de menor humedad, aumento del viento en niveles medios (generando cortante) y una depresión de punto de rocío más amplia para este mes de transición ((4) en Figura 15B). Por lo anterior es que el modelo empleado predice para noviembre tiempo convectivo del tipo celular ordinario.

En el caso de diciembre (temperatura de disparo de 27°C) se eleva el nivel de convección por elevación, el nivel convectivo y el libre (LCL, CCL y LFC respectivamente) disminuyendo la posibilidad de tener convección profunda, hasta inclusive dejándolos imposibles de alcanzar por parte de las parcelas como lo evidencia el LFC a 500 mb (ver (3) en Figura 16B). El valor del CAPE es bajo inclusive cercano al inhibidor de convección denotado por el índice CIN ((4) en Figura 16B). Diciembre presenta el patrón de cortante propio de la época seca, un contenido de agua disponible que aún en este mes se mantiene alto, además el KI, TT, CT y SWEAT presentan valores indicativos de mayor posibilidad de convección, pero se identificaría como dispersa (Tabla 2).

Con el objetivo de facilitar la visualización y comparación entre meses, se crea la Figura 17 y Figura 18, donde se observan en conjunto los sondeos promedio sobre la atmósfera de Costa Rica a las 12 UTC y los sondeos pronosticados a las 19 UTC (respectivamente), a partir de esta atmósfera matutina promedio. En otras palabras, sería tener la representación de la atmósfera costarricense promedio mensual en horas de la mañana y también la promedio para horas de la tarde, cuando la misma es convectivamente inestable producto de un típico calentamiento diurno y la humedad en la vertical característica de cada mes.

Unas de las principales características marcadas en los sondeos promedio de la Figura 17 son las separaciones entre las líneas de temperatura ambiente y temperatura de punto de rocío (fecha negra horizontal de enero a abril junto a diciembre), denotando una atmósfera seca. Además, se señala como los niveles de condensación por elevación y condensación convectivo (CCL) bajan cada vez más, acercándose más a la superficie (círculos rojos de mayo a noviembre).

Con respecto a la Figura 18, en esta se resalta el viento fuerte del suroeste y oeste de niveles medios y altos, los cuales generan una importante cortante inhibidora de convección (rectángulos rojos de enero a abril sumado a diciembre). Por otro lado, se marca la constante evolución de la inestabilidad atmosférica por medio del ascenso de parcelas cada vez más inestables, denotadas con mayores áreas CAPE (flechas negras hacia la derecha de abril a noviembre). Para estos mismos meses se observa el vector desplazamiento de tormenta para una atmósfera promedio, el cual predomina con direcciones hacia el noroeste (recuadros negros en margen superior izquierdo).

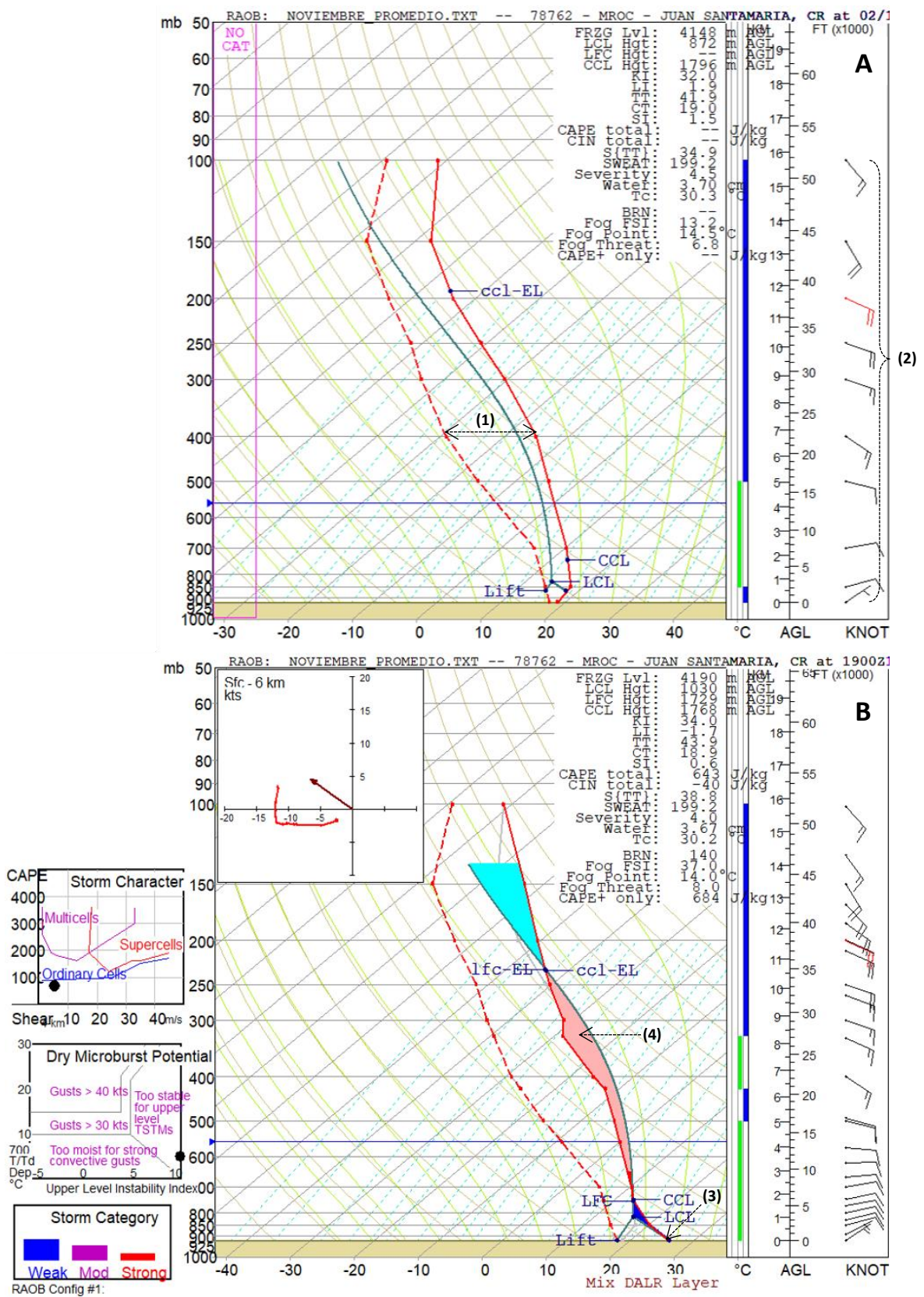


Figura 15: Sondeo Promedio (A) y Pronosticado (B) para el mes de NOVIEMBRE.

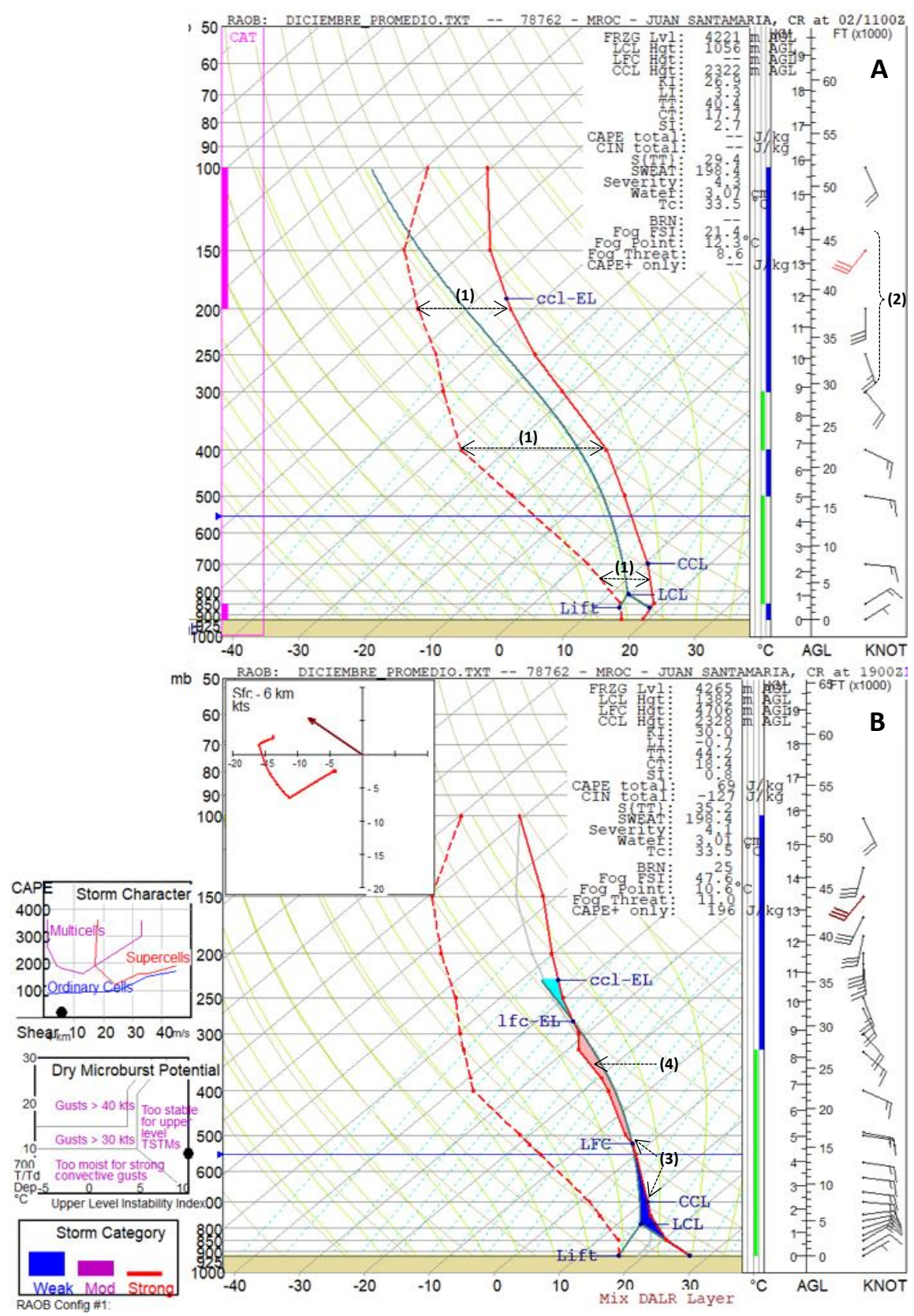


Figura 16: Sonda Promedio (A) y Pronosticado (B) para el mes de DICIEMBRE.

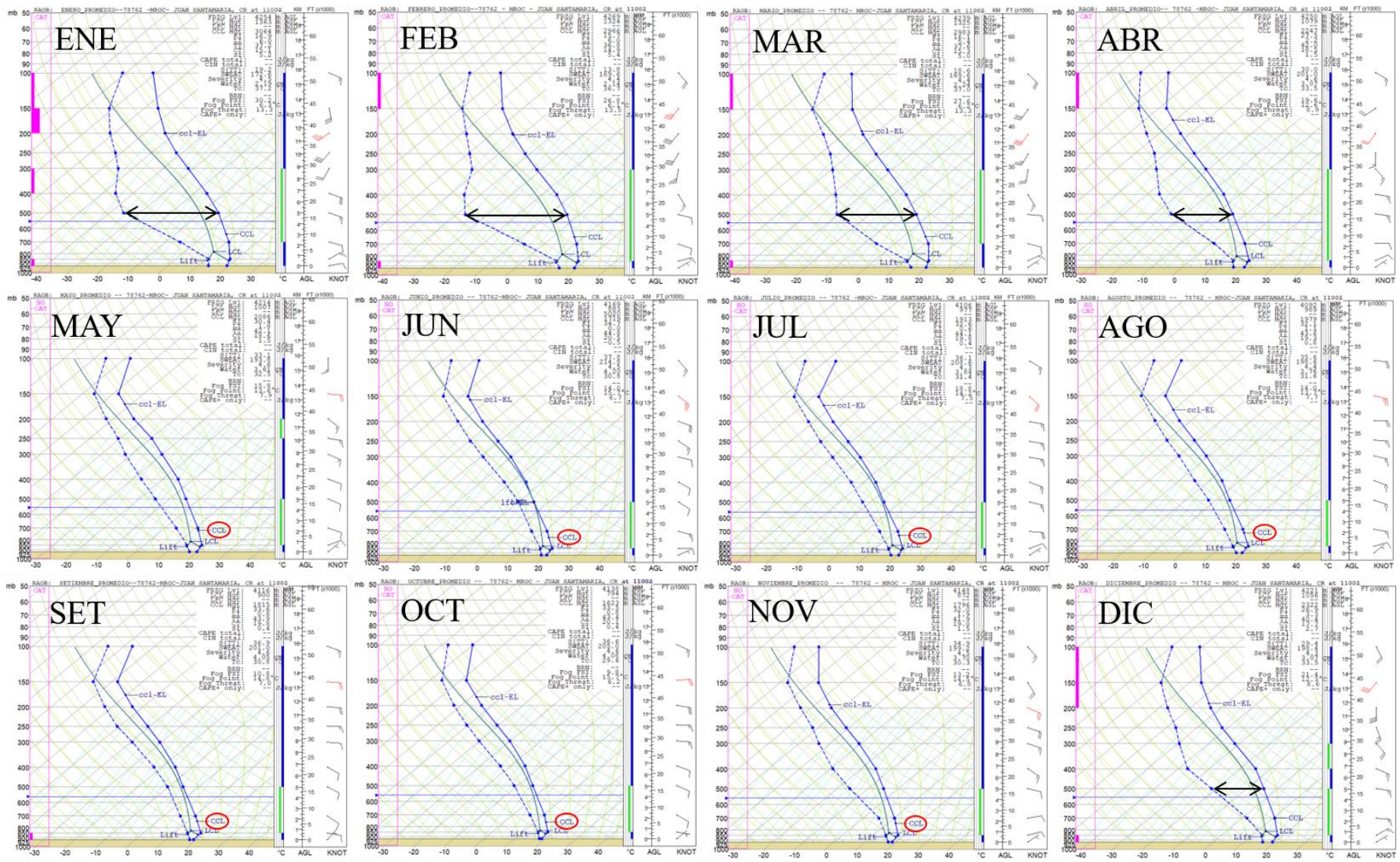


Figura 17: Sondeos promedio mensual sobre la atmósfera de Costa Rica para las 12 UTC. Periodo 2013-2017.

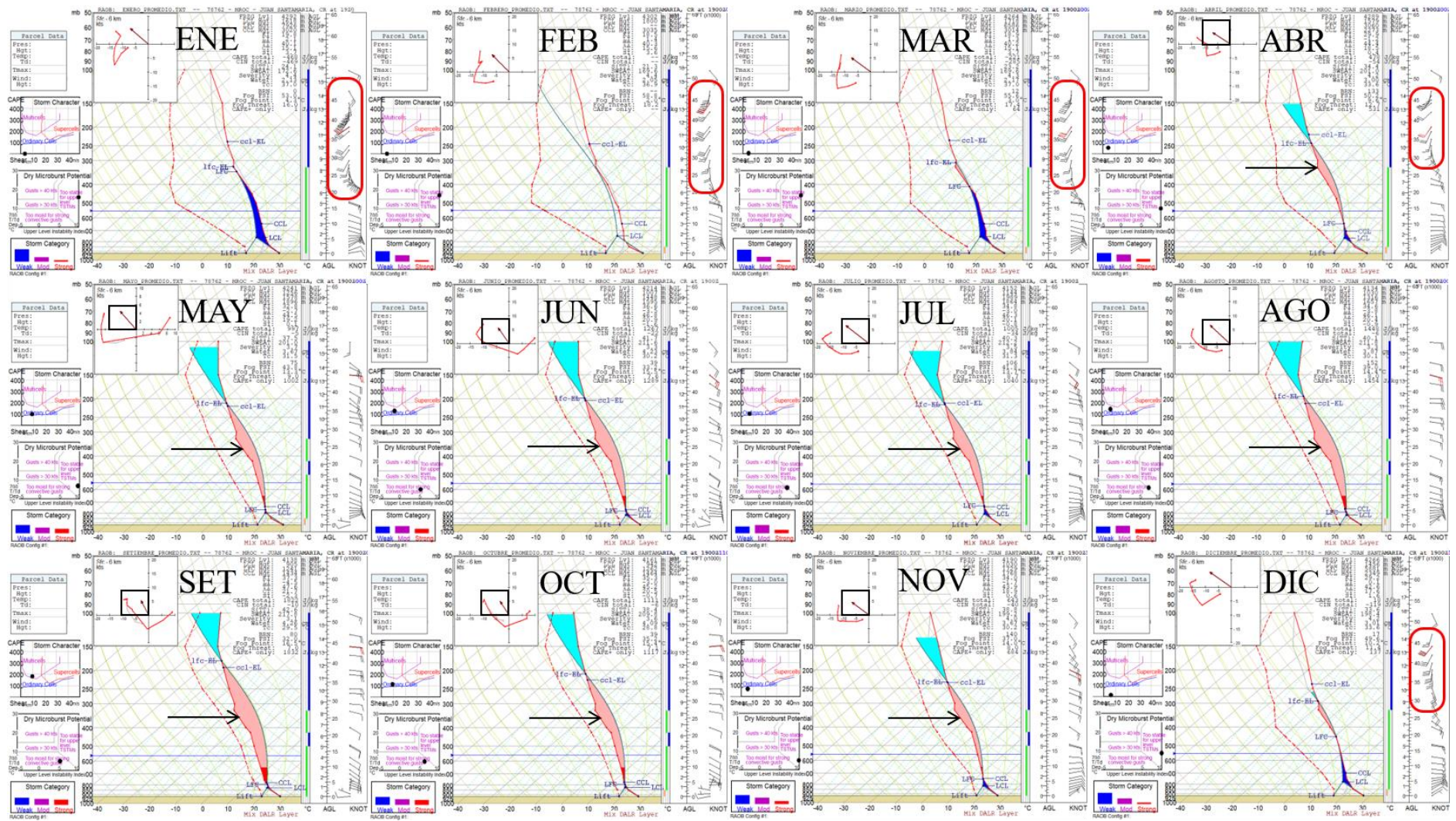


Figura 18: Sondeos pronosticado mensual sobre la atmósfera de Costa Rica para las 19 UTC. Periodo 2013-2017.

4.2 Promedios mensuales de variables meteorológicas en la vertical

La distribución vertical del viento que se observa en la Figura 19 describe con mayor detalle las direcciones predominantes y velocidades promedio a lo largo del año. Al igual que en los sondeos, se detecta más claramente el fuerte patrón de suroestes en altura durante el invierno y en el primer mes de la primavera boreal, con valores que rondan de los 25 kt a 35 kt. El resto de la primavera, todo el verano e inclusive en el otoño boreal, se dan predominantemente vientos del este que no superan los 15 kt en promedio. Solo en altura (arriba de los 200 mb) el viento del este está ligeramente más fuerte con valores desde los 15 kt a los 25 kt. Por otro lado, se observa claramente el periodo conocido como la canícula (Magaña, Amador y Medina, 1999), donde se aceleran los vientos entre los meses de julio y agosto, que primordialmente para este estudio se observan entre el nivel de 850 mb hasta los 500 mb (Figura 19) debido a los niveles empleados en el promediado y a la ubicación de la estación de lanzamiento a sotavento de las montañas del Valle Central. Un mejor detalle de este aceleramiento canicular se observa en la Figura A4.1, donde se realiza el mismo corte vertical mensual hasta los 300 mb, proyectado a las 19 UTC donde se incorporan algunos cambios en los vientos superficiales.

Las componentes zonal y meridional del viento se presentan en Figura A4.2 y Figura A4.3 del Anexo 4, donde se destaca el predominio del viento del este en la mayor parte del año; viento del sur y oeste solo para meses de invierno y primeros dos meses de primavera boreal desde mediana tropósfera hasta la tropopausa. Por otro lado, las regiones donde es posible la presencia de CAT de importancia en aviación, debido a la cortante del viento promedio se muestran en la Figura A4.4, las cuales son: de diciembre a marzo en superficie y de diciembre a mediados de abril en niveles de 200 mb hasta la tropopausa.

Respecto a la depresión del punto de rocío (Figura 20), presenta la característica de tener valores altos ($> 20^{\circ}\text{C}$) en época seca y en los meses de transición desde los 650 mb hasta los 250 mb. Lo anterior denota una atmósfera muy seca en toda la troposfera media y alta para estos meses. Por el contrario, rangos de variación inferiores a los 10°C son presentes para los meses de mayo a octubre.

La depresión del punto de rocío está relacionada estrechamente con la humedad relativa que se observa en la Figura 21, donde valores del 70% o más se presentan desde la superficie hasta los 850 mb para épocas de diciembre a marzo, posteriormente se ensancha esta capa húmeda y logra alcanzar los niveles medios de 500 mb en los meses de junio, setiembre y octubre (generando una distribución bimodal a lo largo del año). Lo anterior concuerda con valores altos (bajos) de depresión del punto de rocío para época seca y transición (época lluviosa) de la vertiente Pacífico.

Aunque la humedad relativa alcanza niveles considerables en las estaciones de verano y otoño boreal, el contenido de agua en la atmósfera se limita a capas bajas y medias de la troposfera. Por ejemplo, valores de contenido de agua de 1 cm a 2 cm se dan en aumento desde la superficie hasta el nivel de 700 mb (máximo valor alcanzado a ese nivel), para luego volver a disminuir en la vertical hasta el nivel 500 mb (ver Figura A4.5).

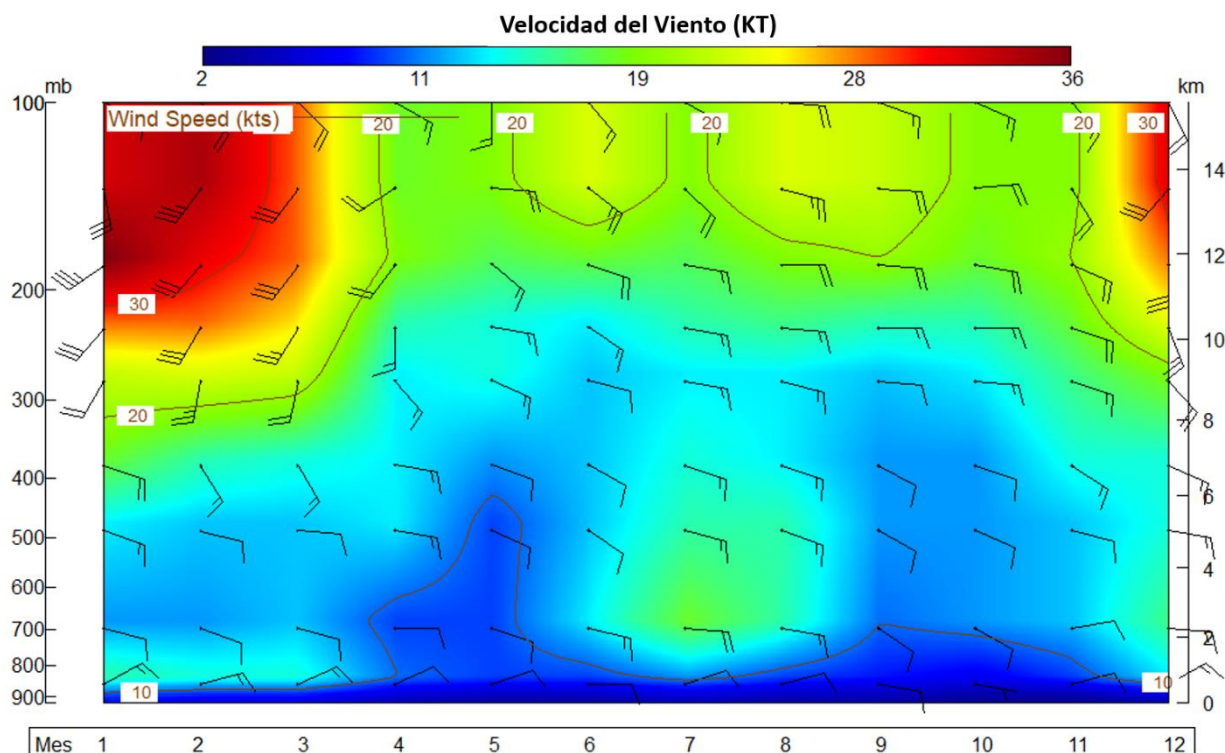


Figura 19: Velocidad y dirección promedio mensual del viento en función de la altura. Periodo 2013-2017.

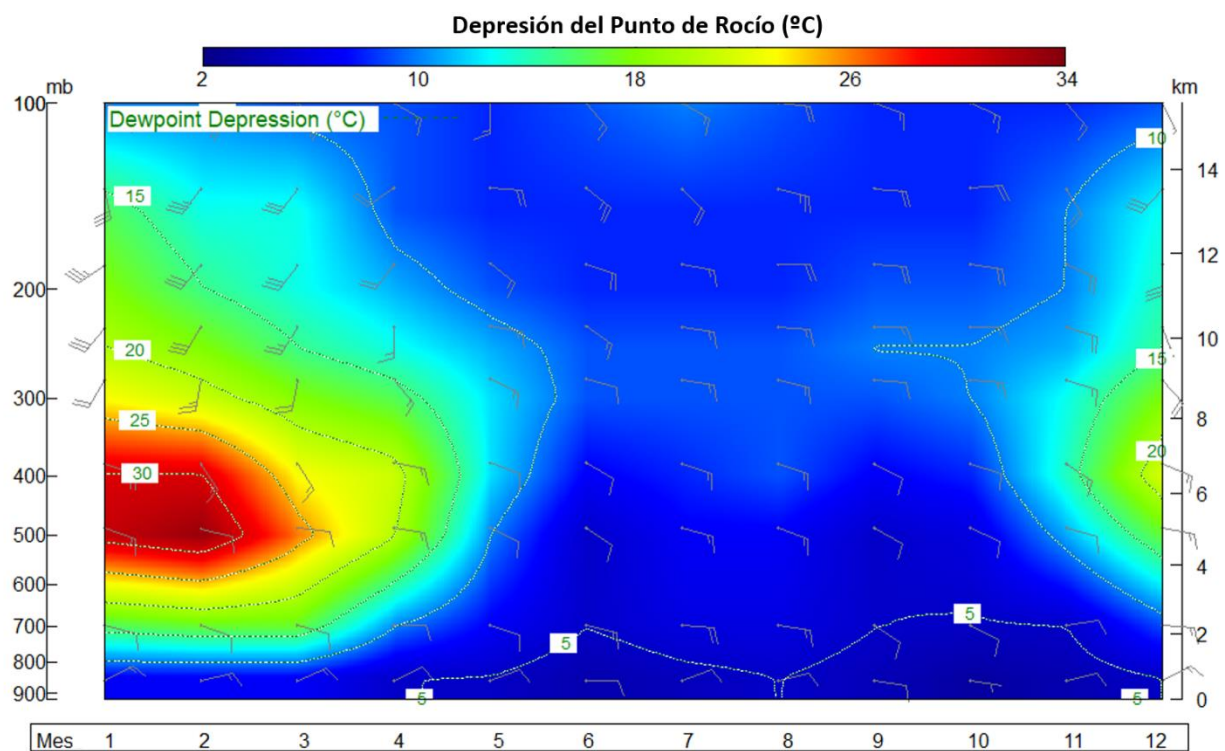


Figura 20: Depresión del Punto de Rocío promedio mensual en función de la altura. Periodo 2013-2017.

Conociendo que la temperatura potencial equivalente es proporcional a la entropía del aire húmedo y conservada en un proceso adiabático húmedo (Holton, 2013), se puede apreciar en la Figura 22 la distribución de esta temperatura proyectada a las 19 UTC (sondeos pronosticados con su típico calentamiento diurno), la cual presenta valores más altos cerca de la superficie conforme se acentúa la época lluviosa de la vertiente Pacífico. Los meses más marcados son junio, setiembre y octubre donde sus valores aumentan conforme se avanza en el año para alturas fijas; además estos en particular presentan la estructura más húmeda de toda la tropósfera baja que la posible para los restantes meses. Estos valores altos denotan una mayor humedad disponible de las parcelas a condensar y la liberación de calor latente para calentar las restantes a su alrededor.

Se nota una relación directa entre la presencia de valores altos de temperatura potencial equivalente (Figura 22) a alturas más elevadas de la troposfera baja, con el paso de ocurrencia de sistemas convectivos unitarios a los sistemas multicelulares discutido en la sección 4.1; en especial para los meses de junio y setiembre y en acuerdo con el modelo utilizado.

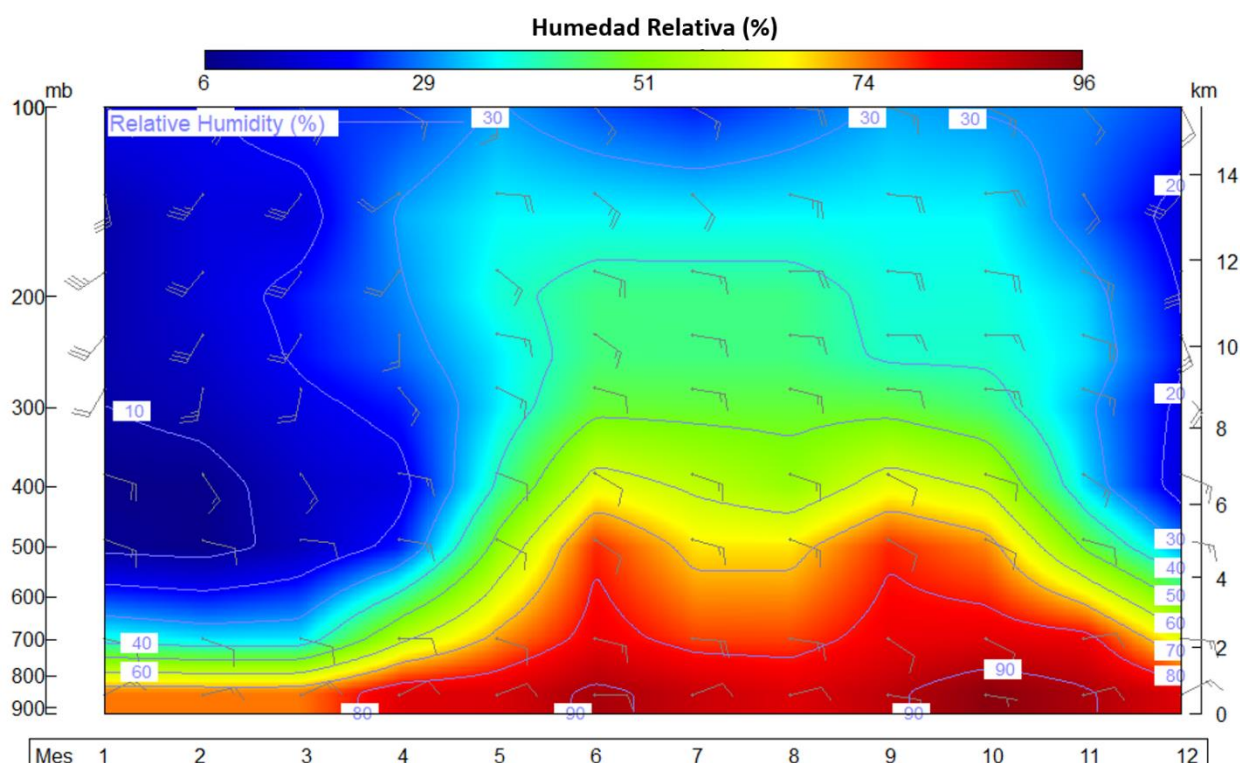


Figura 21: Humedad Relativa promedio mensual en función de la altura. Periodo 2013-2017.

De acuerdo con lo expuesto por Garbanzo (2011), las direcciones de viento en los primeros 16 km desde superficie concuerdan con lo expuesto en este estudio, donde predominan las direcciones este-sureste en toda la capa para los sondeos de las 12 UTC durante los veranos boreales, mientras que para los inviernos boreales se inicia desde superficie con direcciones del este para luego cambiar a direcciones del suroeste a una altura que va desde los 8 km hasta los 16 km.

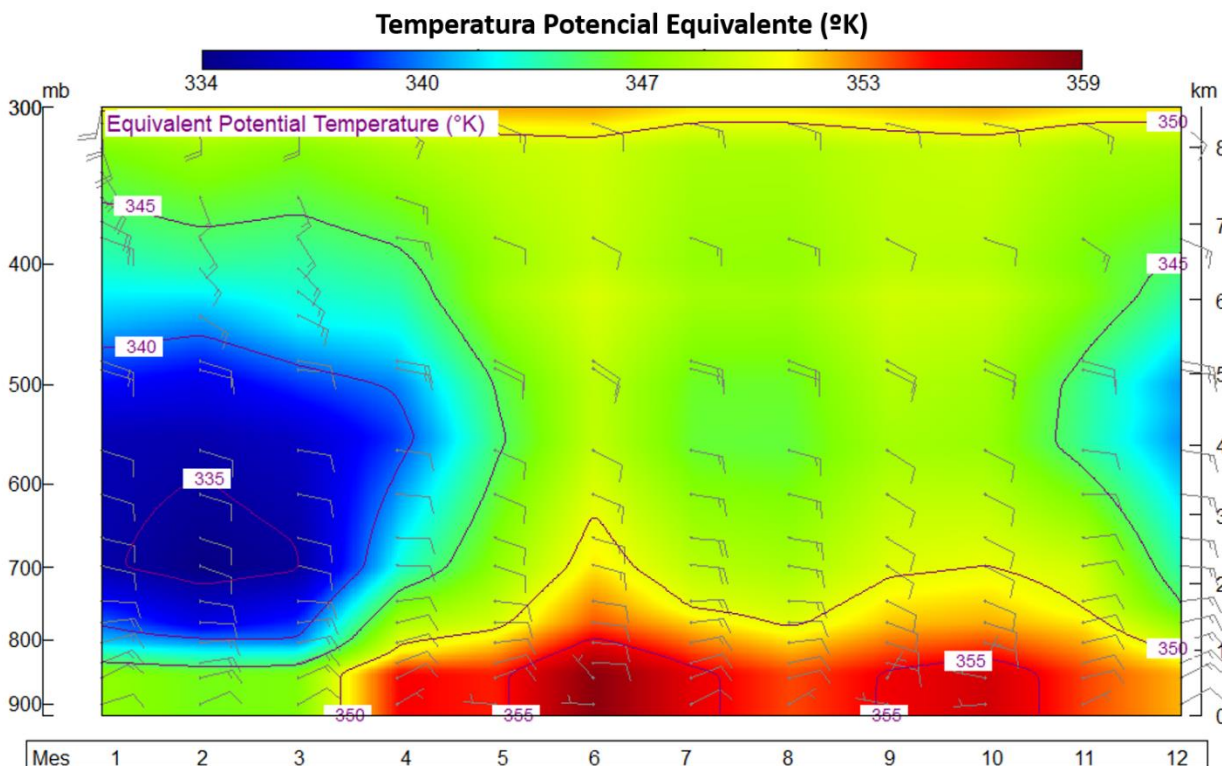


Figura 22: Temperatura Potencial Equivalente promedio mensual en función de la altura. Periodo 2013-2017.

4.3 Vector de Movimiento de Tormenta

Al revisar las gráficas estimadas para horas de la tarde de cada mes (gráficos de hodógrafas en la Figura 18 y Anexo 5), se determina que la dirección predominante promedio del vector desplazamiento de tormenta es hacia el noroeste y con velocidad de 8 kt en la mayoría de los meses. Esta tendencia en el desplazamiento hacia noroeste se presenta para los meses de: enero a abril, en julio y agosto, además de noviembre a diciembre. Estos meses corresponden a la época seca junto con los meses de transición y aunado a los meses caniculares de julio y agosto; todos con la característica de presentar vientos del este con valores que rondan los 10 kt a 15 kt en los primeros 6 km desde la superficie ('Método Tradicional' en sección 2.7).

En el caso de los periodos mensuales de mayo a junio y de setiembre a octubre característicos de la época lluviosa de la vertiente Pacífico, el vector movimiento de tormenta promedio calculado en los 6 km inferiores presenta la dirección del norte-noroeste con una velocidad de 5 kt. Esta tendencia de la dirección de desplazamiento de las tormentas hacia el norte y su disminución de la velocidad probable de desplazamiento es producto de la disminución de la cortante en niveles superficiales a medios (Figura 18 y sondeos **B** de Figura 5 a la Figura 16).

Por otro lado, al comparar estas hodógrafas promedio mensuales con las que caracterizan los típicos sistemas convectivos (Figura A1.1), se determina que para los meses en que la presencia de la brisa del suroeste se contrapone al flujo zonal predominante en los

primeros 7 km (meses de época lluviosa de la vertiente Pacífico), se facilita la formación de sistemas convectivos multicelulares y en casos muy excepcionales la convección supercelular.

4.4 Rangos de probabilidad para los ‘índices reales’ y comparación con los reportados en los sondeos promedio

El rango de variación de los índices promedio reportados en la Tabla 2 como el intervalo [Mínimo; Promedio; Máximo], es el alcanzado para los meses en que la inestabilidad atmosférica es la característica evidente de la época lluviosa en la vertiente Pacífico, junto a ambos meses de transición; o sea es el intervalo de los 8 meses marcados en la Tabla 2, donde es posible tener presente tormenta eléctrica (convección profunda).

Por otro lado, la cantidad de sondeos analizados para esta sección es de 222, seleccionados a lo largo de los 5 años y para el periodo de abril a diciembre, todos correspondientes a un día reportado con tormenta eléctrica primordialmente en el área metropolitana (histograma de Figura 4). A continuación, se presenta la comparación del ‘intervalo de variación real’, donde se encuentran el 80% (como mínimo) de los valores reportados y representados en las distribuciones normales de cada uno de los índices analizados; con el intervalo de variación de los índices registrados en la Tabla 2 de los sondeos promedio.

4.4.1 Valores para el índice K (KI)

Las variaciones de todos los datos del ‘índice real’ de KI se observan en la Figura 23, donde se puede establecer que el 80% de los datos se encuentran entre el rango de [29.5 – 37.5]. Respecto a los índices de los sondeos promedio sus valores están entre [27.5 – 34.7], con lo cual se ve que este intervalo está desplazado hacia valores inferiores (Tabla 2) pero aun dentro del rango de posibles valores a alcanzar para días reportados con tormenta eléctrica.

En referencia a la sección 2.2.1, se tiene que para la presencia de convección profunda se detectan atmósferas más frías en niveles medios y especialmente más húmedas para niveles inferiores a los 700 mb, las cuales facilitan la generación de tormentas eléctricas desde meses de abril hasta noviembre.

Se considera una unión de ambos intervalos como el rango de variación del KI para Costa Rica (y con más fortaleza para el análisis en el GAM) el cual sería de: [28.5 – 37.5] con aumento de probabilidad hacia valores superiores. El valor inferior de este rango de 28.5 es más frecuente solo el primer mes (abril) con probabilidad de convección profunda, luego aumentando abruptamente hacia el mes de junio como uno de los meses que más altos valores presenta del índice. Posteriormente los valores del KI se mantienen superiores al valor de 32 para los restantes meses de la época lluviosa.

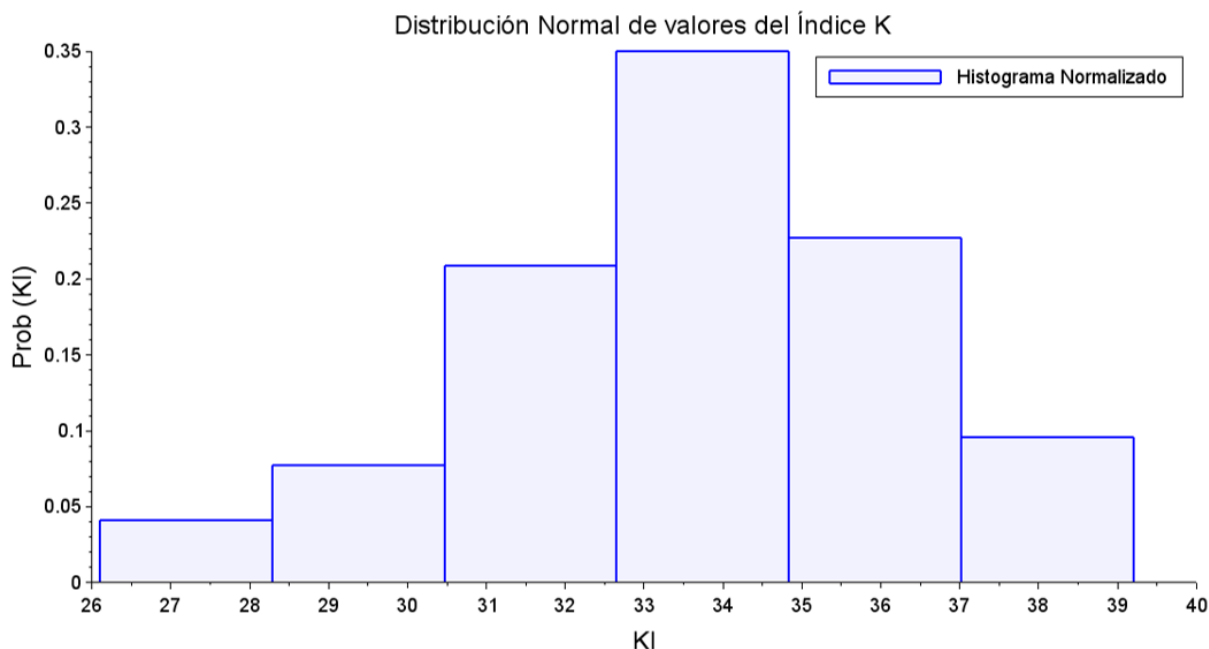


Figura 23: Probabilidad para los valores del índice KI.

4.4.2 Valores para el índice 'Lifted' (LI)

Con base en la física del índice discutida en sección 2.2.3, se detectan ascensos por convección más cálidos respecto a su entorno para los días factibles a la formación de tormentas eléctricas. Esto es principalmente cuando la atmósfera superficial está más húmeda y cálida.

El intervalo de variación 'real' de índice LI se obtiene de la Figura 24 con valores que van de $[-2 - +2.5]$ para los días analizados con tormenta. Por otro lado, los sondeos promedio arrojan valores dentro del intervalo de $[0 - +2.2]$ los cuales son menos bajos que los reales, pero aún dentro del rango de variación.

Al estar contenido un intervalo en el otro, se considera que para Costa Rica el índice LI tiene el intervalo de $[-2 - +2.5]$, con aumento de probabilidad de chubascos y tormenta eléctrica para valores más bajos (negativos). Los meses con frecuencias mayores hacia valores más altos de este índice (actividad convectiva aislada) son para abril y noviembre; posteriormente el mes de junio es el mes que puede presentar valores más negativos del LI (mayor inestabilidad para condiciones de tormentas eléctricas homogéneas).

4.4.3 Valores para el índice 'Total de Totales' (TT)

Nuevamente un índice como el TT, que detecta una atmósfera propicia para convección y tormentas eléctricas, en donde la humedad a los 850 mb es alta y cálida respecto a la temperatura presente a los 500 mb (ecuaciones 5, 6 y 7 de sección 2.2.5).

El intervalo de variación 'real' del índice TT está entre [41 – 47] para el 90% de los datos registrados del índice (Figura 25). Por su parte, los sondeos promedio dan un intervalo muy cercano al anterior, pero sin alcanzar valores tan altos hacia el límite superior; estos oscilan entre [41.9 – 44.8] de acuerdo con lo registrado en la Tabla 2.

Por consiguiente, se toma el intervalo de TT como [41.9 – 47.0] como el rango de probabilidad de chubascos y tormenta eléctrica, aumentando esta hacia valores más altos.

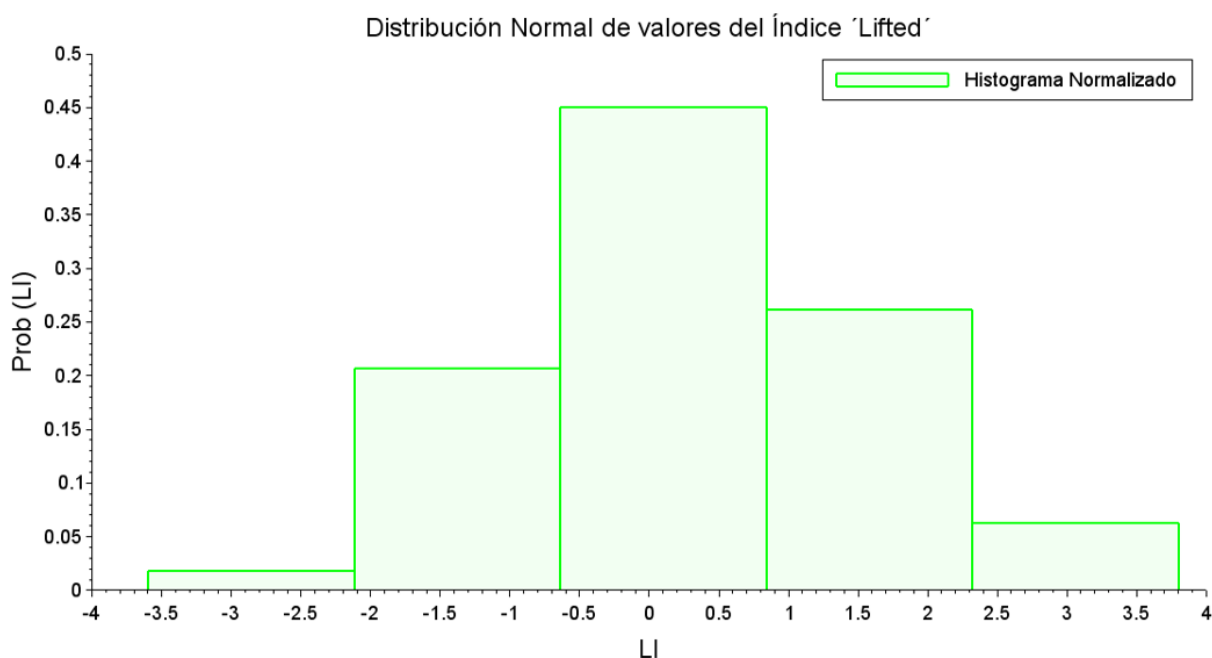


Figura 24: Probabilidad para los valores del índice LI.

4.4.4 Valores para el índice 'Crox Total' (CT)

Índice que presenta un intervalo de variación 'real' de [18.0 – 22.3] de acuerdo con la Figura 26. Respecto a los sondeos promedio (Tabla 2), el intervalo de CT dado por estos es de [18.5 – 20.5], el cual está contenido dentro de los valores típicos para días reportados con tormenta eléctrica.

El indicativo de una atmósfera húmeda en 850 mb respecto a la temperatura existente en 500 mb es marcado por valores altos en el índice CT; por ello los valores de [18.0 – 21.5] se toman como el rango de variación para este índice donde la posibilidad de chubascos con tormenta eléctrica en el área metropolitana de Costa Rica es alta. Valores mayores aumentan esta probabilidad.

El comportamiento de este índice es semejante a los anteriores, en el cual aumenta súbitamente sus valores para alcanzar en junio su máximo promedio. Posteriormente descienden sus valores levemente para los meses caniculares de julio y agosto; finalmente aumenta ligeramente de setiembre a noviembre.

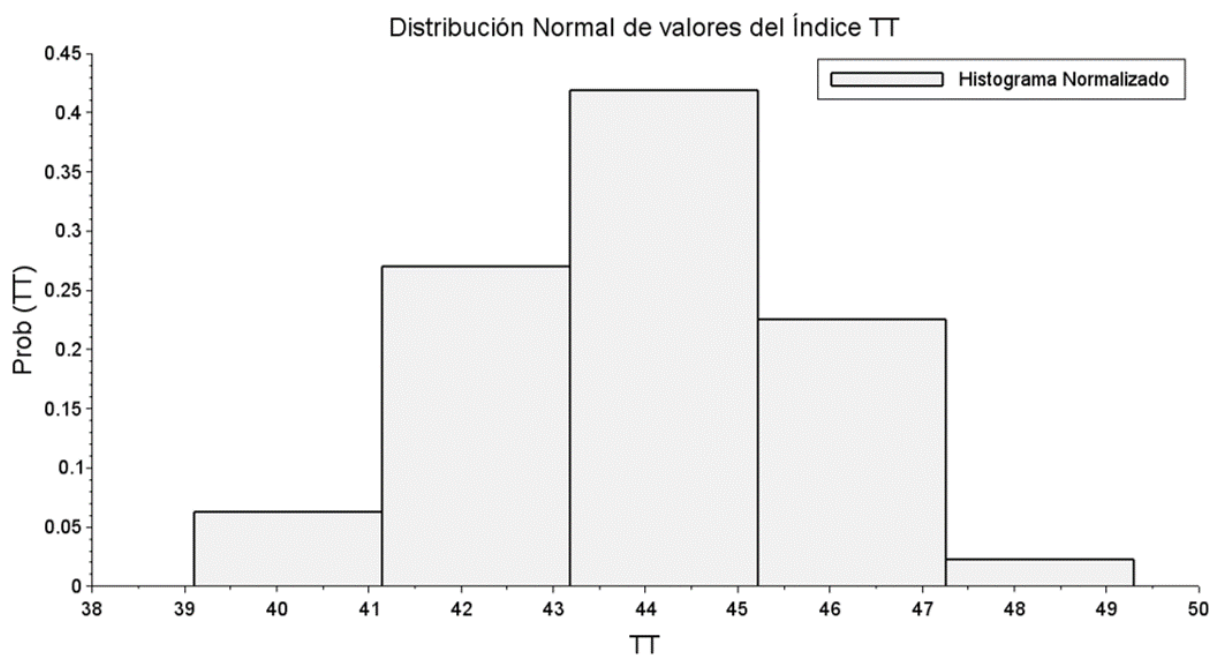


Figura 25: Probabilidad para los valores del índice TT.

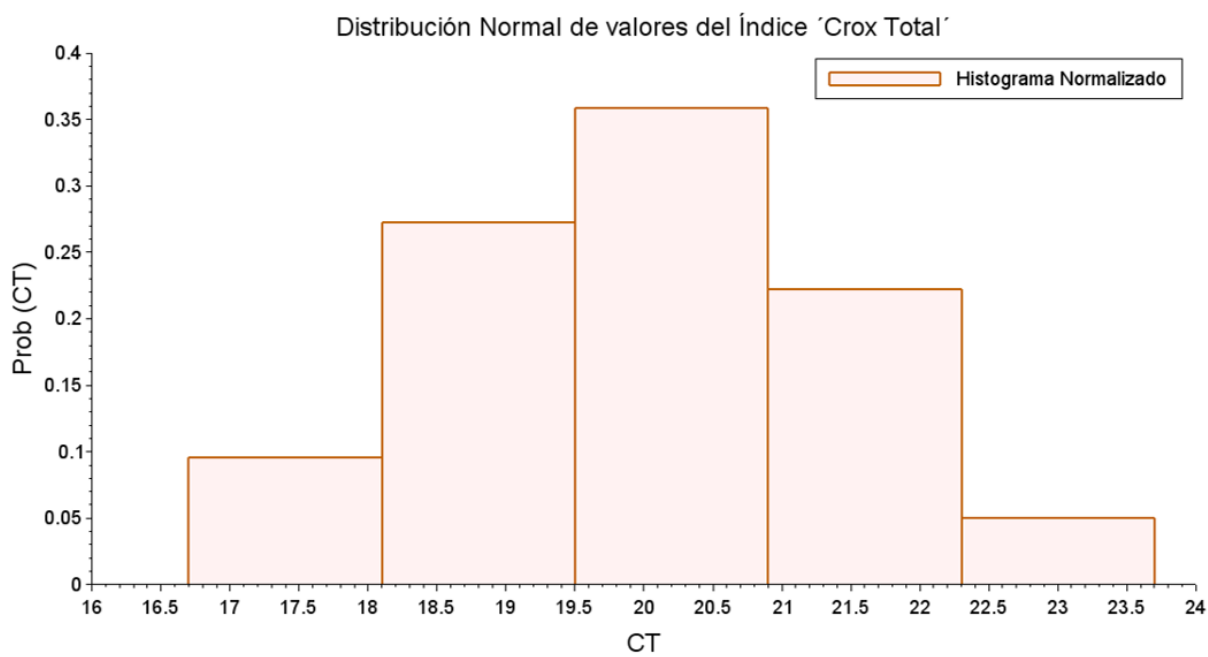


Figura 26: Probabilidad para los valores del índice CT.

4.4.5 Valores para el índice 'Show' (SI)

Semejante el índice 'Lifted', este índice expresa cuantitativamente la diferencia entre la temperatura ambiente de niveles medios y la temperatura de las parcelas ascendidas hasta este mismo nivel (ecuación 2). Su intervalo 'real' presente en la distribución mostrada en la Figura 27 es de $[-2.1 - +2.8]$ y el obtenido de los sondeos promedio en Tabla 2 es de $[-0.5 - +1.5]$.

Respecto a la teoría expuesta se tiene mayor probabilidad de tener chubascos y tormenta eléctrica para valores inferiores a cero; por tanto, se considera el intervalo de valores para SI de $[-2.0 - +2.0]$ como el establecido para sus variaciones locales en Costa Rica.

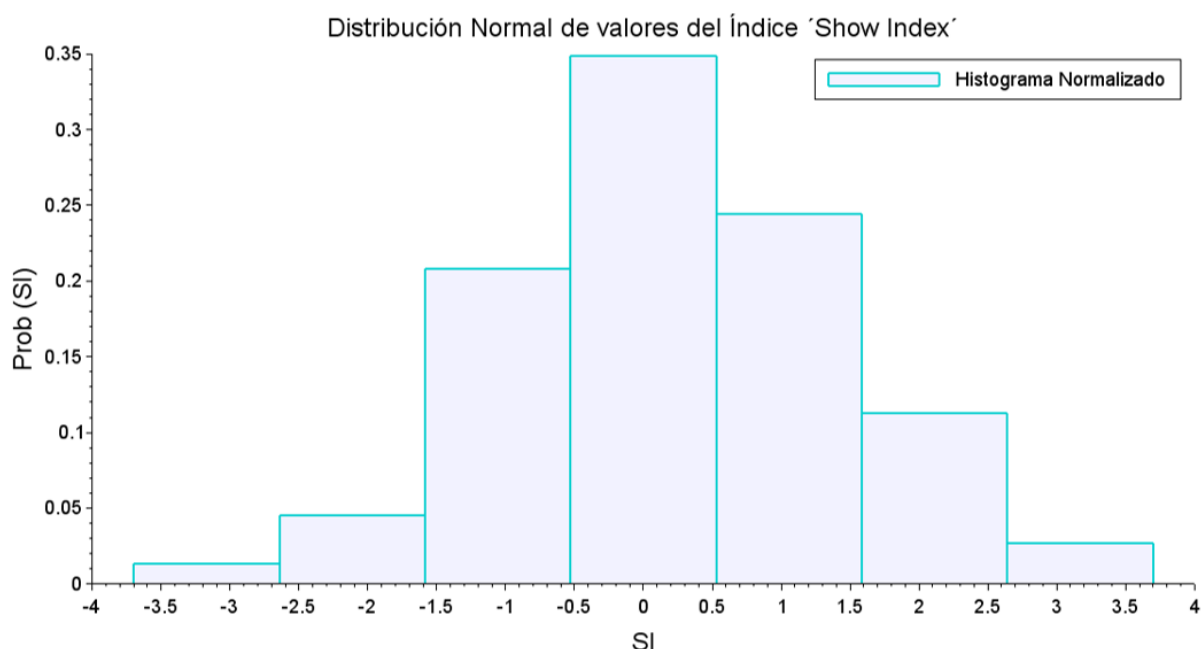


Figura 27: Probabilidad para los valores del índice SI.

4.4.6 Valores para el índice 'Sweat'

Se cuantifica con este índice las condiciones de tiempo severo con tormenta eléctrica cuando: existe la presencia de una atmósfera con buen contenido de humedad en niveles bajos, se presentan temperaturas medias frías relativas a superficie y cuando ocurren velocidades del viento en 850 mb y 500 mb que fomenten una cortante idónea (necesaria) para los desarrollos convectivos (ver secciones 2.2.9 y 2.6).

Los valores 'reales' para este índice mostrados en la Figura 28 oscilan entre el rango de $[178 - 234]$. Al compararlos con el rango de valores de SWEAT generados para la época lluviosa en los sondeos promedio $[193.8 - 214.8]$, se decide tomar los límites de ambos $[180 - 234]$ como el intervalo de variación verdadero para la posibilidad de tormenta eléctrica fuerte en Costa Rica, aumentando la probabilidad hacia valores superiores.

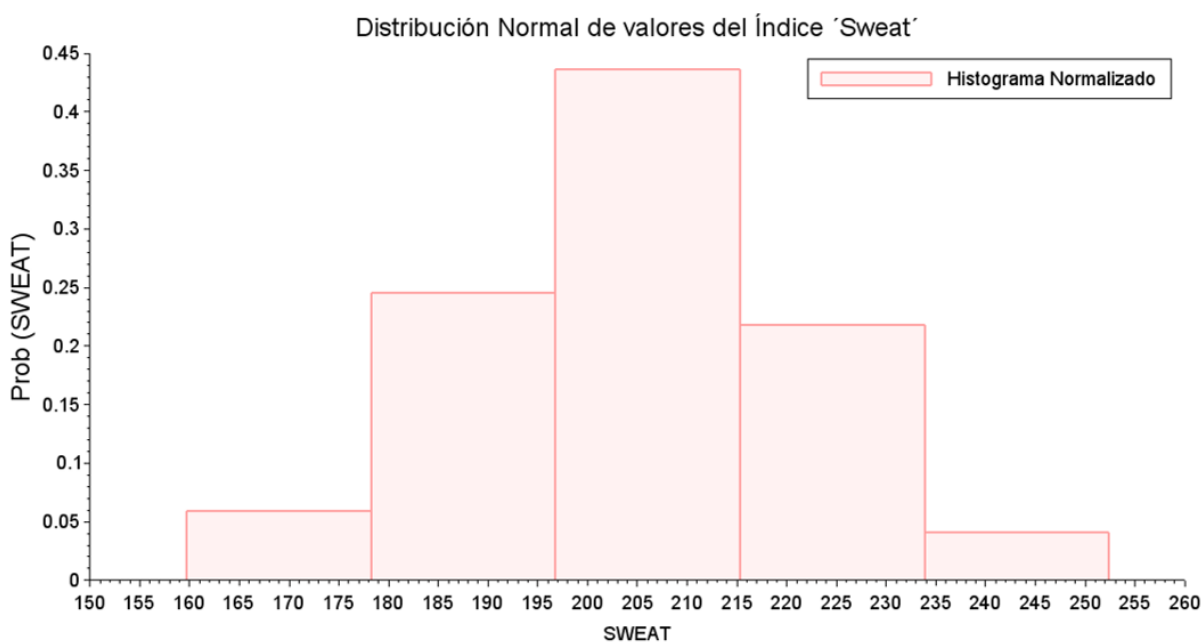


Figura 28: Probabilidad para los valores del índice 'Sweat'.

4.4.7 Valores para el índice 'Water' (PWAT)

La estimación del contenido de agua en la atmósfera calculado en horas de la mañana (hora en que se realiza el sondeo) para los 222 días reportados con tormenta en el Aeropuerto Internacional Juan Santamaría, se distribuyen según la estadística presentada en la Figura 29 entre el rango de [3.65 – 4.55] cm. Por su parte, los sondeos promedio mantienen un rango entre [3.07 – 4.20] cm ligeramente desplazado hacia valores inferiores (Tabla 2).

El índice cuantifica el contenido de agua atmosférico más probable para la ocurrencia de tormentas eléctricas, los cuales son representadas para valores altos del este. Por lo anterior es que el intervalo de variación del índice PWAT será de [3.07 – 4.20] cm, sin olvidar que valores superiores a este intervalo también son considerados como representativos de posible actividad convectiva.

4.4.8 Valores para el índice de Temperatura de Convección (T_C)

Los valores a los cuales se deben calentar las parcelas de aire para que inicien el proceso de formación de nubes convectivas (sección 2.2.8) y que, a la vez mantienen una probabilidad alta de ocurrencia de tormentas eléctricas son los reportados entre el rango de [26 – 36] °C (ver Figura 30). Estos valores 'reales' son más amplios que los reportados en la Tabla 2 de [29.6 – 33.5] °C, correspondientes a los sondeos promedio.

En T_C , al igual que en el caso del índice PWAT, las consideraciones dinámicas o tipológicas de estructura vertical no forman parte del índice; por ello, se determina que el rango

de variación para T_c será de los valores observados [26 – 36] °C los cuales se deben tener (junto a otros índices), para indicar alta posibilidad de chubascos con tormenta eléctrica para Costa Rica y en especial para el Gran Área Metropolitana (GAM).

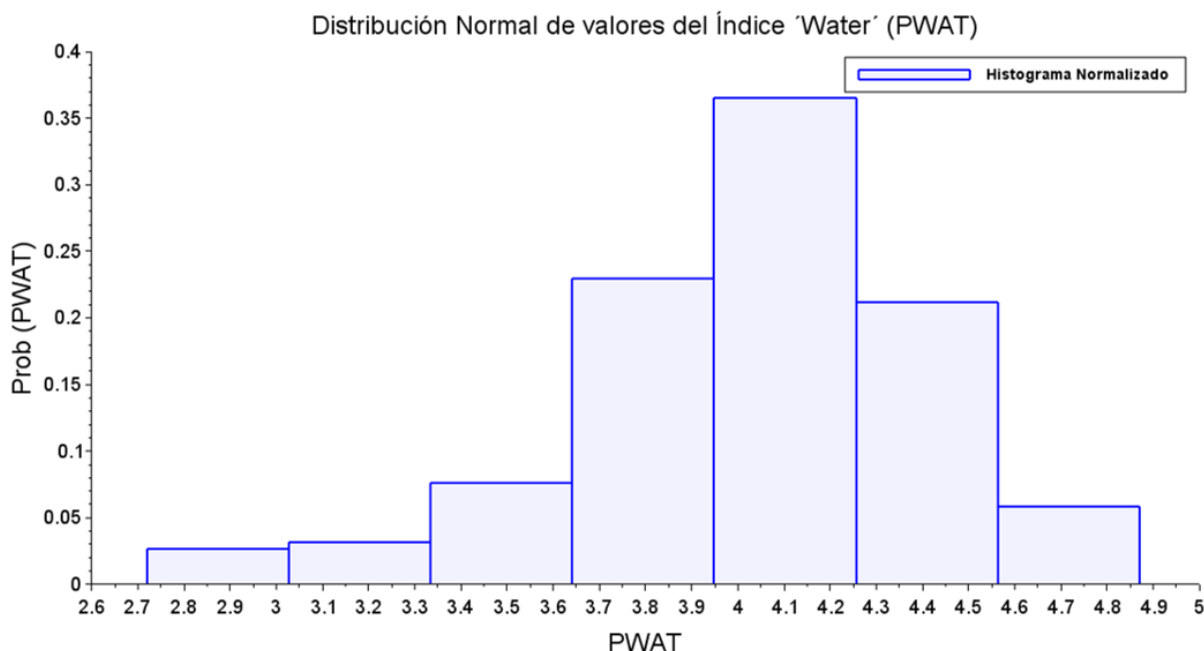


Figura 29: Probabilidad para los valores del índice PWAT.

4.4.9 Resumen de la variación de los índices de estabilidad y otros aspectos relacionados

Un punto importante a mencionar respecto a los índices analizados en las secciones anteriores es que, al ser calculados con las condiciones presentes a la hora del lanzamiento temprano en la mañana, el especialista en pronóstico deberá valorar y decidir si para la hora del pronóstico las condiciones se mantendrán, aumentará la condición de inestabilidad, o si por el contrario las condiciones tenderán a estabilizarse para las siguientes horas de pronóstico, por lo general será para lo que resta del día, a partir de la hora del lanzamiento del radio-sondeo. Así pues, se podría determinar si ciertos índices tienden a valores que reflejen más la inestabilidad/estabilidad que deberá ser plasmada a la hora de realizar la estimación, la cual se basa en el análisis de un conjunto de herramientas como: modelos numéricos, imágenes satelitales, datos de radar, datos de estaciones, entre otras y de las cuales se encuentra el análisis del radio-sondeo y los índices, que permiten obtener como una fuente muy valiosa una mejor comprensión del patrón de atmósfera más probable.

Otro índice importante para el pronóstico es el CAPE, el cual refleja las condiciones inestables y convectivas de ciertos días. Según lo discutido en el párrafo anterior y lo visto por los sondeos pronosticados para cada mes (Figura 8B a Figura 15B), tiende a aumentar su valor (generalmente) para horas de la tarde cuando el calentamiento diurno provoca el ascenso de las corrientes térmicas llamadas *termales*, llegando hasta niveles como el LCL,

CCL y LFC. Así pues, los sondeos promedio calculados en horas de la mañana no presentan valores para este índice; por el contrario, para horas de la tarde sí presenta valores y con tendencia a aumentar conforme avanza el año hacia los meses más lluviosos. Además, niveles como el LCL, CCL y por ende el LFC, se localizan a niveles cada vez más bajos en la época lluviosa de la vertiente Pacífico, por lo que termodinámicamente esto indica que la convección se facilita para estos meses (Figura A4.6). Para el índice CAPE los meses de junio y setiembre fueron observados como los dos máximos relativos del índice.

En el caso de los sondeos con días reportados con tormenta eléctrica en el área metropolitana, los valores del índice CAPE reportados a las 12 UTC siempre son muy variados (desde no valor, pasando por valores negativos, hasta presentar valores positivos). Cabe mencionar que el aumento del valor del CAPE es una condición necesaria pero no suficiente en el incremento de la probabilidad de actividad convectiva.

Otro índice de gran utilidad es el caso del índice 'Severity' (Figura A6.1), el cual reporta valores entre el rango de [4 – 5] para los 222 días analizados con reportes de tormenta eléctrica. Es importante destacar que la probabilidad de ocurrencia de tiempo severo en varios puntos del GAM (precipitaciones tipo aguacero de intensidad moderada a fuerte con presencia de tormentas eléctricas, es decir convección profunda) aumenta conforme se incrementa el valor de algunos índices (KI, CAPE, TT, SWEAT, CT); mientras que en otros casos, la probabilidad de tiempo severo aumenta conforme el valor de los índices LI y SI se hacen más pequeños. Al respecto, estos índices presentan su respectiva variación a lo largo del año (Figura A6.2 y Figura A6.3) donde se aprecian valores que denotan mayor inestabilidad hacia el inicio de la época lluviosa, que al final de esta.

Finalmente, en la Tabla 3 se resumen los intervalos de variación estimados para Costa Rica de los índices más comunes utilizados para el pronóstico de tiempo severo (además de tormenta eléctrica) discutidos en las secciones anteriores. De los intervalos se debe destacar que, el límite inferior de cada índice marcado en color verde y subrayado, le corresponde la probabilidad de 80% de ocurrencia de tormenta eléctrica, es decir que es probable la presencia de alguna tormenta, pero aislada y/o algunos chubascos.

En contraste, el límite superior marcado en color rojo en Tabla 3, corresponde a la probabilidad más alta de cada índice para estimar la presencia de tormentas eléctricas fuertes, con característica de presentarse entre dispersas a generalizadas. Esta corresponde a un 99%, o sea una certeza de ocurrencia muy alta. Valores superiores o sesgados hacia condiciones más inestables también se consideran con esta alta probabilidad.

Asimismo, se debe mencionar que para todos los 222 sondeos analizados de las 12 UTC, los cuales registran la presencia de tormenta eléctrica en el GAM; la altura de los niveles LCL, CCL y LFC (cuando se presenta para el sondeo de las 12 UTC), son: inferior a los 1300 m (790 mb), inferior a los 2350 m (700 mb), y entre los 2300 - 4800 m (700-550 mb) respectivamente, lo anterior se puede observar representado en la Figura A6.4 (ver anexo) donde se grafican estas alturas para los sondeos de abril a diciembre.

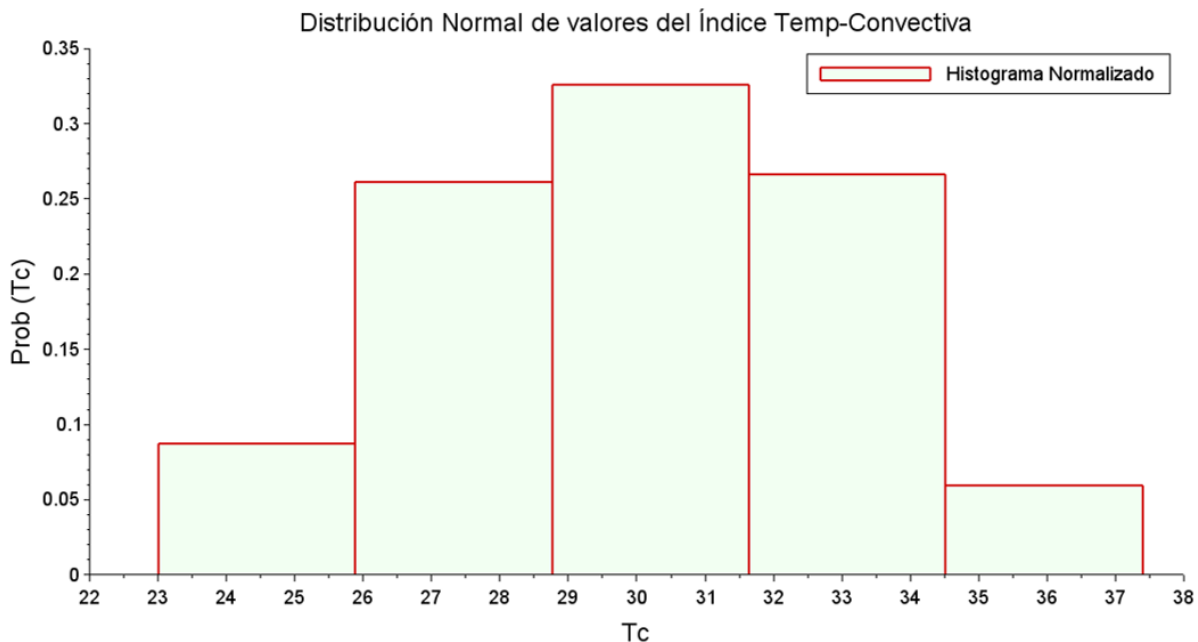


Figura 30: Probabilidad para los valores del índice T_c .

Tabla 3: Rangos de variación de los índices de estabilidad para Costa Rica.

ÍNDICE	Intervalo
<i>KI</i>	[28.5/32.5/37.5]
<i>LI</i>	[-2.0/+0.2/+2.5]
<i>TT</i>	[41.9/44.5/47.0]
<i>CT (croxTT)</i>	[18.0/19.8/21.5]
<i>SI (Show)</i>	[-2.0/ 0 /+2.0]
<i>SWEAT</i>	[180/197.5/234]
<i>WATER [cm]</i>	[3.07/3.65/4.20]
<i>Tc [°C]</i>	[26/31/36]
<i>LCL</i>	< 1300 m AGL
<i>CCL</i>	< 2350 m AGL

Capítulo 5

Casos de estudio y aplicaciones operativas

A continuación se presentan algunos casos de estudio que reflejan como el uso de los índices de estabilidad pueden ser utilizados en los pronósticos diarios y que a la vez, forman parte del conjunto de información que requiere un pronóstico. Se pueden considerar un complemento de los datos que a priori se analizan para una determinada estimación. Por otro lado, la última sección presenta la descripción operativa de como implementar lo expuesto para su uso cotidiano en las diferentes oficinas de pronóstico nacionales.

5.1 Casos de estudio para el empleo de índices de estabilidad de los radio-sondeos

5.1.1 Caso 1: Tormenta eléctrica fuerte con presencia de granizo

El primer caso de estudio utilizado para demostrar el uso de los índices de estabilidad corresponde al evento que se presentó el día 27 de abril del 2018. Para este día se dio la ocurrencia de tormenta eléctrica la cual se registró en los reportes de superficie aeronáuticos de las estaciones ubicadas en los aeropuertos internacionales Juan Santamaría y Tobías Bolaños Palma, ambos ubicados en el Gran Área Metropolitana (GAM). Además, se reportó la ocurrencia de tormenta con granizo hacia los sectores norte y noroeste de la misma. En el Anexo 7.1 se observan los reportes aeronáuticos de superficie (METAR), donde se resaltan en color rojo características importantes que se presentaron y que se toman en cuenta para el pronóstico:

- a- Ingreso de la brisa húmeda del suroeste proveniente de sectores marítimos hasta el valle. La presencia de humedad en el Valle Central ocurrió desde las 17 UTC en el aeropuerto Juan Santamaría, esto se detecta por el cambio a vientos del suroeste (SO) y el aumento de humedad relativa en la estación, mientras que por otra parte se mantenía la dirección de los vientos alisios del noreste (NE) durante todo el día en la estación del aeropuerto Tobías Bolaños, ubicada 9 km al este de la anterior.
- b- Altas temperaturas en todo el Valle Central como las resaltadas en los reportes, las cuales se presentaron desde los 27° C a los 30° C.
- c- La presencia de tormenta eléctrica con lluvia en ambos aeropuertos se reportó alrededor de las 20:30 UTC. En ambos aeropuertos inició como tormenta eléctrica moderada.

El sondeo de alta resolución lanzado a las 12 UTC se observa en la Figura 31 donde presenta como característica la persistencia de inestabilidad condicional desde superficie hasta los 350 mb (barras verdes a la derecha del sondeo). Comparando este sondeo con el sondeo promedio obtenido para el mes de abril (Figura 8A), se puede ver la similitud en la distribución de humedad, donde es más húmedo para regiones bajas y altas de la tropósfera, mientras que para niveles medios ambos sondeos se caracterizaron por ser más secos; aún cuando resultó contener levemente más agua precipitable el sondeo del caso de estudio (3.43

cm) que la promedio para el mes de abril (3.07 cm). Con respecto al patrón de vientos, se observa la similitud de vientos del este en la troposfera baja y media, mientras que una tendencia a vientos del sur y suroeste en la tropósfera alta. En conclusión, el sondeo del 27 de abril es un sondeo típico y característico de la época de transición hacia la estación lluviosa.

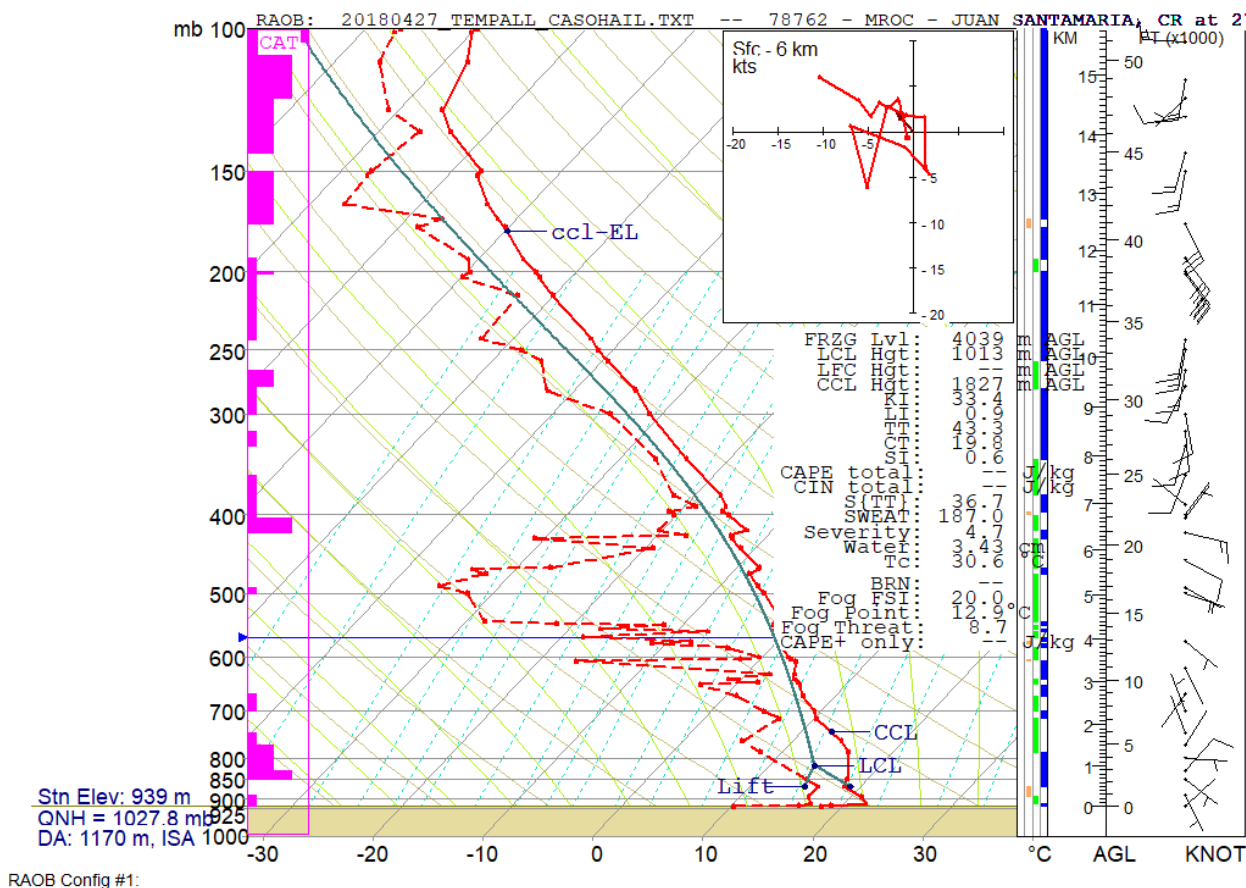


Figura 31: Sondeo meteorológico para el día 27 de abril del 2018 (12 UTC).

Respecto a los valores obtenidos por los índices y tabulados en Tabla 4, estos están dentro del rango de valores establecidos en la sección 4.4 (a excepción del índice SWEAT). En esta misma tabla se encuentran los nuevos valores de los índices de estabilidad obtenidos para el pronóstico de las 19 UTC (Figura 32) realizado a partir del sondeo de las 12 UTC. Se observa la inestabilidad que se manifiesta y se hace más latente con el aumento de los valores de KI, TT, CT, CAPE y SWEAT; además por otro lado, los valores de LI y SI disminuyen. En conclusión, se ratifica el aumento de la probabilidad de tener tiempo severo, es decir la presencia de tormenta eléctrica, nubes cumulonimbos, corrientes ascendentes y descendentes, restricciones de visibilidad vertical y horizontal, entre otras implicaciones.

Finalmente, en la Figura 32 se presenta el perfil de temperatura de bulbo húmedo (curva verde claro entre la temperatura ambiente y la temperatura de punto de rocío), donde se puede determinar el nivel cero de bulbo húmedo, o sea donde se interseca la isoterma 0°C con dicho perfil (flecha celeste en 0°C) el cual está cerca de los 620 mb (\approx 3300 m). Sumado a lo anterior se da la presencia de vientos alisios de hasta 16 kt (\approx 32 km/h) al este de la GAM,

junto a los vientos húmedos del suroeste con 11 kt (≈ 22 km/h) presentes más hacia la parte occidental de la GAM. En síntesis, se propició la presencia de corrientes ascendentes fuertes en las nubes cumulonimbos favoreciendo el englamamiento de las gotas de lluvia (aumento de tamaño de granizo en la parte alta de la nube). La presencia de altos valores del índice CAPE y la existencia de un nivel EL a gran altura son otros factores que advierten de la ocurrencia de granizo en el GAM (flecha roja horizontal que marca 12200 m en la escala de altura de la Figura 32).

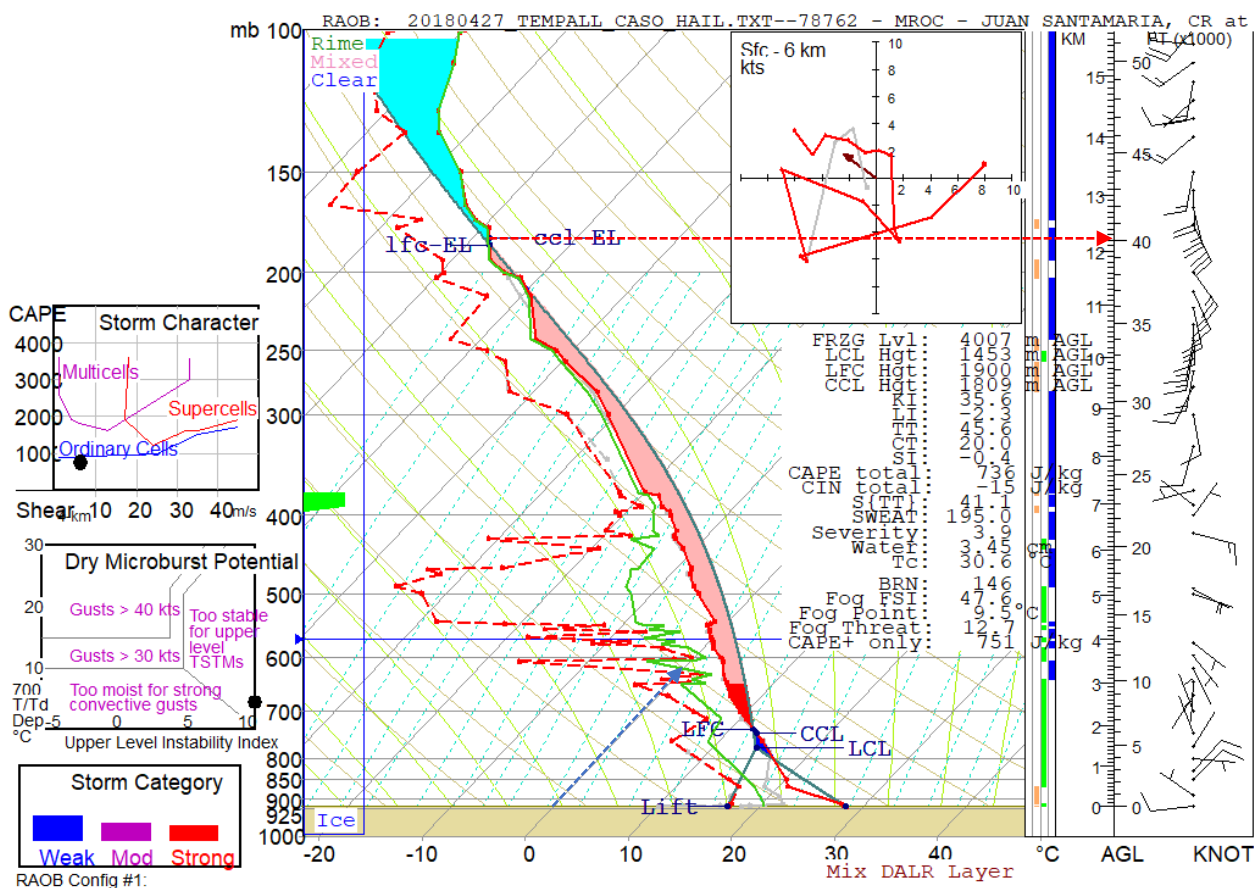


Figura 32: Sondeo meteorológico pronosticado para el día 27 de abril del 2018 (19 UTC).

Tabla 4: Rangos de variación de los índices de estabilidad para caso de estudio del 27 de abril, 2018; 12 UTC (observado) y 19 UTC (pronosticado).

Caso de Estudio: 27 de abril, 2018.		
ÍNDICE	12Z	19Z
K-INX	33.4	35.6
LI	0.9	-2.3
TT	43.3	45.6
CT (croxTT)	19.8	20
SI (Show)	0.6	-0.4
CAPE (tt) [J/Kg]	-	736
SWEAT	187	195
Severity	4.7	3.9
WATER [cm]	3.43	3.45
Tc [°C]	30.6	30.6
Fog Threat	8.7	13.5

5.1.2 Caso 2: Influencia de Tormenta Tropical

En este segundo caso se analiza lo que se presentó el día 05 de octubre del 2017 cuando el país se encontraba bajo la influencia indirecta de la Tormenta Tropical NATE, la cual se localizaba sobre el territorio nororiental de Nicaragua (NHC, 2018) y apreciable en la Figura A8.1 del Anexo 8.

En la Figura 33 se observa el sondeo de las 12 UTC, al compararlo con el sondeo promedio para este mes (Figura 14A) se observan diferencias como las del perfil de vientos, los cuales para el sondeo del caso de estudio presenta direcciones del suroeste y oeste que difieren del promedio para este mes, en el que la dirección predominante del perfil es del este primordialmente en toda la capa de los primeros 16 km de la tropósfera. También presenta una atmósfera con un mayor contenido de agua (4.76 cm) que la promedio para mes octubre (4.08 cm) y además, los valores de los índices KI, SWEAT y CT del 05 de octubre son mayores (36.1, 256.5 y 20.3 respectivamente) a los presentados para el promedio (33.5, 205 y 20.1 respectivamente).

de chubascos o tormenta eléctrica para el día del caso de estudio en consideración. Se concluye que la condición necesaria de T_C para este día no fue cumplida, aun cuando los índices de estabilidad reflejaban la posibilidad de tormenta eléctrica.

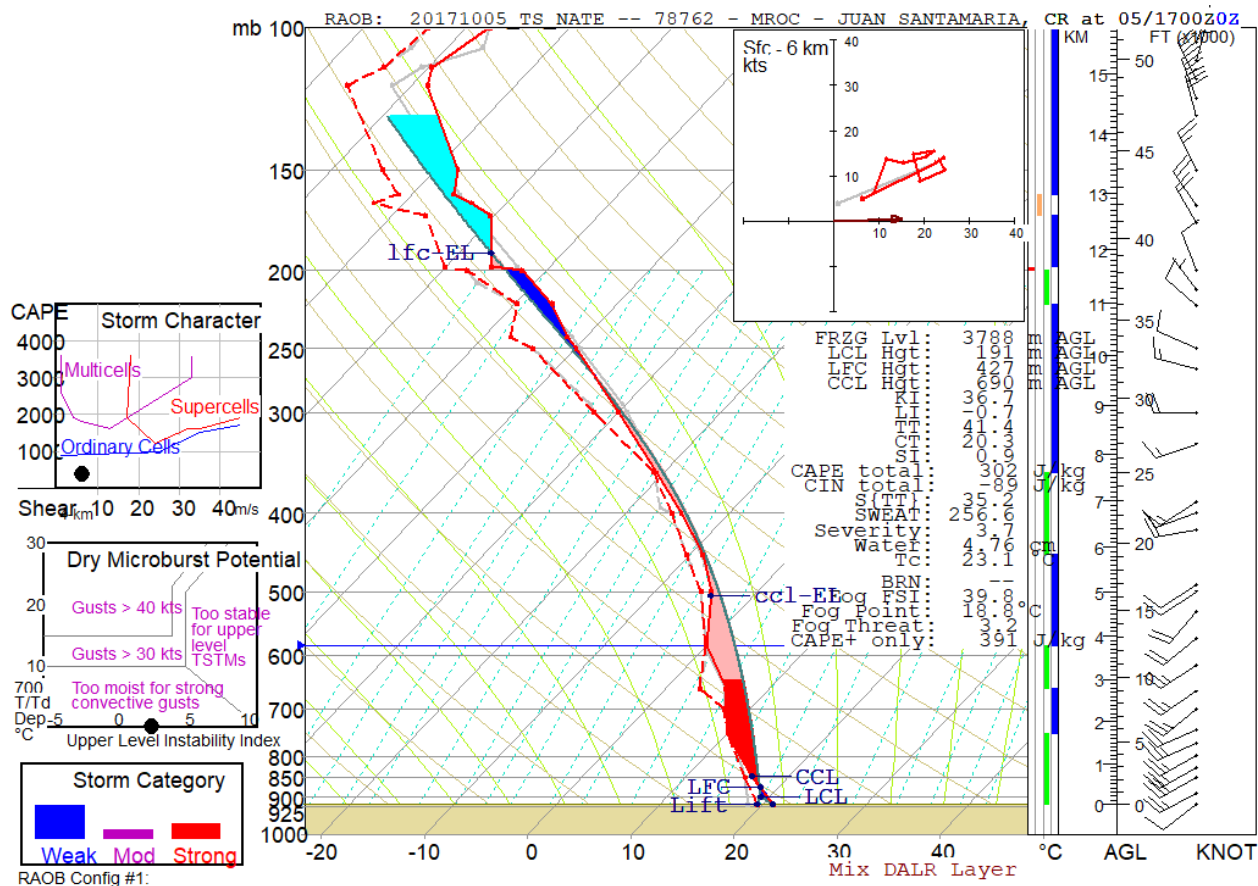


Figura 34: Sondeo meteorológico pronosticado para el día 05 de octubre del 2018 (17 UTC).

Cabe destacar que la ubicación espacial de la ocurrencia de tormenta eléctrica no depende solo del grado de inestabilidad reflejado por los índices del sondeo, sino que intervienen también factores dinámicos que favorecen la convección como: ubicación del frentes de brisa (vientos alisios del noreste convergiendo con los del suroeste), regiones de caídas de presión locales sobre el territorio nacional, vaguadas en diferentes niveles de la tropósfera que cambien la estabilidad de determinada región, zonas de fuerte divergencia en altura, entre otras. Además, la existencia de factores termodinámicos como la altura a la que se encuentran niveles importantes de cambios de estado y de desarrollo convectivo, entre estos el CCL, LCL y LFC; el calentamiento diurno presente que aumenta la temperatura de las parcelas de aire en contacto con la superficie que facilita su elevación; el contenido de agua en la atmósfera de la cual se puede inferir ya sea una actividad aislada o generalizada.

Tabla 5: Rangos de variación de los índices de estabilidad para caso de estudio del 05 de octubre, 2017; 12 UTC (observado) y 17 UTC (pronosticado).

Caso de Estudio: 05 de octubre, 2017.		
ÍNDICE	12Z	17Z
<i>K-INX</i>	36.1	36.7
<i>LI</i>	1.4	-0.7
<i>TT</i>	40.6	41.4
<i>CT (croxTT)</i>	20.3	20.3
<i>SI (Show)</i>	1.3	0.9
<i>CAPE (tt) [J/Kg]</i>	61	302
<i>SWEAT</i>	256.6	256.6
<i>Severity</i>	3.8	3.7
<i>WATER [cm]</i>	4.76	4.76
<i>Tc [°C]</i>	21.3	23.1
<i>Fog Threat</i>	3.1	3.2

5.1.3 Caso 3: Tiempo convectivo severo

Respecto a lo ocurrido el 24 de mayo del 2018, el sondeo de la Figura 35 describe un patrón irregular de las direcciones del viento, aunque la intensidad es débil. Al compararlo con el promedio del mes (Figura 9A) se puede concluir que es anómalo respecto a este para el contenido de agua, pues presenta valores mayores de hasta 4.22 cm con respecto a los 3.61 cm del mes promedio; además de que los índices de estabilidad describen una atmósfera más inestable que la presentada como promedio.

Este caso es importante debido a que es un tipo de sondeo característico que para fines de operativos se ha conocido como sondeo 'explosivo' (Figura 35), el cual es representativo para el pronóstico de tiempo severo. Estos sondeos presentan una capa límite bien mezclada cercana a la superficie, una inversión en una zona más seca después de esta capa (en este caso es una zona de condición estable donde el gradiente vertical de temperatura es menor al gradiente adiabático saturado ((1) en Figura 35)) generada en ocasiones por subsidencia, para posteriormente humedecerse hacia niveles medios y altos de la tropósfera (Miller, 1972). Otro aspecto que favorece es que el nivel LCL se encuentra a tan solo 762 m AGL.

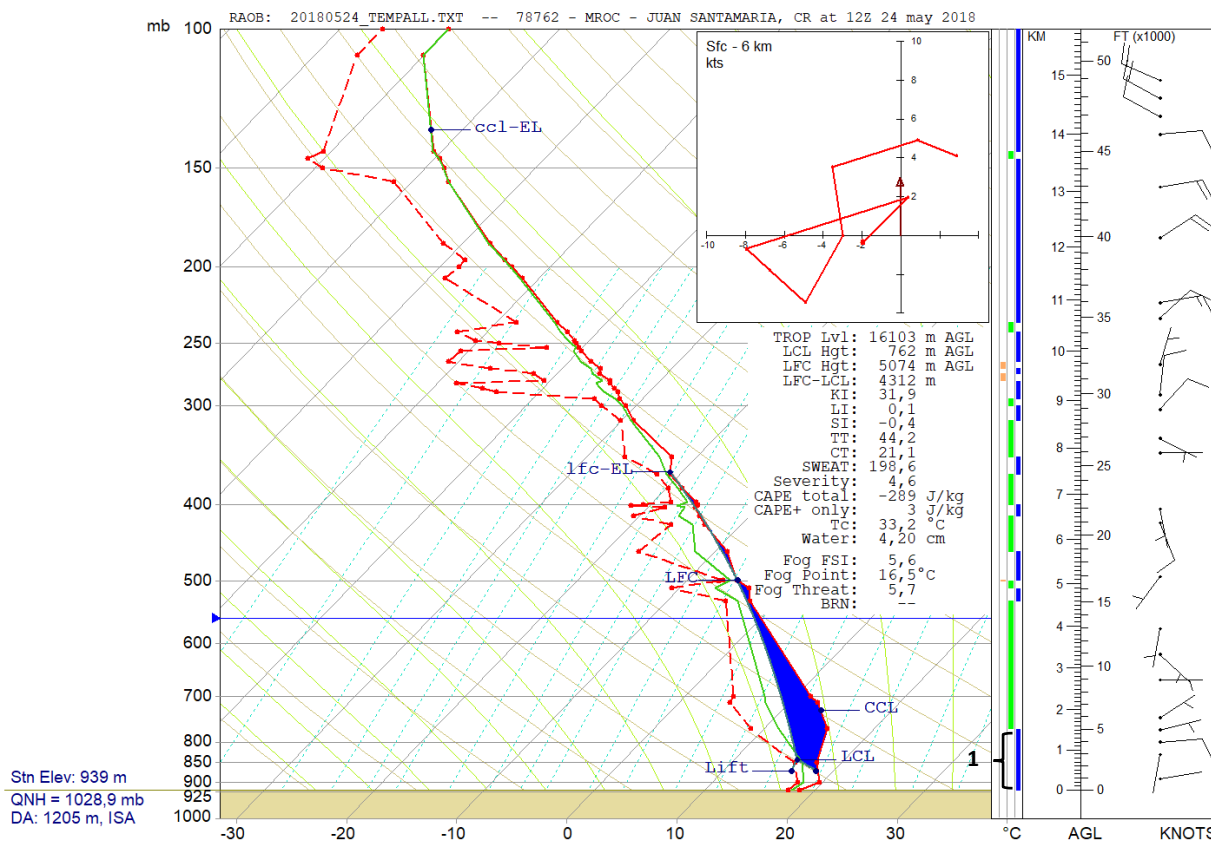


Figura 35: Sondeo meteorológico para el día 24 de mayo del 2018 (12 UTC).

En el Anexo 7.3 se tienen los reportes aeronáuticos de superficie METAR de los aeropuertos del GAM y en la Figura 36 se presenta el sondeo pronosticado; sobre estos se puede analizar lo siguiente:

- La temprana presencia de la brisa húmeda del Pacífico en el Valle Central (16 UTC) favoreciendo la convección por elevación hacia los sectores montañosos noreste y este del valle.
- Altas temperaturas en todo el Valle Central las cuales se registraron en las estaciones meteorológicas desde los 27°C a 29°C. Su ocurrencia entre las 15 UTC y 16 UTC denota un fuerte calentamiento matutino.
- Alto valor de índice CAPE.
- Alturas elevadas del nivel EL.
- Baja altura del nivel cero de Bulbo húmedo (T_{w0}).

En la Tabla 6 se tienen los índices tanto para el sondeo observado a las 12 UTC, como para el pronosticado para las 19 UTC. Los valores se encuentran todos dentro del rango establecido para que se presenten chubascos con tormenta eléctrica sobre el Valle Central (sombreado amarillo). El alto valor del CAPE para horas de la tarde, un nivel de T_{w0} inferior a los 4 km y un nivel EL alto (fechas rojas horizontales en Figura 36), son indicativos de la posibilidad de actividad convectiva profunda con actividad eléctrica severa y la posibilidad de granizo. La verificación indicó que se presentaron las tormentas esperadas con la presencia de granizo reportado en sectores este del Valle Central y en la Zona Norte del país.

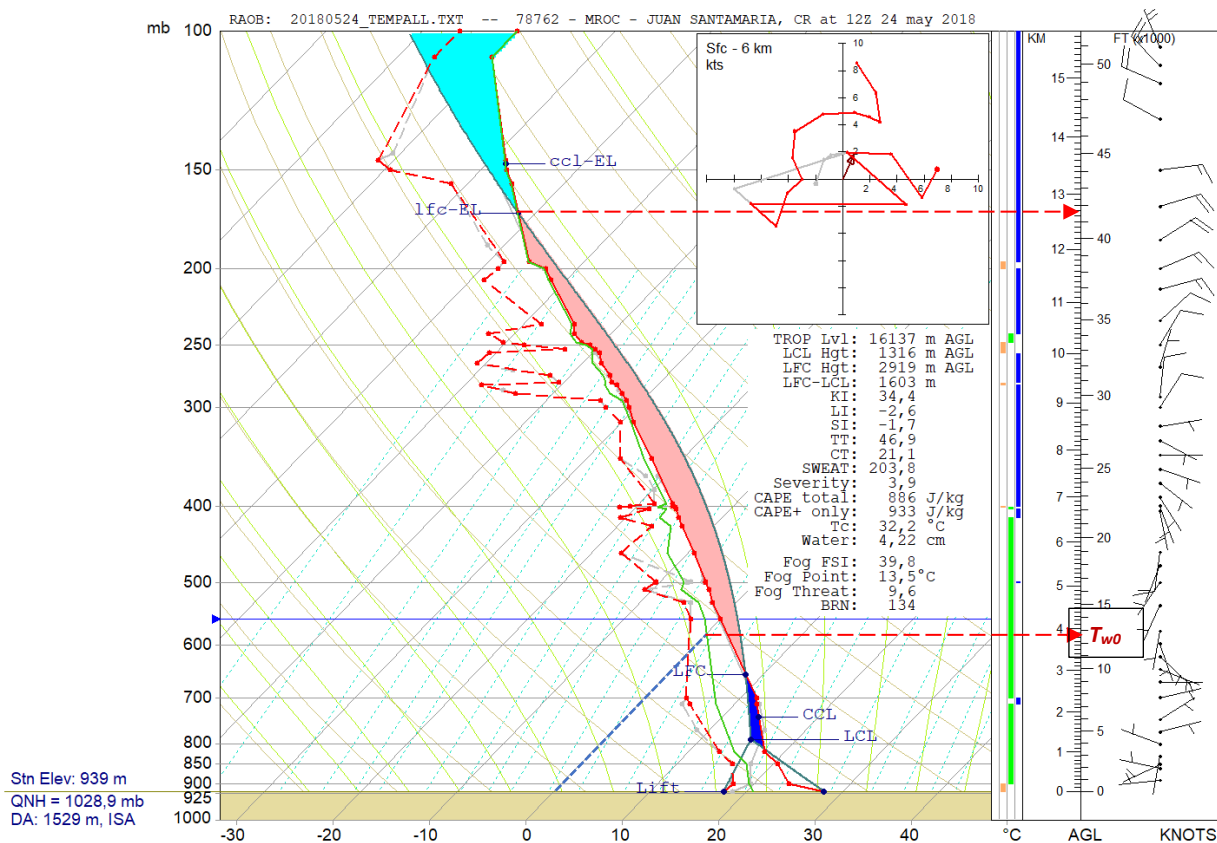


Figura 36: Sondeo meteorológico pronosticado para el día 24 de mayo del 2018 (19 UTC).

Tabla 6: Rangos de variación de los índices de estabilidad para caso de estudio del 24 de mayo, 2018; 12 UTC (observado) y 19 UTC (pronosticado).

Caso de Estudio: 24 de mayo, 2018.		
ÍNDICE	12Z	19Z
K-INX	31.9	34.4
LI	0.1	-2.6
TT	44.2	46.9
CT (croxTT)	21.1	21.1
SI (Show)	-0.4	-1.7
CAPE (tt) [J/Kg]		886
SWEAT	198.6	203.8
Severity	4.6	3.9
WATER [cm]	4.2	4.22
Tc [°C]	33.2	32.2
Fog Threat	5.7	9.6

5.1.4 Caso 4: Huracán Otto

La influencia que presentó sobre el país el sistema que dio origen al Huracán Otto fue de cuatro días, esto desde que se formó como depresión tropical (IMN, 2016c); aun y cuando el periodo de tiempo que se le catalogó como huracán fue relativamente corto (menos de 33 horas) producto de su rápido fortalecimiento y veloz desplazamiento sobre territorio continental (15 a 20 km/h). Desde que tocó tierra en la costa este de Nicaragua el día 24 de noviembre del 2016, hasta salir de Costa Rica por el Golfo de Papagayo al noroeste de país, pasó de ser categoría 3 a 1 en tan solo 10 horas (NHC, 2017).

En el sondeo de la Figura 37 del 24 de noviembre de 2016 a la 12 UTC, se observa una atmósfera saturada e inestable desde tempranas horas de la mañana, donde persisten regiones de marcada inestabilidad condicional (barras verdes en la derecha del sondeo), esto cuando la posición del sistema era al este de donde tocaría tierra, o sea al este de la Reserva Biológica el Indio Maíz, Nicaragua (NHC, 2017). En el Anexo 8 se muestra una imagen de la posición del sistema a las 16 UTC del día analizado (Figura A8.2).

Desde los 2 km de altura hasta los 6 km se aprecia en el sondeo un flujo del norte – noroeste, mientras que en superficie un débil flujo del suroeste sobre la estación de lanzamiento de sondeos de la Fabio Baudrit en La Garita de Alajuela (Figura 37).

Al comparar este sondeo con el sondeo promedio para el mes de noviembre (Figura 15A) se pueden apreciar ciertas diferencias o anomalías, entre estas están:

- a- Una atmósfera más saturada de lo normal, con un contenido de agua de 4.82 cm para el caso de estudio, mientras que para la atmósfera promedio de noviembre el contenido de agua es de 3.70 cm.
- b- Un patrón anómalo de vientos del suroeste en superficie y de vientos acelerados del norte-noroeste en la atmósfera media y alta del caso de estudio; mientras que el sondeo promedio presenta vientos de componentes sureste y este de leves a moderados en toda la tropósfera. Por ello la diferencia en dirección del vector desplazamiento de tormentas entre el caso de estudio (sur - suroeste) y el típico presente para el mes de noviembre (noroeste).
- c- La inestabilidad reflejada por cada índice para el caso de estudio es superior a la presentada para el mes de noviembre promedio (Figura 37 y Figura 15A).

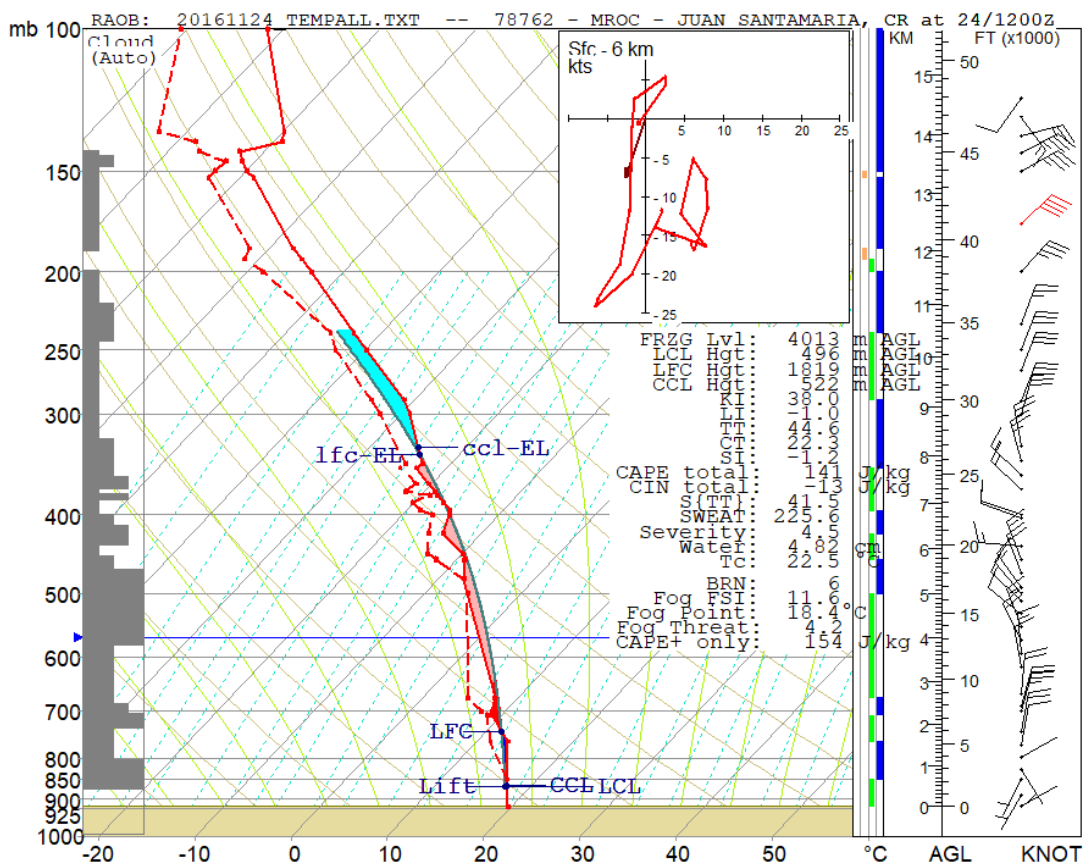


Figura 37: Sondeo meteorológico para el 24 de noviembre del 2016 (12 UTC).

Las consideraciones que se deben tomar en cuenta para el pronóstico de un día con este tipo de características, como la presencia de un sistema ciclónico cerca de la costa caribeña de Costa Rica son:

- La persistencia de brisa húmeda del Pacífico sobre el país tanto de día como de noche y principalmente sobre el GAM, esto producto del fuerte gradiente de presión que podría estar generando un flujo sinóptico hacia el centro del sistema ciclónico.
- El calentamiento matutino y vespertino puede reducirse a causa de la saturación excesiva de la atmósfera y la baja altura de los niveles CCL y LCL, los cuales favorecen la presencia de nubosidad para todo el periodo de pronóstico (capas de nubes en sondeo Figura 37).
- Persistencia de cortante del viento moderada en niveles medios (Figura 37) producto de la cercanía del sistema al país que podrían modular aún más la convección para determinada región de pronóstico (velocidades de 20 kt a 30 kt en las alturas de 1 km a 4 km).

La Figura 38 muestra áreas de CAPE con valores menores y a menor altura en la atmósfera media para el sondeo pronosticado, que las presentadas para el sondeo de horas de la mañana de este mismo día (Figura 37); además de la aparición de un área estable de

débil y moderada (RA) sumada a la presencia de viento del suroeste, bancos de niebla y neblina (FG, BR) como la actividad atmosférica predominante durante este día.

Por otro lado, la estación del aeropuerto Daniel Oduber Quirós en Liberia (MRLB), la presencia de viento del suroeste fuerte (inclusive con ráfagas de 30 kt) y lluvia se fue ratificando con forme el sistema se acercaba más hacia esa zona; misma por la cual transitaría y saldría hacia aguas abiertas en el Pacífico Norte de Costa Rica. Se registraron lluvias que cambiaron de moderadas a fuertes, restricción en visibilidad y viento variando de oeste a sur con magnitudes de hasta 60 km/h (Anexo 7.4). En contraste, para los registros del aeropuerto de Limón (MRLM) de la región Caribe, se observó menor afectación en los patrones del tiempo presente para este día, se presentaron lloviznas y la nubosidad fue de baja a media primordialmente.

Tabla 7: Rangos de variación de los índices de estabilidad para caso de estudio del 24 de noviembre, 2016; 12 UTC (observado) y 20 UTC (pronosticado).

<i>Caso de Estudio: 24 de noviembre, 2016.</i>		
ÍNDICE	12Z	20Z
<i>K-INX</i>	38	35.1
<i>LI</i>	-1	-0.5
<i>TT</i>	44.6	43.3
<i>CT (croxTT)</i>	22.3	20.9
<i>SI (Show)</i>	-1.2	-0.1
<i>CAPE (tt) [J/Kg]</i>	141	135
<i>SWEAT</i>	225.6	212.8
<i>Severity</i>	4.5	4.8
<i>WATER [cm]</i>	4.82	4.68
<i>Tc [°C]</i>	22.5	24.8
<i>Fog Threat</i>	4.2	5.2

Con lo visto por el sondeo, tanto el observado como el pronosticado, en las observaciones de superficie y en lo reportado por el IMN (2016b), donde la mayor afectación e impacto del sistema se concentró en las regiones fronterizas de la Zona Norte y el Pacífico Norte; se puede resumir que las condiciones son muy cambiantes con la presencia de un sistema tan inestable con las dimensiones, localización e intensidad (categoría) particular como las de un huracán. Se requieren más estudios de este tipo de casos para poder generalizar, pero de momento del análisis se extrae que características como el grado de saturación de la atmósfera para este tipo de sistemas, no representan mucha variación en el valor de los índices de estabilidad para el pronóstico, sino que tienden a mantener los valores de estos registrados a priori debido a una persistencia en las condiciones.

5.1.5 Caso 5: Onda Tropical entrando al país en el transcurso del día 14 de agosto del 2018

Para este día se presentó el paso de una onda tropical la cual transitó el país, como es habitual de este a oeste (Quirós e Hidalgo, 2017). El inicio de actividad atmosférica producto de la influencia de la onda tropical se presentó en los sectores marítimos y costeros de la vertiente Caribe, con lluvias de tipo convectivo y tormenta eléctrica aislada en horas de la mañana. Se puede decir que se da un reforzamiento del régimen de precipitación costero con el inicio de interacción de la onda en la región Caribe. Posteriormente, con forme la onda tropical continúa avanzado sobre el país, la actividad pasó a la vertiente Pacífico producto del acople de diversos factores asociados al ciclo diurno de calentamiento y regímenes de humedad reforzados por la presencia de la onda tropical.

En el sondeo de la Figura 39 se observan las condiciones presentes en horas de la mañana para este día, donde persisten capas de inestabilidad condicional en la tropósfera baja y para algunas regiones de la tropósfera media (barras verdes a la derecha de sondeo). También se observa una capa relativamente de menor humedad (mayor depresión del punto de rocío) desde superficie hasta una altura de 2 km, con respecto a la presente en el resto de la tropósfera la cual se presentó muy cercana a la saturación. Además, se registró una capa de vientos entre los 20 kt a 25 kt en niveles medios (de 4 km a 6 km de altura). Los valores alcanzados por los índices de estabilidad predecían la ocurrencia de tormenta eléctrica sobre la estación de acuerdo con las condiciones imperantes en horas de la mañana.

Aunque en muchos casos, la entrada de una onda tropical sobre el país se da en horas de la mañana en los sectores Caribe y su posterior avance durante el transcurso del día sobre el país, esta característica no se cumple para todas las ondas y algunas pueden arribar al territorio nacional en horas nocturnas o avanzada la tarde, estos tipos se han observado con mucho menor regularidad en las labores operativas del IMN, sin embargo a continuación se plantea el efecto en la vertiente del Pacífico, Zona Norte y en el Valle Central:

- a- El sistema induce un aceleramiento del viento en niveles de 925 mb a 700 mb producto de la subsidencia propia de la parte frontal de la onda. Se considera como la responsable de las lluvias matutinas en la vertiente Caribe al ascender e inestabilizar las parcelas húmedas por la orografía.
- b- La posibilidad de menor calentamiento diurno producto del mayor contenido de humedad del sistema, la cual podría estar generado un aumento de nubosidad y por ende suprimir en cierto grado el calentamiento.
- c- Posibilidad de que en la mañana y primeras horas de la tarde no se dé aun la presencia del viento del oeste en GAM producto del aceleramiento de los alisios que, al interactuar en los pasos de montaña, aumenta el viento en el Valle Central y partes altas del Pacífico Norte. Con un posible cambio de viento avanzada la tarde cuando la onda avanza hacia el oeste.

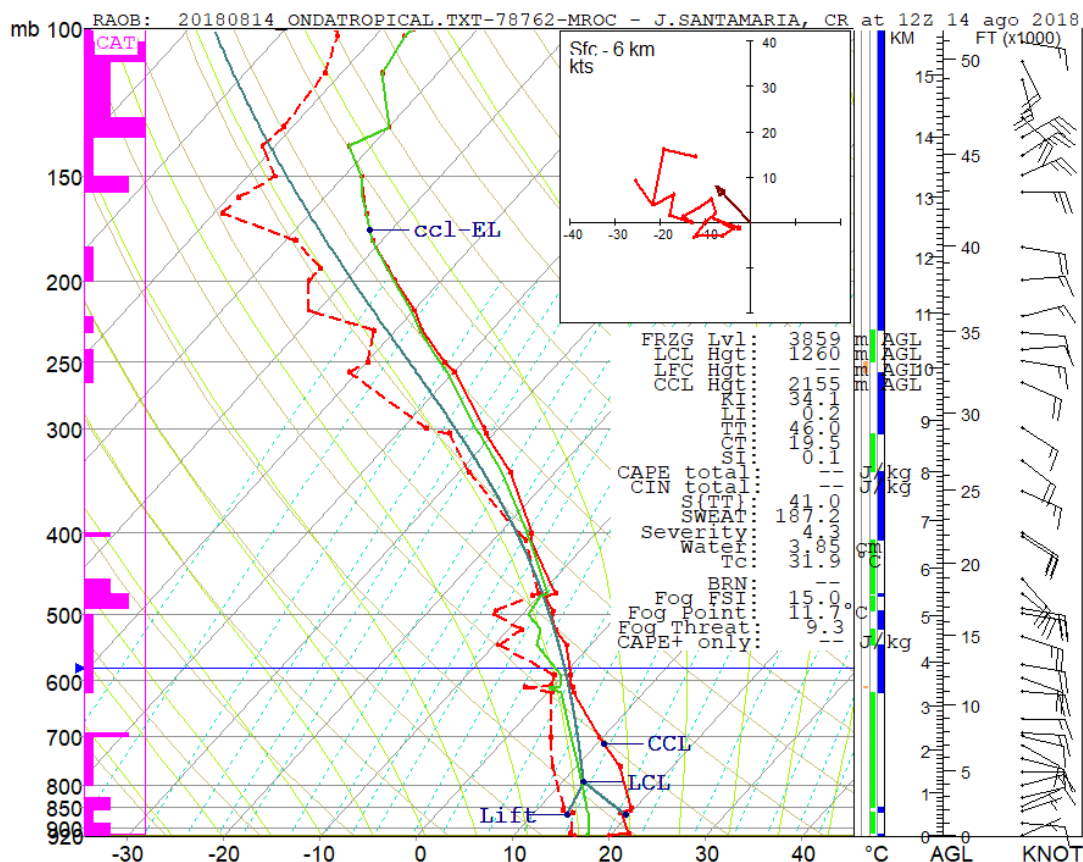


Figura 39: Sondeo meteorológico para el día 14 de agosto del 2018 (12 UTC).

Tomando en cuenta estas consideraciones, el pronóstico realizado en la Figura 40 muestra los siguientes puntos:

- No se estima la entrada de brisa del suroeste sobre el GAM (viento del este en superficie).
- La temperatura de disparo considerada para este día en particular de 26.5°C, al menos tres grados inferiores a la temperatura convectiva del sondeo.
- Se estima siempre el humedecimiento de las capas superficiales (lo cual se refleja en que se estrecha la depresión de punto de rocío) producto del transporte de humedad de la onda tropical.

Con los puntos anteriores se tiene que los índices comparados en la Tabla 8 destacan el aumento de inestabilidad para horas de la tarde con el pronóstico estimado para las 19 UTC, en especial para el índice CAPE. Es importante mencionar que el Nivel de Convección Libre (LFC) se mantiene aún a una altura considerable cerca de los 2.7 km de altura, siendo difícil de alcanzar sin la presencia de brisas del oeste que interactúen con las del este para que propicien los ascensos mecánicos hasta alcanzar estos niveles; o el caso de ascensos adiabáticos por las laderas de las montañas a esas alturas (montañas en la periferia del GAM).

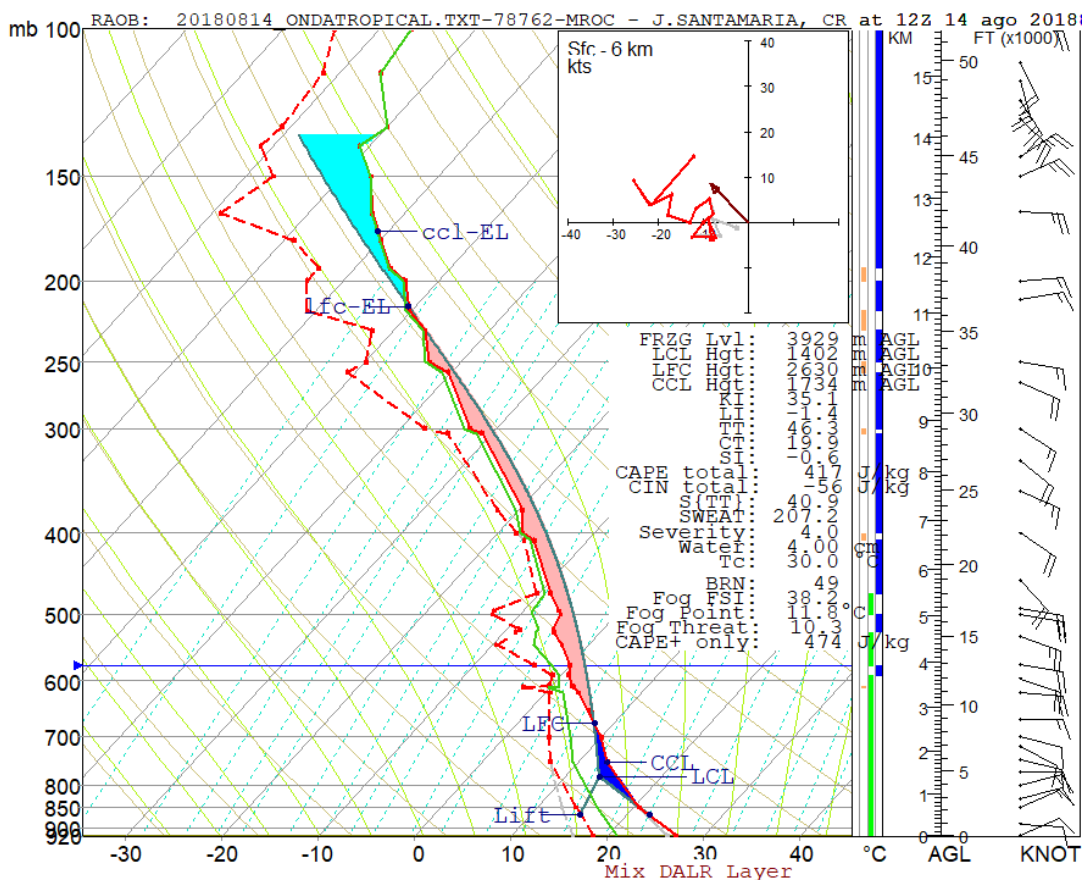


Figura 40: Sondeo meteorológico pronosticado para el 14 de agosto del 2018 (19 UTC).

En el Anexo 7.5 se tienen los reportes METAR de los dos aeropuertos del GAM, donde se observa para el caso del aeropuerto Juan Santamaría en Alajuela brisa marina del suroeste que se presentó tan solo por un lapso de dos horas desde las 16 UTC a las 18 UTC. Por el contrario, en el aeropuerto Tobías Bolaños en Pavas, se registró un aumento del viento desde la 15 UTC manteniéndose pasada la media tarde. Es importante destacar que los análisis de pronóstico para el día revelaban un gradiente de presión leve y una disminución de la intensidad del viento en niveles de 900 mb a 750 mb sobre el país (alturas en las que el viento interactuar con los pasos de montaña), por lo que se le adjudica la no persistencia del viento del suroeste en toda la GAM a la dinámica propia de la onda tropical y su tránsito sobre el territorio nacional, en especial su activación en el Caribe en las primeras horas del día (METAR de MRLM en Anexo 7.5) y posteriormente propiciando la actividad convectiva en las zonas del Pacífico Central y Península de Nicoya en este caso particular. Del presente análisis se puede decir que la energía de la propia onda tropical aporta la inestabilidad necesaria para sustentar actividad convectiva, en acuerdo con otros estudios como los de Quirós e Hidalgo (2017), sobre la actividad de ondas tropicales en el país.

Tabla 8: Rangos de variación de los índices de estabilidad para caso de estudio del 14 de agosto, 2018; 12 UTC (observado) y 19 UTC (pronosticado).

Caso de Estudio: 14 de agosto, 2018.		
ÍNDICE	12Z	19Z
K-INX	34.1	35.2
LI	0.2	-1.4
TT	46	46.4
CT (croxTT)	19.5	20
SI (Show)	0.1	-0.7
CAPE (tt) [J/Kg]	-	430
SWEAT	187.2	212.4
Severity	4.3	3.9
WATER [cm]	3.85	4.01
Tc [°C]	31.9	30
Fog Threat	9.3	10.4

En resumen, aun y cuando los índices de estabilidad para las condiciones iniciales de la mañana y las pronosticadas para horas de la tarde indicaban una tendencia a la inestabilidad sobre el GAM, no se registraron eventos de tormentas eléctricas propias de convección profunda. Los factores de mayor peso para la no ocurrencia el 14 de agosto del 2018 son: una baja temperatura de disparo producto de los vientos y las capas nubosas que se presentaron, poca persistencia en el tiempo de la brisa del suroeste que interactuara con la del este para facilitar la convección mecánica y, un elevado Nivel de Convección Libre que propiciara los grandes desarrollos nubosos. Estas condiciones no ocurrieron para regiones del Pacífico Central, Sur y Península de Nicoya donde las tormentas eléctricas con precipitación fueron en ciertos puntos dispersas, aspecto que se ha observado en muchas ondas tropicales que generan una actividad convectiva intensa en algunas regiones del país, pero no siempre una actividad generalizada, se puede asociar más bien a núcleos convectivos aislados que dan montos de lluvia elevados

5.1.6 Caso 6: Onda Tropical sobre Costa Rica y Baja presión en el Pacífico, 20 julio 2017

El análisis de la combinación de sistemas atmosféricos, como la presencia de dos sistemas de escalas meso y sinóptica, como lo son el paso de una onda tropical sobre el país y la presencia de una baja presión sobre las costas del Pacífico de Costa Rica, representa un gran reto a la hora de determinar qué factores sobresaldrán de cada uno de estos sistemas y el modo de manifestarse, la ubicación de los sistemas se puede ver en la Figura A8.3.

En el sondeo de la Figura 41 se presentan las condiciones iniciales a las 12 UTC para el día en cuestión. Al comparar este sondeo con el de la Figura 11A correspondiente al sondeo promedio para julio, se encuentran similitudes como las de una atmósfera húmeda representada en el perfil de temperatura de ambos sondeos, índices de estabilidad muy semejantes denotando inestabilidad, y un perfil de vientos en toda la tropósfera con

direcciones muy parecidas para ambos (este, sureste). La diferencia principal se encuentra en la intensidad de los vientos para el día en estudio, el cual presenta valores mayores a los de un julio promedio desde el nivel de 850 mb hasta los 300 mb, donde los vientos son superiores a 23 kt con un máximo de 38 kt cerca de los 600 mb, y esto sumado a que julio es un mes con contribución del jet de bajo nivel del Caribe que acelera los vientos de componente este.

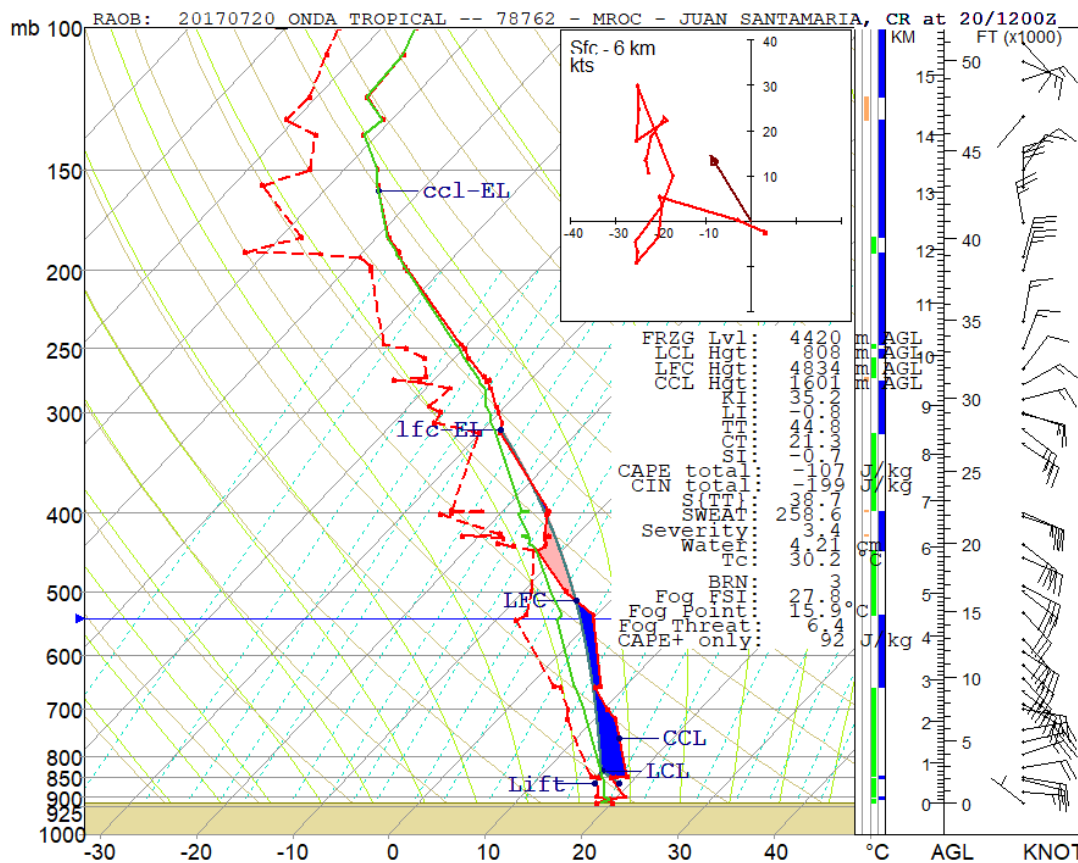


Figura 41: Sondeo meteorológico para el 20 de julio del 2017 (12 UTC).

Otras características de la Figura 41 son la altura del nivel LFC superior a los 4.5 km y el valor inhibitor de convección CIN, el cual deberá suprimirse por factores ya empleados en los casos anteriores como: calentamiento diurno superficial, humedecimiento de capas superficiales o factores dinámicos que desestabilicen la atmósfera inicial.

En el sondeo pronosticado mostrado en la Figura 42 se incorporan factores como:

- Calentamiento diurno en superficie con al menos una temperatura de disparo de 28.5°C.
- Aumento de humedad de la capa superficial producto del transporte generado por los vientos de componente oeste desde el Océano Pacífico.
- Persistencia de vientos acelerados del noreste y este en partes de la atmósfera cercana a superficie y atmósfera media producto de la presencia de la baja presión en las aguas del Pacífico.

Es importante destacar que en IMN (2017a) se informó de poca actividad ocurrida por el paso de esta onda tropical sobre el país. Pese a esto, la importancia de este caso radica en que se logran distinguir características de una atmósfera con la influencia de dos tipos de sistemas tropicales muy frecuentes para el país, análisis de más eventos podrían llevar a una mejor predicción los patrones de actividad que genere de este tipo de interacción.

Tabla 9: Rangos de variación de los índices de estabilidad para caso de estudio del 20 de julio, 2017; 12 UTC (observado) y 20 UTC (pronosticado).

<i>Caso de Estudio: 20 de julio, 2017.</i>		
ÍNDICE	12Z	20Z
<i>K-INX</i>	35.2	37
<i>LI</i>	-0.8	-2.5
<i>TT</i>	44.8	47.4
<i>CT (croxTT)</i>	21.3	21.1
<i>SI (Show)</i>	-0.7	-1.9
<i>CAPE (tt) [J/Kg]</i>	-107	601
<i>SWEAT</i>	258.6	240.6
<i>Severity</i>	3.4	2.3
<i>WATER [cm]</i>	4.21	4.26
<i>Tc [°C]</i>	30.2	30.9
<i>Fog Threat</i>	6.4	8.8

5.1.7 Caso 7: Empuje Frío sobre la costa Caribe de Costa Rica, 11 de diciembre, 2017

Para el presente caso de estudio se tiene el sondeo del día 11 de diciembre del 2017, el cual presentaba la particularidad de una afectación directa de un Empuje Frío (EF) sobre Costa Rica que, el cual para este día tenía su línea de cortante sobre las costas de Sixaola en el Caribe Sur (Figura A8.4 de Anexo 8). La presencia de vientos alisios de moderados a fuertes en el Valle Central y Pacífico Norte (velocidades máximas de 80 a 100 km/h sobre los sistemas montañosos), lluvias de fuertes a moderadas en partes altas de toda la vertiente Caribe (acumulados de 40 a 80 mm/día y máximos puntuales de 130 mm/día) con derrames de lluvias y lloviznas sobre las montañas, y con incursiones en las partes bajas del Valle Central fueron la tónica para el día 11 (IMN, 2017b).

En la Figura 43 se observa el sondeo para el día analizado donde las características propias del empuje se manifiestan, tomando en cuenta que Costa Rica se ubica a una latitud baja donde los frentes adquieren características más tropicales y que el país presenta un sistema montañoso que interacciona directamente con la línea de cortante de los EF, hacen que la diferencia de condiciones que presenta un EF dependa de su ubicación. Con todo esto, se aprecia en el sondeo vientos fuertes superiores a 50 kt en la capa entre de 850 mb y 700 mb.

Comparando este sondeo con el sondeo promedio para el mes de diciembre (Figura 16A), se aprecia como este es más húmedo de lo normal, su gradiente de temperatura

realizadas para el GAM, los mismos se mantienen en su mayoría bajo los intervalos establecidos para la presencia de tiempo convectivo o tormentas eléctricas. La excepción se presenta con los índices *necesarios, pero no suficientes* de agua precipitable (WATER) y la temperatura convectiva T_c , donde esta última es demasiado elevada para ser alcanzada aún para regiones del Pacífico Norte donde la posibilidad de calentamiento es mayor; además del índice SWEAT, el cual mantiene valores altos debido a las cortantes del viento que se mantienen por lo acelerado del viento entre niveles medios y bajos.

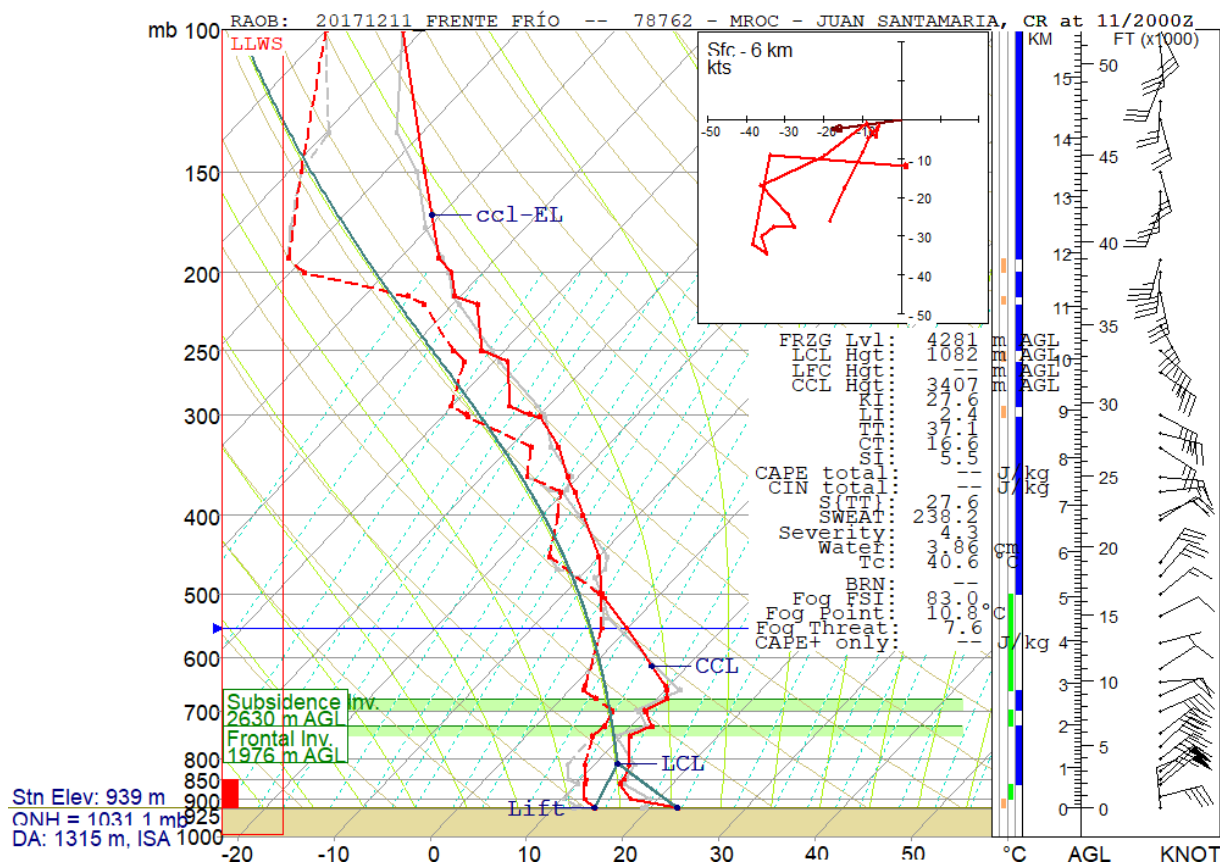


Figura 44: Sondeo meteorológico pronosticado para el 11 de diciembre del 2017 (20 UTC).

En el Anexo 7.7 se tiene los reportes METAR donde se evidencian las principales condiciones atmosféricas características esperadas con un EF en el país. Entre estas están:

- Presencia de ráfagas del este en la mayoría de los reportes de MROC y MRPV para el día de análisis. Se destacan que los vientos más fuertes se presentaron entre las 12 y 14 UTC con vientos promedio de 19 kt y ráfagas de 33 kt en la estación meteorológica ubicada en Alajuela, mientras que en la de Pavas los vientos promedios fueron de 23 kt con ráfagas de 35 kt.
- Persistencia de nubosidad media en el GAM con lloviznas (DZ) hacia los sectores este y norte del Valle Central. Las temperaturas bajas se mantuvieron durante todo el día variando de los 16°C a los 22°C.
- Las condiciones de Liberia (MRLB) para periodos de vientos fuertes sobre el país producto de configuraciones particulares de algunos EF o de altas presiones, son de

vientos del oeste. Esto es debido a que en los pasos de montaña ubicados a ambos lados del volcán Rincón de la Vieja, el viento se acelera y generar este patrón de vientos del oeste o efecto rotor. Su presencia se debe a la vorticidad relativa en este punto generada por el aceleramiento de los vientos.

- d- En los reportes del aeropuerto de Limón (MRLM) se observan vientos de direcciones del oeste y noroeste, producto de efecto rotor que también afecta a la zona baja del Caribe cuando los vientos son muy fuertes del noreste en el Mar Caribe, con lloviznas hacia el final de la tarde.

Algo de lo relevante de utilizar sondeos para el análisis de EF es lograr destacar, como para este caso, en ambos sondeos existe la presencia de Cortante del Viento de Bajo Nivel (LLWS), la cual se manifiesta en la distribución vertical de la variable CAT (ver el Anexo 4) para los meses del invierno boreal en el nivel de superficie. Se puede decir que uno de los causantes de reportes de cortantes del viento en los aeropuertos internacionales del GAM, son la presencia de afectación directa de empujes fríos con sus líneas de cortante y sus fuertes vientos, ya que la estadística de estos concuerda con los meses de afectación.

Lograr reconocer este efecto (LLWS) en los sondeos es crucial para la seguridad aérea, además de poder brindar información de posible turbulencia asociada a este patrón sobre todo cerca de las cadenas montañosas a sotavento del EF, es decir en la vertiente Pacífico.

Tabla 10: Rangos de variación de los índices de estabilidad para caso de estudio del 11 de diciembre, 2017; 12 UTC (observado) y 20 UTC (pronosticado).

<i>Caso de Estudio: 11 de diciembre, 2017.</i>		
ÍNDICE	12Z	20Z
<i>K-INX</i>	26.9	27.6
<i>LI</i>	6.4	2.4
<i>TT</i>	35.8	37.1
<i>CT (croxTT)</i>	14.9	16.6
<i>SI (Show)</i>	6.8	5.5
<i>CAPE (tt) [J/Kg]</i>	-	-
<i>SWEAT</i>	219.8	238.2
<i>Severity</i>	5	4.3
<i>WATER [cm]</i>	3.71	3.86
<i>Tc [°C]</i>	41.4	40.6
<i>Fog Threat</i>	8.1	7.6

5.2 Implementación operativa

Con el objetivo de realizar la implementación operativa del sondeo pronosticado se ha preparado un procedimiento de análisis y pronóstico mediante sondeo, este procedimiento se detalla a continuación.

Parte A: Análisis Base

En primera instancia, para emplear el sondeo observado (12 UTC) como datos de partida para la generación del escenario más probable (pronóstico) para horas de la tarde (por ejemplo, a las 19 UTC), se deben analizar previamente diferentes variables y condiciones dinámicas en los modelos numéricos, estaciones meteorológicas en varios puntos del país e incluso del análisis de las imágenes de satélite, con el objetivo de consensuar los posibles cambios a incorporar en el sondeo. Estos cambios dan paso a mayor (menor) estabilidad atmosférica y por tanto nuevos valores de índices, los cuales indican una menor probabilidad (mayor probabilidad) de convección profunda o tormentas eléctricas.

Con respecto a los análisis base o previos a la elaboración del sondeo de pronóstico, el encargado del pronóstico debe investigar factores dinámicos y termodinámicos como, por ejemplo:

a) Vaguadas, dorsales, circulaciones ciclónicas, anticiclónicas, posición de ondas tropicales, análisis de oscilaciones como Madden Julian (MJO), aumentos de viento, entre otros. Esta dinámica podría influir con advección de temperaturas frías/cálidas, vorticidades positivas/negativas, subsidencias/ascensos, cortantes favorables/desfavorables, etc.,

b) Masas de aire frías y secas, o por el contrario cálidas y húmedas, en distintos niveles de la vertical. Estas condiciones representan diferentes implicaciones para diferentes niveles de la tropósfera baja, y

c) Temperaturas máximas de disparo para las parcelas ascendidas (T_c) y datos de viento de estaciones meteorológicas junto a observaciones de nubes en las imágenes de satélite para anticipar la posible ocurrencia de cambios en el perfil de viento (brisas), que incorporen humedad e importantes variaciones dinámicas en capa límite.

De lo anterior se plantean los siguientes pasos del procedimiento operativo para el uso del sondeo pronosticado:

Parte B: Uso del Programa RAOB (Análisis de Sondeo Observado)

Respecto al uso del programa de despliegue y pronóstico de sondeos (RAOB 6.1), es necesario hacer los ajustes pertinentes para la visualización de datos en los 14 - 16 km (150 - 100 mb), seleccionar el uso del diagrama termodinámico Skew T - Log P y desplegar la hodógrafa del viento. Además, seleccionar los índices a visualizar y observar el análisis de estabilidad de este sondeo de horas de la mañana.

Lo anterior se realiza mediante:

- 1- Abrir con el programa RAOB el archivo de texto *yyyymmdd_TEMPALL.txt* enviado por correo. O en todo caso, descargarlo y guardarlo de la página de la Universidad de Wyoming: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>, el archivo de texto sin formato,

- 2- Clic derecho sobre el área de trazado para el despliegue de ventana: Opciones del diagrama de sondeos,
- 3- En el submenú '*Format*' escoger Skew-T/Log-P, AGL (sobre el nivel de superficie).
- 4- En submenú '*Analyses Data*' seleccionar los índices a evaluar (KI, LI, TT, CT, SI, SWEAT, CAPE, CIN, Water, T_c),
- 5- En '*Hodograph*' marcar: Plotear Hodógrafa y Plotear Vector Movimiento de Tormentas,
- 6- Empleando la opción en la barra de menú principal '*Analyze*', se activa las opciones: Niveles significantes, Ascenso de Parcela, CAPE, Inversiones y Nubes; principalmente, y
- 7- Compare este sondeo observado del día a analizar, con el sondeo promedio de las 12 UTC correspondiente al mismo mes. Observe similitudes y diferencias.

Parte C: Obtener Sondeo Pronosticado

Respecto al modelado vespertino, se procede a incorporar los cambios decididos previamente, junto a procedimientos con las herramientas del programa, en el siguiente orden:

- 1- En el menú '*Forecast*' se despliegan opciones para secciones atmosféricas conocidas como: Capa Principal y Capa Límite,
- 2- En la sección '*Boundary Layer*' se introduce el cambio de temperatura superficial horario ($\approx 1^\circ\text{C/hr}$), una altura de capa de mezcla (1000 m, AGL) y se decide si activar también el uso de esta capa de mezcla para la temperatura de calentamiento,
- 3- Se aumentan las horas de pronóstico ($\ll | < | 0 | > | \gg$): si se prevé un calentamiento diurno significativo, se aumentará como mínimo 7 horas para asegurar al menos 1°C/h para una estimación de las condiciones a las 19 UTC. La selección del rango de horas se hace en base al análisis previo o base que el pronosticador realizó en la Parte A antes descrita, cuyos resultados dependen del día particular en análisis.
- 4- Se incorporan cambios previamente analizados con respecto a la humedad, temperaturas y viento en los niveles deseados (Ej.: Brisas húmedas del suroeste bajo los 850 mb, masas secas aumentado depresión de punto de rocío en 700 mb, 600 mb, 500 mb).
- 5- Se repite paso 6 de Parte B, para volver a visualizar el análisis de estabilidad atmosférico modelado. Se observan los nuevos valores de los índices de estabilidad.
- 6- Se guarda los cambios modelados en el sondeo como un nuevo archivo de texto.
- 7- Se realiza la comparación del sondeo pronosticado obtenido del día analizado, con el sondeo promedio de las 19 UTC para el mismo mes. El pronosticador debe buscar similitudes y diferencias.

Parte D: Respaldo de los Sondeos

El proceso de guardar los datos del sondeo previos (12 UTC) y posteriormente los datos modelados (19 UTC) en formato de *texto.txt*, es con el objetivo de mantener el respaldo de las condiciones iniciales y de las modeladas sobre las cuales se decide la elaboración el pronóstico del día analizado. En otras palabras, el pronosticar o no la presencia de tormentas eléctricas dentro del GAM, se respalda objetivamente con el *archivo.txt* modelado para horas de la tarde de ese día.

Finalmente, se muestra el diagrama de flujo del Procedimiento de análisis y pronóstico mediante sondeo para la parte B a D. Cabe indicar que este procedimiento se implementaría en la oficina de meteorología aeronáutica del IMN destacada en el aeropuerto Juan Santamaria, y este material pasará a formar parte del instructivo de análisis y pronóstico mediante sondeo que implementará la institución.

5.2.1 Diagrama de flujo del Procedimiento de Análisis y Pronóstico mediante sondeo.

Diagrama de Flujo (gráfica)					
Departamento Meteorología Sinóptica y Aeronáutica				Fecha: 01/02/2019	
Instructivo # __: Análisis y pronóstico mediante Sondeo (RAOB 6.1)					
DIAGRAMA DE FLUJO					
Código de tarea	Descripción del proceso	Responsables			Riesgos
	Inicio de proceso				
1	Descarga de archivo TEMPALL.txt de correo personal@imn.ac.cr correspondiente al sondeo de día a analizar.		P		Día sin sondeo
2	<p>Previo análisis de las diferentes condiciones atmosféricas posteriores a la hora del sondeo (horas de la tarde), para la posible incorporación de cambios en el mismo.</p> <ul style="list-style-type: none"> Aumentos de viento en varios niveles en la vertical. Entrada de masas secas/húmedas en capas medias y bajas 		P		Impericia
3	<p>Despliegue de sondeo de 12UTC en programa RAOB 6.1:</p> <ul style="list-style-type: none"> Abrir programa: <i>RAOB 6.1</i>. Abrir <i>archivo.txt</i> de sondeo a analizar. Se da clic derecho para ajustes preliminares como: Usar diagrama Skew T - Log P, ajustar altura a 100mb, desplegar hodógrafa, alturas AGL, índices a visualizar (KI, LI, SI, SWEAT, TT, CT, CAPE, CIN, Water, T_c) Clic en <i>Analizar</i> para activar la visualización de: Niveles significantes, Ascenso de Parcela, CAPE, Nubes, Inversiones, Perfil de bulbo húmedo. Guardar sondeo como <i>ddmmyyyy_OBS12utc.txt</i>. Compare con sondeo promedio 12UTC de este mes. 		P		Datos de sondeo incompleto para los niveles empleados
4	<p>Pronóstico de sondeo a 19UTC en programa RAOB 6.1:</p> <ul style="list-style-type: none"> Clic en el menú <i>Pronóstico</i> donde se debe seleccionar: En la sección <i>Capa Limite</i> el cambio de temperatura requerido ($^{\circ}C/h$), una <i>altura de capa de mezcla</i> de 1000 m; considerar si también para el uso en la <i>temperatura de calentamiento</i>. Aumentar las horas en las flechas superiores y observar los cambios modelados (sugerido 7 horas). Incorporar cambios previamente investigados (tarea 2). Clic en <i>Analizar</i> para visualizar: Niveles significantes, Ascenso de Parcela, CAPE, Nubes, Inversiones, Perfil de bulbo húmedo. 		P		Impericia en estimación de temperatura de disparo y depresión de punto de rocío.
5	<p>Guardar sondeo como <i>ddmmyyyy_PRONO19utc.txt</i>.</p> <p>Compare con sondeo pronosticado 19UTC del mes.</p> <p>Observar cambios de estabilidad, hodógrafa - vector movimiento de tormenta, nuevos valores de los índices comparándolos con los rangos establecidos para la ocurrencia de Tormentas eléctricas.</p>		P		Valores de los índices fuera del rango establecido
	Fin del proceso				

Simbología: P: Pronosticador : Inicio o fin de proceso. : Actividad. : Toma de Decisión.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

Tomando lo analizado y referenciado en el capítulo 1, se evidencia la falta de un estudio referente a los índices de estabilidad y su comportamiento a lo largo del año; en especial con fines de pronóstico a muy corto plazo. El capítulo 2 analiza los principales puntos físicos y termodinámicos de los índices de estabilidad, siendo de principal interés las diferencias de temperaturas y humedad presente en niveles troposféricos bajos (< 700 mb) respecto a niveles medios (500 mb).

La metodología empleada en el presente trabajo (capítulo 3), brindó resultados no solo de los sondeos promedio mensuales a lo largo del año y sus respectivos índices de estabilidad, sino que también las distribuciones verticales de variables atmosféricas útiles para la comparación y el análisis con una atmósfera patrón. A continuación, se presentan las conclusiones y recomendaciones al capítulo de análisis y resultados.

El empleo de los índices de estabilidad para determinar la posibilidad de tormentas debe de ir de la mano de un previo conocimiento de la física empleada en el cálculo de cada índice. Factores como razones de cambio de temperaturas, humedad, cortante del viento deben de ser de conocimiento para la decisión de validar los índices y sus rangos de variación.

Los sondeos promedio de los primeros tres meses del año representan las atmósferas típicas más secas, por el contrario, las más húmedas son las registradas en los sondeos promedio de junio a octubre, en acuerdo con los resultados de otros tipos de estudios realizados sobre el patrón climático tipo Pacífico en Costa Rica (Garbanzo, 2011).

Los índices promedio resumidos en la Tabla 3, representan los rangos de variación de los índices de estabilidad para la presencia de actividad convectiva y con tormentas eléctricas, dentro del Gran Área Metropolitana.

Los índices de estabilidad describen una atmósfera promedio más inestable para inicios de la época lluviosa de la vertiente Pacífico, que la presentada a finales de esta. En general, considerando lo cuantificado por cada índice: los contrastes de temperaturas y grados de humedad entre las capas bajas y las capas medias son mayores (son menores) para los meses de abril a junio (de julio a noviembre).

Como resultado de la presente investigación se considera a los índices KI, LI, SI, SWEAT, TT y CT como *condiciones suficientes* a la hora de utilizarlos como predictores de actividad convectiva en el área metropolitana. Por el contrario, índices como PWAT y T_c resultaron ser *necesarios, pero no suficientes* a la hora de utilizarlos como predictor de actividad convectiva.

La eficacia en predicción de actividad convectiva utilizando los intervalos de los índices de estabilidad va de la mano con la posibilidad de que las parcelas de aire alcancen niveles como LCL y LFC. Esto ocurre cuando las masas húmedas de aire marítimo (brisa marina) incursionan en territorio continental y ascienden mecánicamente por la topografía, o bien cuando una atmósfera más estática (sin fuertes cortantes) pero con buen calentamiento diurno asciende termal hasta alcanzar estos niveles. Ambos mecanismos son posible en cualquiera de las vertientes del país.

El *Método de la Parcela* utilizado en este estudio es basado primordialmente en procesos adiabáticos, por lo que no tiene en cuenta otros fenómenos que afectan la estabilidad como lo son: mezcla horizontal en nubes cumuliformes y su entorno, mezcla vertical tanto dentro como fuera de las corrientes descendentes y ascendentes, procesos de fricción y arrastre, reducciones de flotabilidad por el peso del agua condensada, arrastre de precipitación al caer, entre otros factores de microfísica de nubes que pueden ser ampliamente estudiados con otras herramientas como radares meteorológicos. Sin embargo, por medio de la comprensión básica de la termodinámica atmosférica, el encargado de pronóstico debe ser capaz de considerar las generalidades de estos fenómenos y en la medida de lo posible incorporar estos procesos a la hora de manipular y modular los datos del sondeo, en especial para fines de pronóstico de corto plazo. Esto se puede realizar mediante del conocimiento de los patrones promedio que se lograron extraer en la presente investigación y por medio de la ejemplificación de los casos presentados.

La presencia de valores altos de temperatura potencial equivalente a niveles más elevados de la tropósfera baja para junio y setiembre facilita la presencia de sistemas convectivos multicelulares, aunado a la presencia de un patrón de cortante del viento direccional bajo que facilita la evolución de estos.

Por medio de los análisis realizados se logró identificar que el desplazamiento de una célula convectiva (tormenta) es en promedio hacia la dirección *noroeste* con velocidad de 8 kt debido al patrón predominante de vientos del este-sureste, aunque para los meses donde más casos de tormenta eléctrica se registran (junio y setiembre), este desplazamiento tiende a ser al norte y/o casi estacionario. Es importante destacar la utilidad de esto en el pronóstico de trayectorias de tiempo severo y como complemento al análisis de imágenes satelitales para determinar las posibles trayectorias de células convectivas.

Se logró constatar como los meses correspondientes a la época seca de la vertiente Pacífico están caracterizados por una importante cortante del viento de niveles medios a altos, lo que corresponde con los patrones de inhibición de actividad convectiva y por tanto con la no formación de tormentas eléctricas.

Se identificó que el periodo canicular presenta un aumento de la cortante del viento desde niveles bajos a medios. Resultado particularmente importante para los días caniculares los cuales son difíciles de pronosticar.

En promedio, los vientos más fuertes que se registran en los 16 km más bajos de la tropósfera costarricense son de dirección suroeste con una magnitud de 35 kt, presentes en invierno boreal rondando el nivel de 150 mb. Resultado en acuerdo con lo expuesto por Garbanzo (2011).

La posibilidad de presentarse Turbulencia del Aire Claro (CAT) en la atmósfera baja costarricense, aumenta para verano e inicios de primavera boreal desde los 250 mb a los 100 mb. Resultado de particular importancia para la industria de la aviación nacional domestica e internacional, ya que es uno de los principales riesgos que enfrentan las aeronaves en ruta.

El cálculo del contenido de agua promedio ('Water') en la atmósfera de Costa Rica para valores superiores a 1 cm, es significativo solo para la capa desde la superficie hasta los 5 km, esto para los meses la época lluviosa en la vertiente Pacífico. Los mayores valores (≈ 2 cm) se encuentran alrededor de los 2.5 km de altura sobre la superficie.

En promedio, los índices de estabilidad apuntan al mes de junio como el más inestable, el de mayor probabilidad de tiempo severo y de convección profunda asociada de todos. Este resultado es determinante en los análisis de los pronosticadores y en la emisión de alertas, como por ejemplo de inundaciones repentinas que afecten en especial el Gran Área Metropolitana.

La identificación de patrones clave en las diferentes variables atmosféricas analizadas en este estudio, brinda soporte al encargado de pronóstico a la hora de decidir si las condiciones prevalecientes en un sondeo se: mantendrán, estabilizarán, o desestabilizarán; apoyándose en métodos objetivos en el momento en que se desea modelar la atmósfera, esto cuando se utilice la herramienta de pronóstico del sondeo.

Se desprenden de los casos de estudio para la ocurrencia de tormenta eléctrica con granizo las siguientes características para los sondeos pronosticados: altos valores del índice CAPE que propician fuertes corrientes ascendentes, alturas cercanas a los 13 km del nivel EL que faciliten la formación de grandes cumulonimbos y bajos niveles de temperatura cero de bulbo húmedo (T_{w0}) inferiores a los 4 km.

Los resultados obtenidos por medio del promediado de variables a niveles característicos suavizan particularidades propias de cada época del año de niveles significativos distintos de los empleados. Así pues, empujes fríos, bajas presiones, ondas tropicales, altas presiones, ciclones tropicales, vaguadas troposféricas, masas de aire secas y húmedas, entre otros sistemas atmosféricos; modulan las condiciones a estar bajo o sobre el promedio y propiciando los diferentes extremos que estos conlleva.

Otro resultado de esta investigación es que se logró establecer un procedimiento operativo, que servirá de guía en la elaboración de un instructivo para que los sondeos sean utilizados en forma operativa por el personal de meteorología aeronáutica. Esto repercute positivamente en la elaboración de informes meteorológicos del aeropuerto Juan Santamaría, lo cual favorece la seguridad operativa de dicho aeropuerto al aumentar la posibilidad de pronosticar las condiciones menos favorables para la aviación.

Para estudios posteriores se recomienda incorporar datos de sondeo a mayor cantidad de niveles significativos (cualquier altura), con el objetivo es obtener un promedio que aumente la resolución de datos en la vertical, además de incorporar más años de lanzamientos y nuevos casos de estudio que complementen los analizados. Otra recomendación es que se repitan análisis como los aquí presentados, para otros sitios en los que se realice lanzamiento de sondeos en el país.

Además, se sugiere que a futuro se contemplen estudios sobre la correlación existente entre la cantidad de precipitación registrada para cierta área o región en particular, y el contenido de agua ('Water') reportado por el sondeo (con el empleo de satélites, radares, estaciones pluviométricas), ya que este tipo de dato puede ser de mucha utilidad en el diseño de obras de infraestructura que deben soportar cantidades de precipitación altas. El plantear un método que calcule en una forma más certera este dato, puede resultar de gran provecho para mitigar los efectos del Cambio y Variabilidad Climática del país.

Referencias

- Ahrens, C. D. (2008). *Essentials of meteorology: An invitation to the atmosphere*. Belmont, CA: Thomson Brooks/Cole.
- Air Weather Service. (1979). *The Use of the Skew-T Log-P Diagram in Analysis and Forecasting*, AWS/TR-79/006. Dec. 1979, revised November 1987.
- Air Weather Service. (1992). *Using Hodographs in Thunderstorm Forecasting*, AWS/TR-92/002 by Lt.Col Gregory D. Nastrom, 20pp
- Alvarado, L.F., Fernández W. (2001). *Climatología de la Atmósfera Libre sobre Costa Rica*. Top. Meteor. Oceanog., (8)2, 89-115.
- Amador, J. (1998). *A climatic feature of the tropical Americas: The trade wind easterly jet*. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos, 5(2), 91-102.
- COMET Program. (2003-2016). *Principios de convección III: Cizalladura y tormentas convectivas*. Julio del 2018, MetED-UCAR. Recuperado de https://www.meted.ucar.edu/index_es.php
- Convective Condensation Level, AMS. (2012). *American Meteorological Society*. Meteorology Glossary. Recuperado de <https://bit.ly/2Ei8b3J>.
- Davies, J., Johns, R. (1993). *Some wind and instability parameters associated with strong and violent tornadoes*. 1. Wind shear and helicity. The Tornado: Its structure, Dynamics, Prediction and Hazards. Monogr., vol. 79. Amer. Geophys. Union, 573-582.
- Fernández, W., Hidalgo, H. (1997). *Distribución espacio - temporal de la ocurrencia de tormentas eléctricas en Costa Rica*. Top. Meteor. Oceanog., 4 (1), 63-77.
- Galway, J. G. (1956). *The lifted index as a predictor of latent instability*. Bull. Amer. Meteor. Soc., 528-529.
- Garbanzo, M. (2011). *Climatología y Variabilidad Diurna de la Atmósfera Libre sobre Costa Rica durante los veranos del 2004 al 2007 y el invierno del 2006*. Tesis de Maestría. UCR. San José, Costa Rica.
- George, J. J. (1960). *Weather Forecasting for Aeronautics*. Academic Press. 673 pp.
- Holton, J. R. (2013). *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Academy Press.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2016a). *Climatología Aeronáutica. Aeropuerto Internacional Juan Santamaría*. IMN-MINAE. Recuperado de <https://goo.gl/dk59RX>.
- Instituto Meteorológico Nacional y Comité Regional de Recursos Hidráulicos. (2008). *Clima, Variabilidad y Cambio Climático en Costa Rica*. Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Comité Regional de Recursos Hidráulicos (CRRH), San José, Costa Rica.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2017a). *Boletín Meteorológico Mensual. Julio-2017*. Instituto Meteorológico Nacional. Ministerio de Ambiente y Energía. San José, Costa Rica. Recuperado de <https://www.imn.ac.cr/boletin-meteorologico>.

Instituto Meteorológico Nacional. (2017b). *Boletín Meteorológico Mensual. Diciembre-2017*. Instituto Meteorológico Nacional. Ministerio de Ambiente y Energía. San José, Costa Rica. Recuperado de <https://www.imn.ac.cr/boletin-meteorologico>.

Instituto Meteorológico Nacional. (2016b). *Boletín Meteorológico Mensual. Noviembre-2016*. Instituto Meteorológico Nacional. Ministerio de Ambiente y Energía. San José, Costa Rica. Recuperado de <https://www.imn.ac.cr/boletin-meteorologico>.

Instituto Meteorológico Nacional. (2016c). *Huracán OTTO. Reporte Técnico*. Instituto Meteorológico Nacional. Ministerio de Ambiente y Energía, 84 pp.

Level of Free Convection, AMS. (2012). *American Meteorological Society. Meteorology Glossary*. Recuperado de <https://bit.ly/2Ei8b3J>.

Lifting Condensation Level, AMS (2012). *American Meteorological Society. Meteorology Glossary*. Recuperado de <https://bit.ly/2Ei8b3J>.

López, L., García-Ortega, E., Sánchez, J. L. (2006). *A short-term forecast model for hail*. Atmospheric Research, Vol 83, 176-184.

Maddox, R. A. (1976). *An evolution of tornado proximity wind and stability data*. Mon. Wea. Rev., 104, 103-142.

Magaña, V., Amador, J. A., Medina, S. (1999). *The Mid-Summer Drought over México and Central America*. Journal of Climate, 12 (6): 1577-1588.

Manzato, A. (2005). *Sounding-derived indices for neural network based short-term thunderstorm and rainfall forecasts*. Atmospheric Research, Vol 83, 349-365.

Miller, R. C. (1972). *Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central*. Tech. Rept. 200(R). Headquarters, Air Weather Service, USAF., 190 pp.

Muñoz, A. C., Fernández, W., Gutiérrez, J. (2002). *Variación estacional del viento en Costa Rica y su relación con los regímenes de lluvia*. Top. Meteor. Oceanog., 9(1) 1-13.

National Hurricane Center. (2018). *Tropical Cyclone Report: Hurricane Nate. AL162017*. USA. NHC.

National Hurricane Center. (2017). *Tropical Cyclone Report: Hurricane Otto*. 10 agosto, 2018, NOAA. Recuperado de https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL162016_Otto.pdf.

National Weather Service Training Center. (2000). *Skew T Log P Diagram and Sounding Analysis*. NWSTC RTM - 230. Kansas City, MO 64153

Organización Meteorológica Mundial. (2010). *Manual de Claves. Claves Internacional, OMM - N° 306*. Vol. 1.1.

Organización Meteorológica Mundial. (1969). *Turbulencia en Aire Claro y en Frío. Nota técnica N° 38*. OMM - N° 38. Ginebra, Suiza.

Organización Meteorológica Mundial. (2017). *Vocabulario Meteorológico Internacional, OMM - N°182*.

Pagen, D. (1992). *Understanding the sky. A sport pilot's guide to flying conditions*. Mingoville PA 16856, United States of America.

Precipitable Water, AMS (2015). *American Meteorological Society*. Meteorology Glossary. Recuperado de <https://bit.ly/2Ei8b3J>.

Quirós, E., Hidalgo, H. (2017). *Interacción de la Zona de Convergencia Intertropical del Pacífico Este con Sistemas Tropicales*. Revista Tópicos Meteorológicos. IMN.

Rapp, A.D., Peterson, A.G., Frauenfeld, O.W., Quiring, S.M., Roark, E.B. (2014). *Climatology of Storm Characteristics in Costa Rica using the TRMM Precipitation Radar*. Journal of Hydrometeorology. 19, 2615-2633. DOI: 10.1175/JHM-D-13-0174.1.

Showalter, A. K. (1947). *A stability index for forecasting thunderstorms*. Bull. Amer. Meteor. Soc., 34 pp., 250 – 252.

Universidad de Wyoming. (2018). *Sounding Station Parameters and Indices*. Departamento de Ciencias Atmosféricas. Recuperado de <http://weather.uwyo.edu/upperair/indices.html>.

Wang, J., Sheng, Z., Zhou, B., Zhou, S. (2013). *Lightning potential forecast over Nanjing with denoised sounding-derived indices based on SSA and CS-BP neural network*. Atmospheric Research, Vol 137, 245-256.

Wet-Bulb Temperature, AMS. (2012). *American Meteorological Society*. Meteorology Glossary. Recuperado de <https://bit.ly/2Ei8b3J>.

Wilks, D.S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences.2ed*. Elsevier. 337398. New York.

ANEXOS

Anexo 1: Niveles en el diagrama termodinámico y hodógrafas características

A1.1 Hodógrafa

Es el gráfico generado por las líneas que unen los extremos de los vectores que representan el viento (coordenadas polares) en altitud para niveles sucesivos de la atmósfera (OMM, 2017).

La hodógrafa característica para una tormenta de *célula convectiva unitaria* es la presente en la Figura A1a, la cual está presente en ambientes de cortante débil. En el caso de la *convención multicelular* (Figura A1b), se presenta en ambientes de cortantes de viento direccionales (cortante unidireccional). Finalmente, en los casos de hodógrafas semicurvas características de ambientes con cambios de viento en la dirección de bajo nivel, y de incrementos de su velocidad con la altura (Figura A1c); son propias de *supercélulas convectivas* o tormentas supercelulares (AWS, 1992).

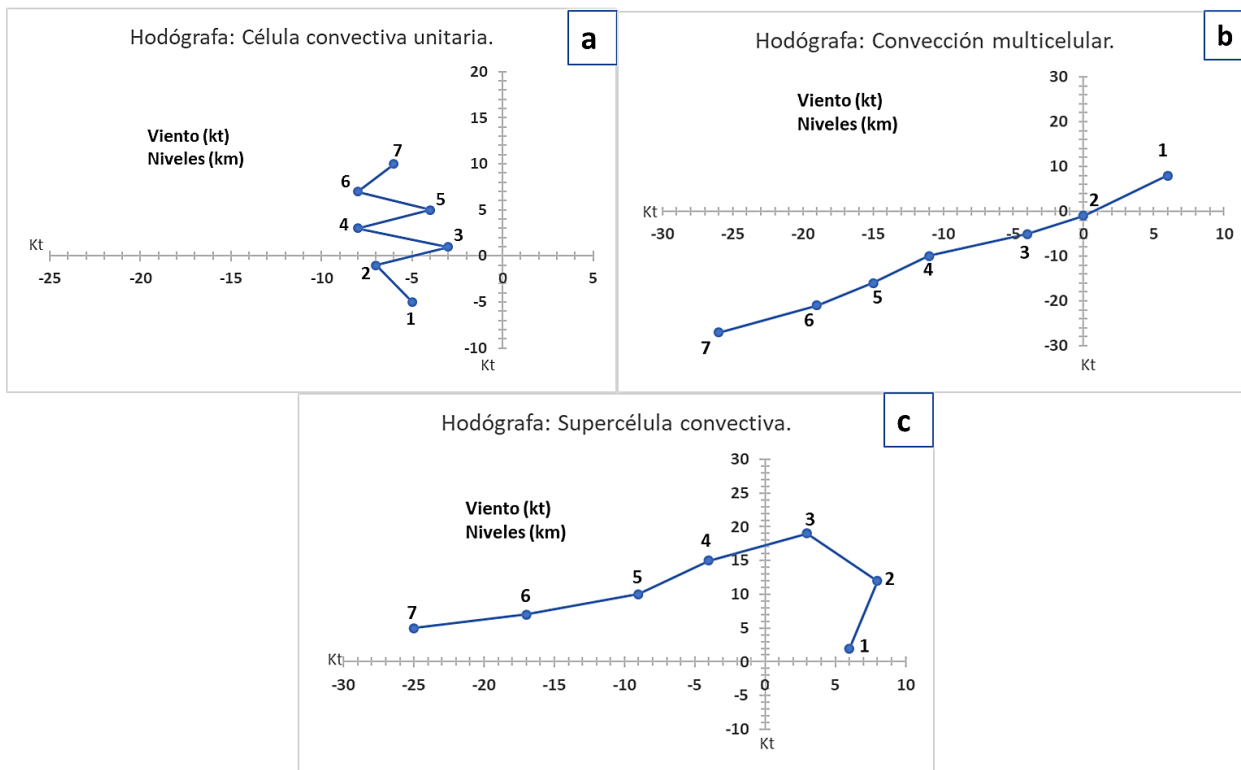


Figura A1.1: Hodógrafas del viento típicas para convección (a) celular unitario, (b) multicelular y (c) supercelular (Adaptado de AWS/FM-92, 1992).

A1.2 Nivel de Condensación Convectivo (CCL)

Es el punto en el diagrama termodinámico donde se intersecan las curvas de temperatura del sondeo, con la razón de mezcla de saturación que corresponde a un promedio de razón de mezcla en la capa más superficial de la atmósfera (los 500 m más bajos de la atmósfera).

Desplazándose desde este punto por la línea adiabática seca hasta superficie se puede medir la temperatura aproximada a la cual se debe calentar la parcela de aire, antes de ser llevada por un proceso adiabático seco hasta el nivel de condensación por elevación (LCL) sin ser enfriada por su entorno. Esta temperatura convectiva es de uso común en pronóstico para estimar la posibilidad del inicio de la convección (AMS, 2012).

A1.3 Nivel de Condensación por elevación (LCL)

Es el nivel donde la parcela húmeda, que ha sido elevada por un proceso adiabático seco, llegaría a saturarse.

Para determinarlo dentro del diagrama termodinámico, sería la intersección de la adiabática seca traída de la temperatura de la parcela en su presión original con la línea de razón de mezcla de saturación, teniendo el mismo valor de razón de mezcla de la parcela (AMS, 2012).

A1.4 Nivel de Convección Libre (LFC)

El nivel donde una parcela de aire elevada adiabáticamente se calentaría primero que su entorno en una atmósfera condicionalmente inestable (AMS, 2012).

A1.5 Nivel de Equilibrio (EL)

Es el nivel donde la parcela que es elevada por la boyantes, mediante un proceso adiabático seco desde superficie (o desde los 500 m más superficiales) hasta el *LCL*, y luego por uno adiabático húmedo hasta el nivel sobre el cual la temperatura de la parcela es la misma que la de su entorno. Si existe más de un EL, el más alto de ellos es el escogido (AWS, 1979).

A1.6 Temperatura del bulbo húmedo (T_w)

En una parcela de aire a presión constante, sería la temperatura a la que se enfriaría esta mediante la evaporación de agua dentro de esta (AMS, 2012). La temperatura cero del bulbo húmedo (T_{w0}) sería determinada en el nivel donde se intersecan la isoterma 0°C y el perfil de temperatura de bulbo húmedo.

Anexo 2: Mensaje TEMP de radio-sondeo y descripción de la decodificación de la sección TTA

Figura A2: Mensaje TEMPALL de radio-sondeo meteorológico de la estación 78762 - Aeropuerto Internacional Juan Santamaría, para el 04 de junio del 2015.

```

USCS01 MROC 041100
TTAA 54111 78762 99917 18202 36002 00080 ///// ///// 92768
///// ///// 85502 19036 12512 70147 09024 14012 50587 04158
12528 40760 14334 12023 30972 29750 13022 25099 40160 13504
20247 53156 26511 15426 69347 28509 10658 80158 05022 88117
81556 35020 77999 31313 48008 81110 51515 10164 00006 10194
10510 13009=

NNNN
UKCS01 MROC 041100
TTBB 54118 78762 00917 18202 11912 21433 22908 21638 33891
22256 44735 12245 55705 09223 66680 07605 77576 00821 88550
00760 99522 03532 11491 04760 22401 14331 33381 16350 44318
25958 55296 30750 66281 33157 77265 36956 88242 41962 99210
50363 11198 53750 22180 58942 33159 66339 44117 81556 55105
82757 66100 80158 31313 48008 81110=

PPBB 54118 78762
90034 36002 07010 10510 90567 13014 12510 11510 9089/ 14006
13508 91024 15010 12019 13524 9169/ 14525 12527 92023 13029
13033 12034 92456 11033 11525 12522 928// 09014 93045 13016
14518 13513 937// 15002 94146 26510 23514 23011 948// 31010
95023 33020 34022 01529 9545/ 01537 05022=

NNNN
ULCS01 MROC 041100
TTCC 54112 78762 70862 69368 08527 50066 61780 07526 30382
55982 08057 20648 49184 25514 88436 63979 08035 77999 31313
48008 81110=

NNNN
UECS01 MROC 041100
TTDD 5411/ 78762 11975 78359 22888 82159 33808 76162 44745
78163 55691 68569 66655 70772 77618 65576 88585 65377 99570
65778 11493 60781 22436 63979 33408 64579 44341 58981 55319
59981 66270 51384 77231 45985 88196 49184 31313 48008 81110=

PPDD 54118 78762
95567 06014 14018 14529 9589/ 13521 11011 96012 10514 07519
09524 96346 07535 10031 09518 9678/ 06519 08526 97014 08028
07533 10541 97567 08542 10044 07549 9789/ 08546 08057 98024
09044 10055 09516 98578 22510 20010 25014 989// 29513=

```

Decodificación de mensaje

TT = letras para designar un informe TEMP.

- Partes
- **AA** y **BB**: Hasta la superficie isobárica de 100 mb inclusive. AA para niveles característicos y BB para los niveles significativos.
 - **CC** y **DD**: Por encima de la superficie isobárica de 100 mb. CC para los niveles característicos y DD para los niveles significativos.

- YYGGI_d**
- **YY**: Fecha. Se le sumarán 50 si el viento se expresa en nudos.
 - **GG**: Hora UTC.
 - **I_d**: Nivel hasta el que se incluye el dato de viento.

lliii: Número de identificación internacional de la estación (78762).

99P₀P₀P₀ T₀T₀T_{a0}D₀D₀ d₀d₀f₀f₀

Presión (**P₀P₀**), Temperatura (**T₀T₀T_{a0}**), Depresión de punto de rocío (**D₀D₀**), Dirección del viento (**d₀d₀f₀**) y velocidad para el nivel de superficie (**f₀f₀**).

...

...

P_nP_nh_nh_nh_n T_nT_nT_{an}D_nD_n d_nd_nf_nf_n

Nivel estándar de presión, Altura en metros geopotenciales (**h_nh_nh_n**), Temperatura, Depresión de punto de rocío, dirección del viento y velocidad para el nivel de presión **P_nP_n**.

88: Indica que a continuación se dará información del nivel de la tropopausa.

77: Indica que a continuación se informarán los datos en el nivel de viento máximo (por encima de 500 mb y siempre que la velocidad supere los 60 Kt).

Fuente: OMM-306 (2010). Manual de Claves Internacionales.

Anexo 3: Temperaturas promedio máxima y temperatura de rocío promedio (19 UTC) registradas en la estación meteorológica del aeropuerto Internacional Juan Santamaría y utilizadas para uso en el sondeo pronosticado mensual

Tabla A3.1: Temperaturas Promedio Máxima mensual. Estación 78762 - Aeropuerto Int. Juan Santamaría.

Temperatura promedio máxima							Periodo: 2011 - 2015					
MES	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>
Prom. Máx.	27	28	28	29	28	27	27	27	27	26	26	27

Tabla A3.2: Temperatura de Rocío Promedio a las 19 UTC. Estación 78762 - Aeropuerto Int. Juan Santamaría.

Temperatura Rocío promedio							Periodo: 2011 - 2015					
Hora/MES	<i>Ene</i>	<i>Feb</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>May</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Sep</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dic</i>
1:00 p.m.	14	13	14	16	18	19	18	19	20	20	18	16

Anexo 4: Distribución vertical de variables complementarias

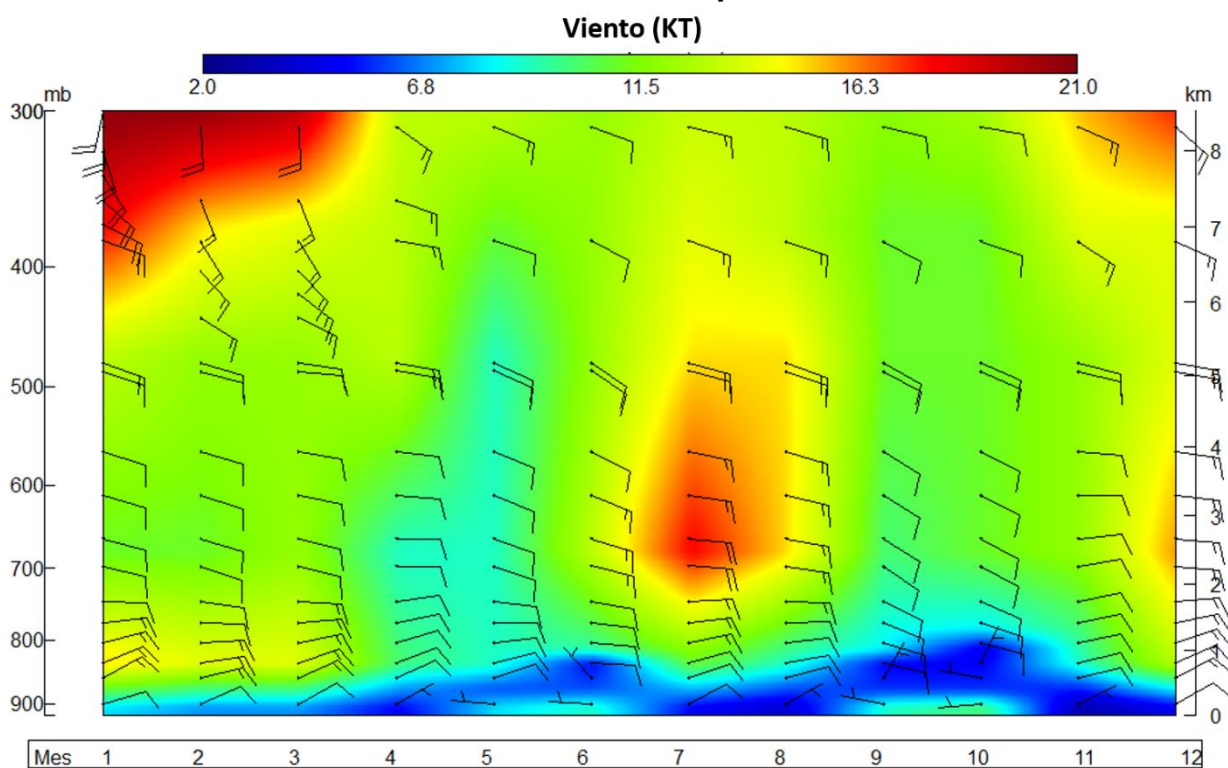


Figura A4.1: Detalle de la velocidad promedio mensual del viento a las 19 UTC. Periodo 2013-2017.

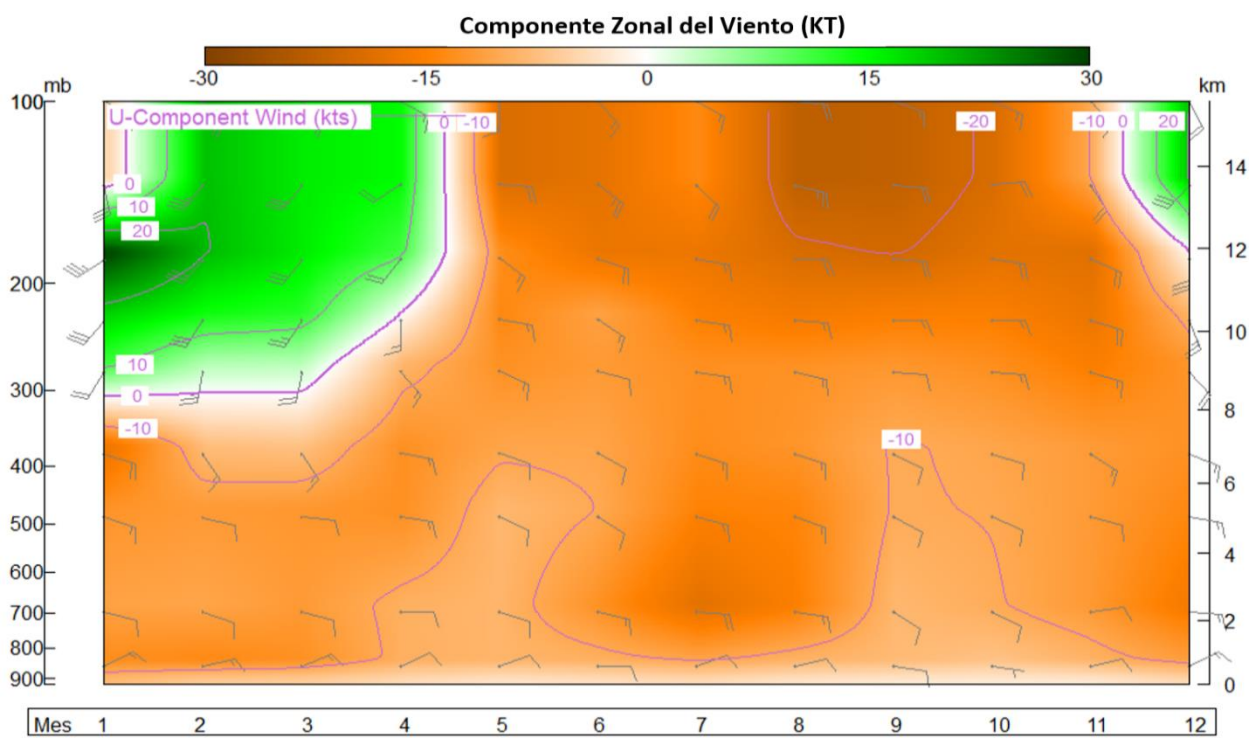


Figura A4.2: Componente zonal promedio mensual del viento. Periodo 2013-2017.

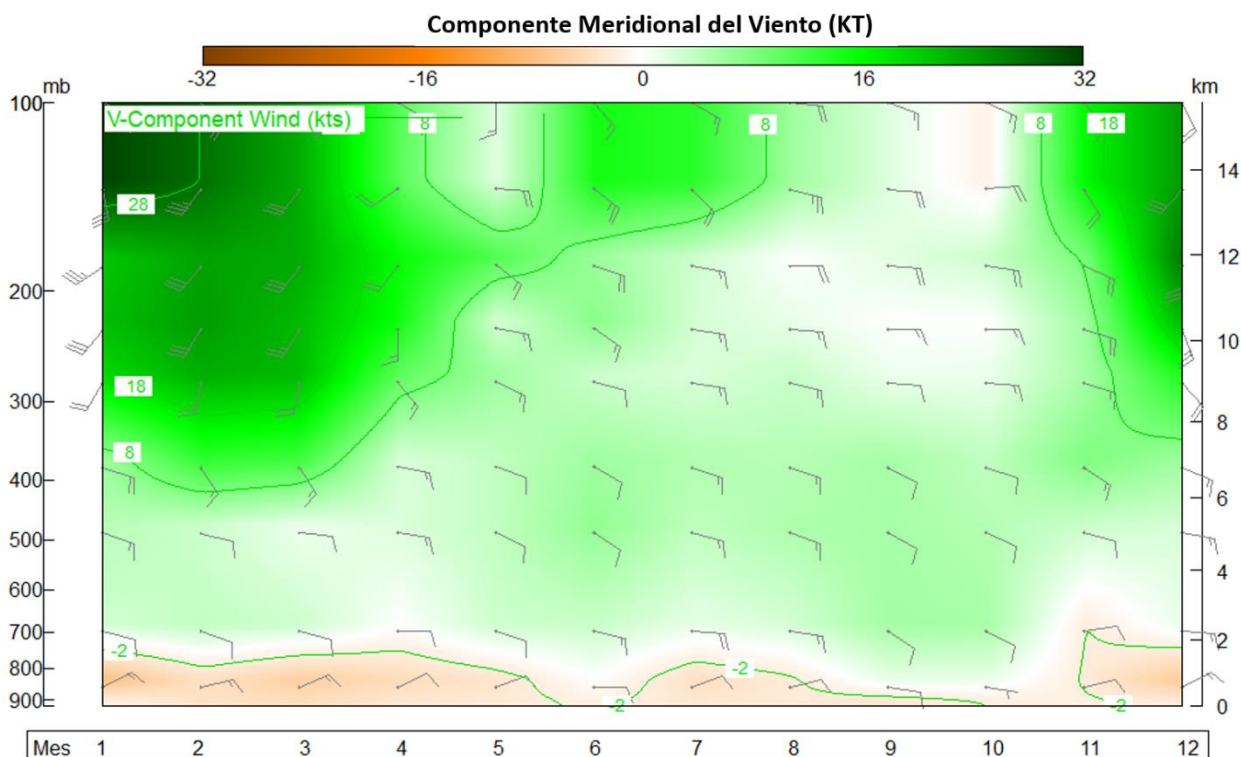


Figura A4.3: Componente meridional promedio mensual del viento. Periodo 2013-2017.

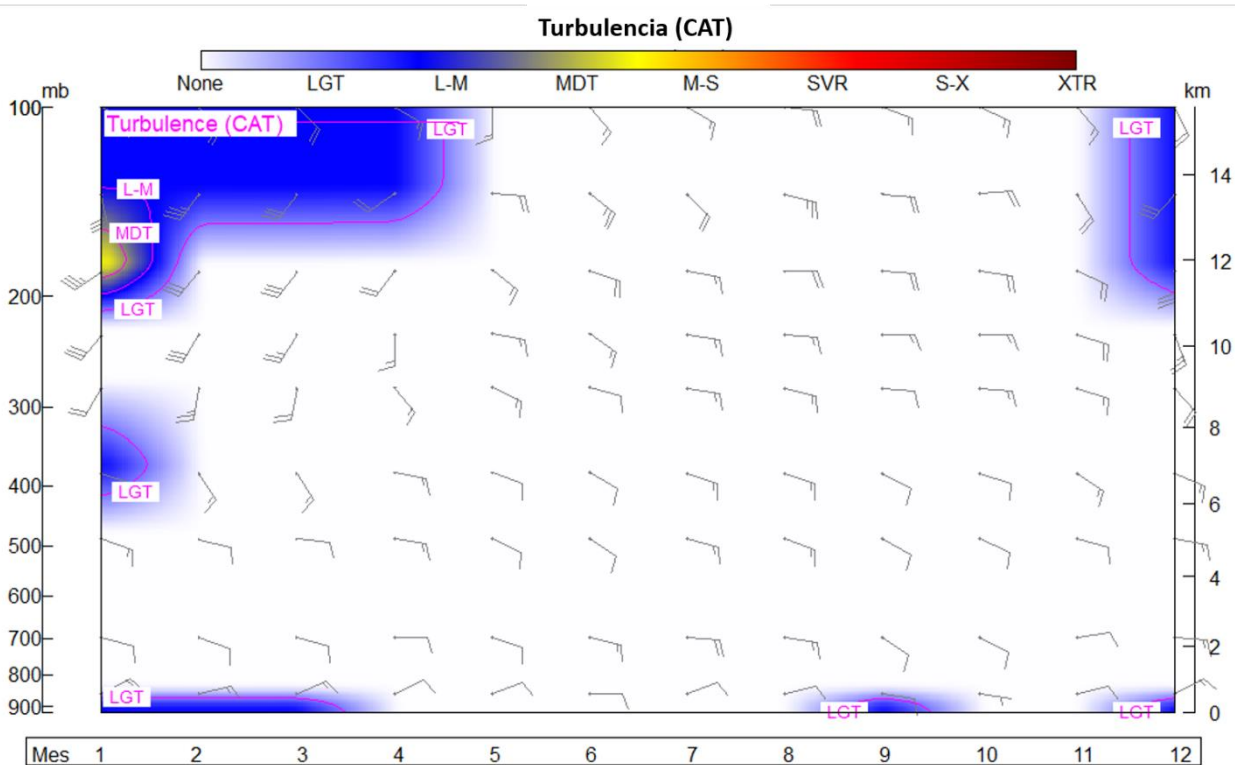


Figura A4.4: Turbulencia de aire claro (CAT) debida a la cortante del viento promedio mensual. Periodo 2013-2017.

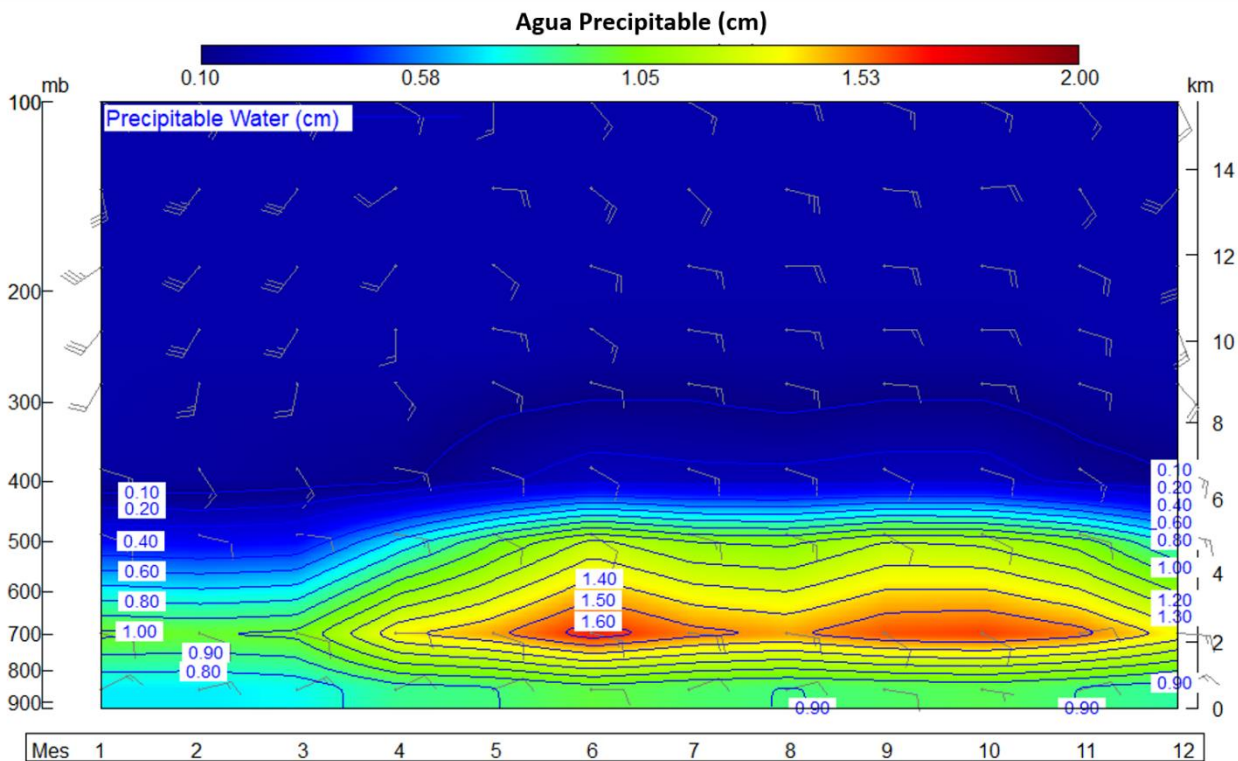


Figura A4.5: Contenido de Agua Precipitable promedio mensual en función de la altura. Periodo 2013-2017.

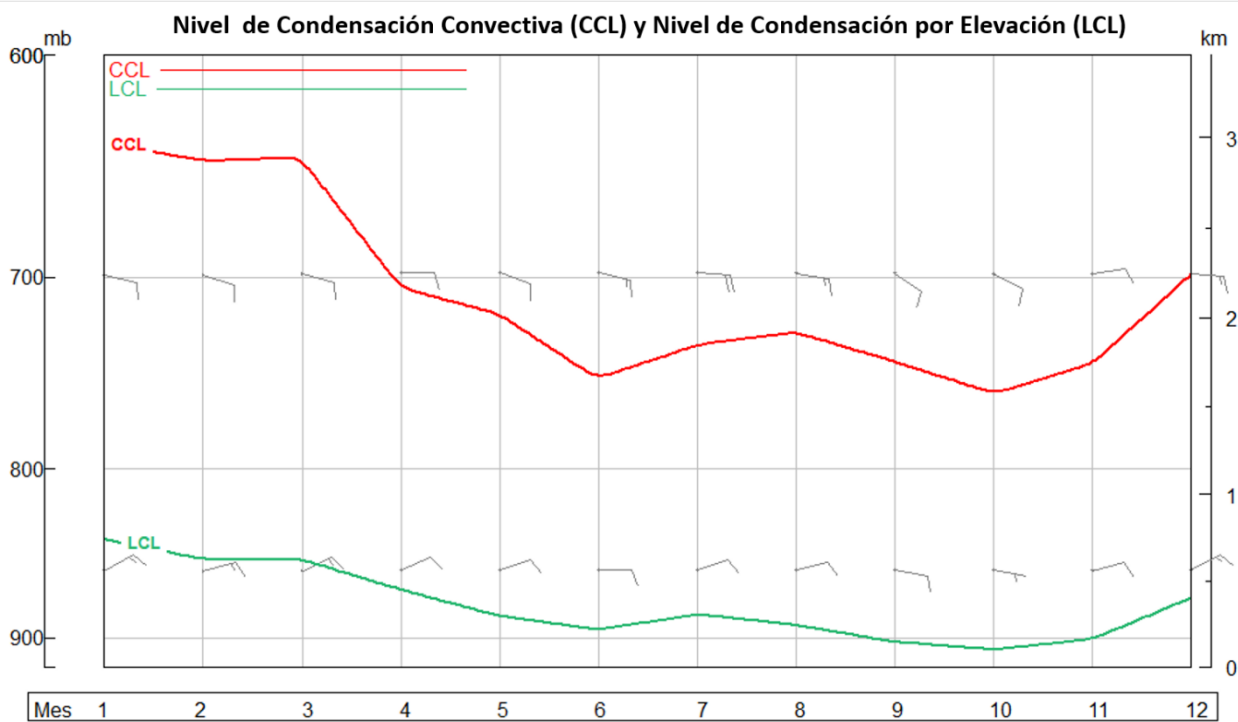


Figura A4.6: Variación promedio mensual de los Niveles CCL y LCL. Periodo 2013-2017.

Anexo 5: Hodógrafas promedio mensuales

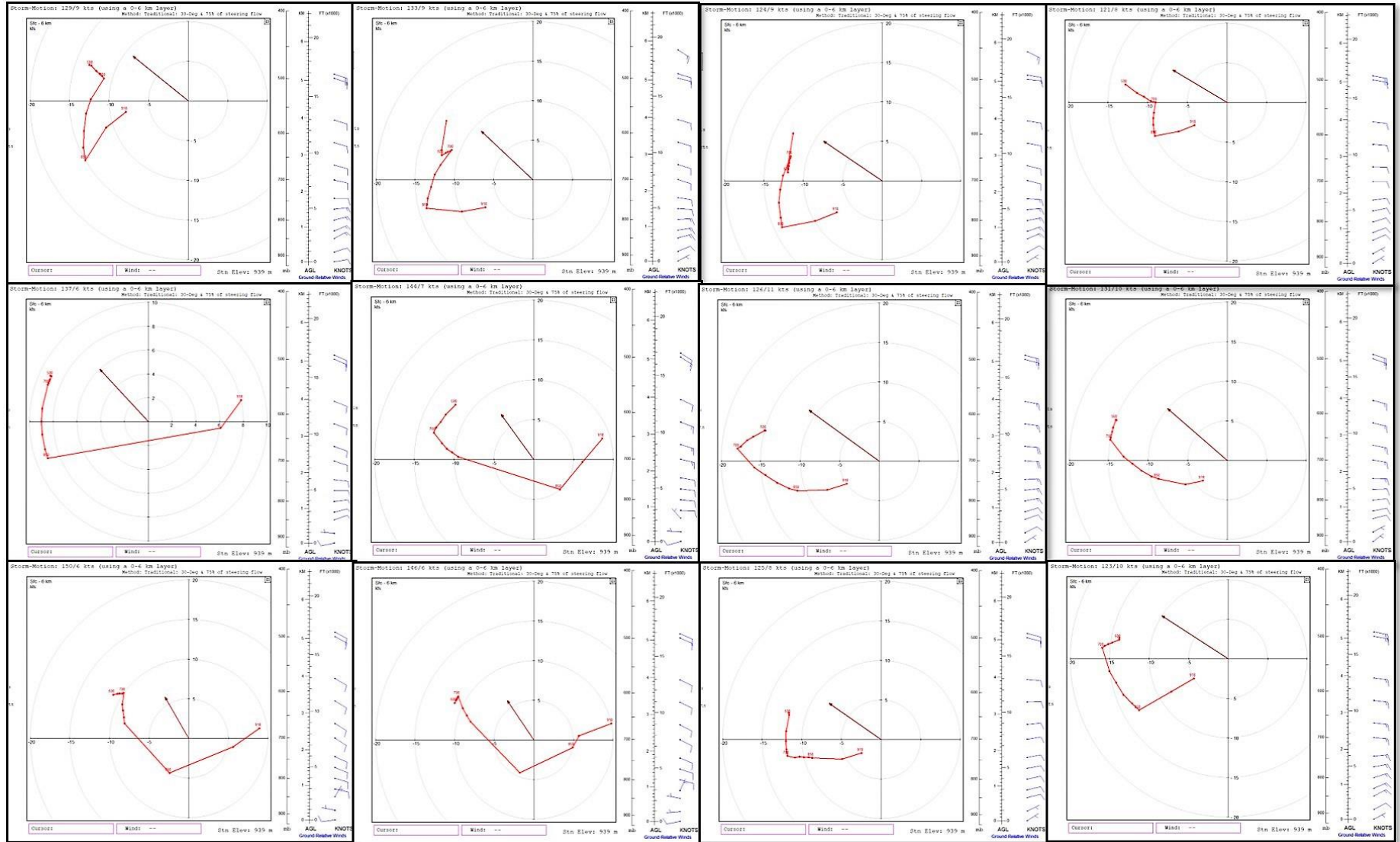


Figura A5.1: Hodógrafa promedio mensual característica en la capa de 0 a 6000 m. Periodo 2013-2017.

Anexo 6: Índice de Tormentas Severas y Variación mensual de los Índices de estabilidad

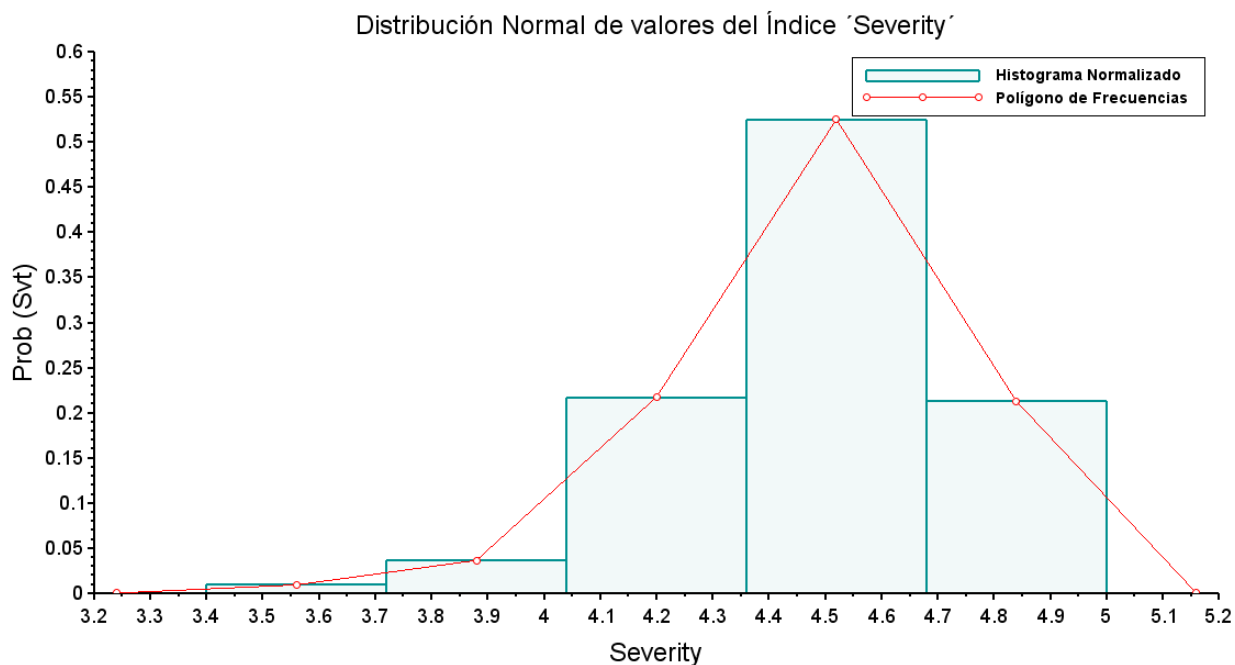


Figura A6.1: Probabilidad para los valores del índice 'Severity'.

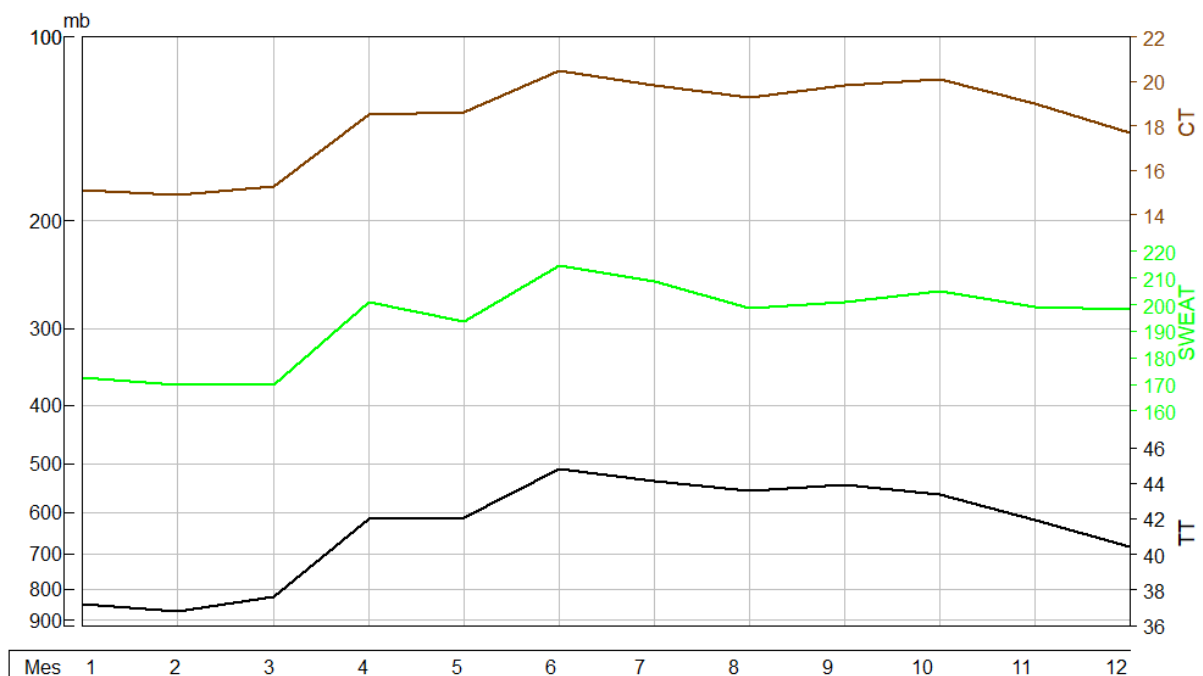


Figura A6.2: Variación promedio mensual para los índices: CT, SWEAT y TT. Periodo 2013-2017.

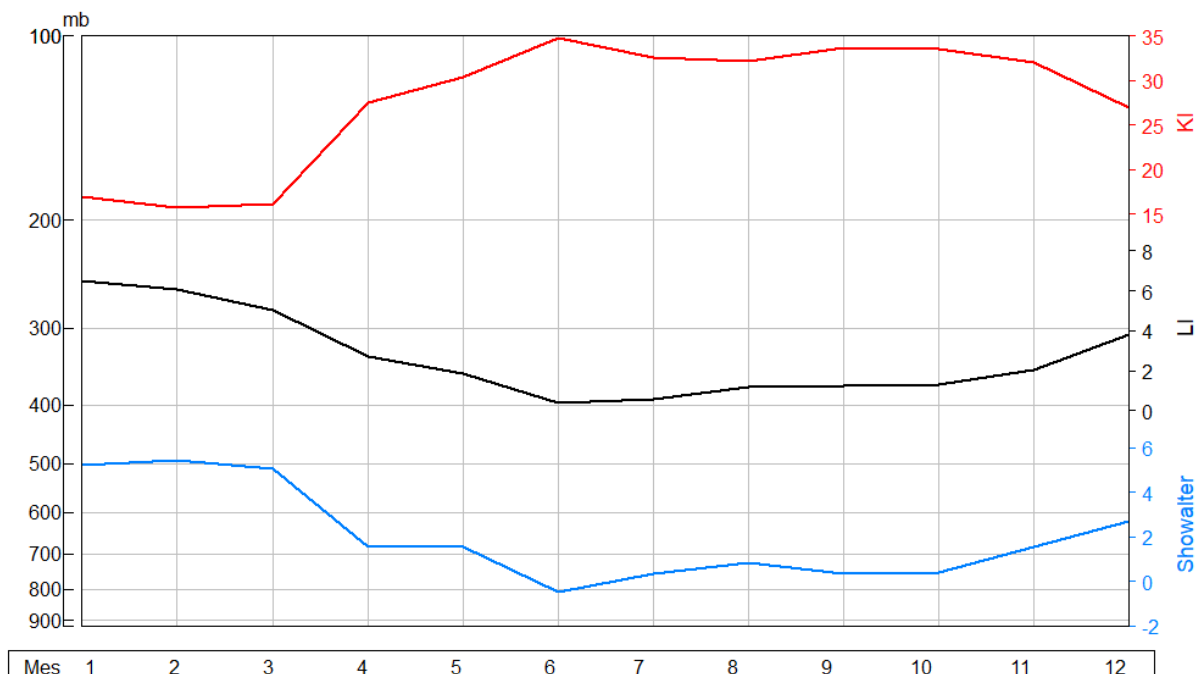


Figura A6.3: Variación promedio mensual para los índices: KI, LI y SI. Periodo 2013-2017.

Rangos de variación de los niveles LCL, CCL (y LFC cuando se presenta), para todos los 222 sondeos de las 12 UTC, que registraron en horas de la tarde tormenta eléctrica en el GAM. Periodo 2013-2017.

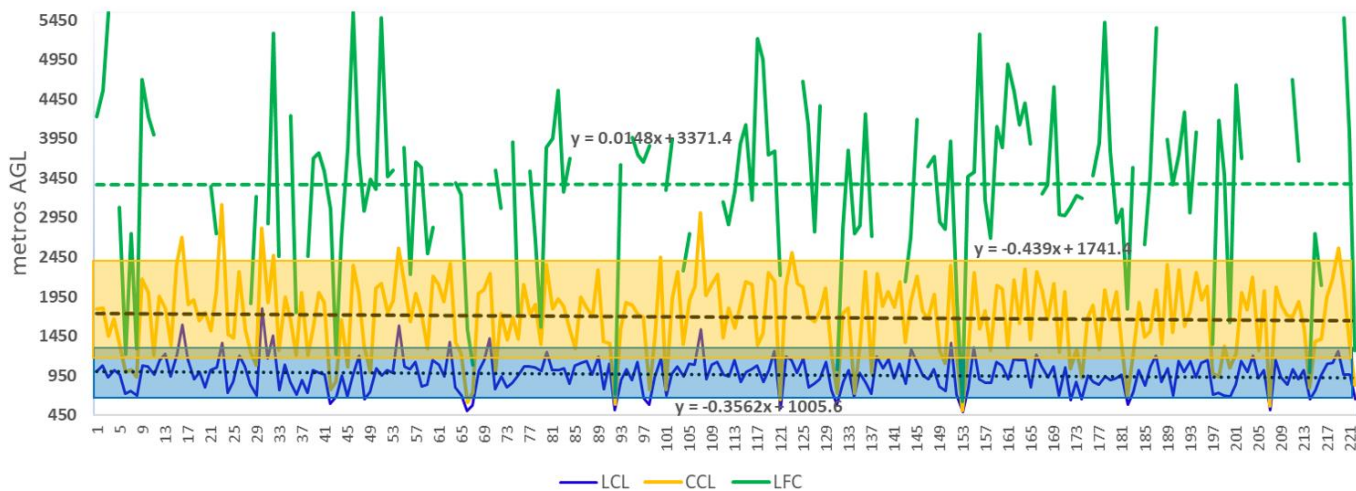


Figura A6.4: Altura² y tendencia de los niveles LCL, CCL y LFC para los 222 sondeos de las 12 UTC, que registraron tormenta eléctrica en horas de la tarde en el GAM. Periodo 2013-2017.

²La altura para los tres niveles se muestra en metros sobre el nivel de superficie (m AGL).

Anexo 7: Reportes Meteorológicos Aeronáuticos de superficie (METAR) para los casos de estudio

A7.1: Caso1.

```
#####
# MROC, Alajuela / Juan Santamaria Int. Airport (Costa Rica)
# WMO index: 78762. Latitude 10-00N. Longitude 084-13W. Altitude 920 m.
#####
201804271200 METAR MROC 271200Z 05006KT 010V080 CAVOK 20/16 A2997 NOSIG=
201804271300 METAR MROC 271300Z 07006KT CAVOK 24/18 A2999 NOSIG=
201804271400 METAR MROC 271400Z 10013KT 060V130 9999 FEW040 BKN250 26/17 A3000 NOSIG=
201804271500 METAR MROC 271500Z 11011KT 080V140 CAVOK 27/17 A3001 NOSIG=
201804271600 METAR MROC 271600Z 11012KT 070V140 9999 FEW040 BKN250 29/17 A3001 NOSIG=
201804271700 METAR MROC 271700Z 10010KT 070V150 9999 FEW040 SCT100 BKN250 30/17 A2999 NOSIG=
201804271722 SPECI MROC 271722Z 24009KT 9999 FEW045 BKN200 27/20 A3000 NOSIG=
201804271800 METAR MROC 271800Z 24011KT 210V280 9999 FEW025 SCT045 OVC200 27/20 A2998 NOSIG=
201804271900 METAR MROC 271900Z 25009KT 210V290 9999 SCT030 BKN200 27/20 A2996 NOSIG=
201804272000 METAR MROC 272000Z 25011KT 200V280 9999 SCT030 BKN100 27/21 A2994 NOSIG=
201804272027 SPECI MROC 272027Z 23009KT 160V270 5000 2000S TSRA FEW015CB BKN020 26/20 A2994 NOSIG=
201804272100 METAR MROC 272100Z 06010G20KT 030V110 6000 -TSRA FEW015CB BKN040 20/16 A2997 NOSIG=
201804272200 METAR MROC 272200Z 10006KT 060V120 9000 -RA VCTS FEW015TCU BKN100 19/18 A2996 RETS NOSIG=
201804272300 METAR MROC 272300Z 02004KT 340V050 9999 FEW015 OVC130 21/18 A2996 NOSIG=
201804280000 METAR MROC 280000Z 30003KT 250V030 CAVOK 21/19 A2997 NOSIG=

#####
# MRPV, Tobias Bolanos International (Costa Rica)
# WMO index: ----. Latitude 09-57N. Longitude 084-09W. Altitude 994 m.
#####
201804271200 METAR MRPV 271200Z 10009KT CAVOK 21/15 A3000 NOSIG=
201804271300 METAR MRPV 271300Z 12009KT 9999 FEW035 BKN220 23/15 A3002 NOSIG=
201804271350 SPECI MRPV 271350Z 10012KT 9999 FEW035 BKN220 24/14 A3003 NOSIG=
201804271400 METAR MRPV 271400Z 10012KT 9999 FEW035 BKN220 24/14 A3004 NOSIG=
201804271500 METAR MRPV 271500Z 07013KT 9999 FEW040 BKN220 25/14 A3004 NOSIG=
201804271600 METAR MRPV 271600Z 08013KT 9999 FEW040 BKN220 26/15 A3004 NOSIG=
201804271700 METAR MRPV 271700Z 06011KT 9999 FEW040 BKN200 28/14 A3002 NOSIG=
201804271800 METAR MRPV 271800Z 07014KT 9999 SCT040 BKN200 28/15 A3001 NOSIG=
201804271900 METAR MRPV 271900Z 08012KT 9999 SCT040 BKN200 27/15 A2999 NOSIG=
201804272000 METAR MRPV 272000Z 08016KT 9999 SCT040 BKN200 27/15 A2997 NOSIG=
201804272021 SPECI MRPV 272021Z 08013KT 9999 TSRA FEW025CB SCT035 BKN080 25/16 A2996 BECMG 5000=
201804272046 SPECI MRPV 272046Z 01010KT 1000 TSRA SCT020CB SCT035 BKN080 21/16 A2998 NOSIG=
201804272100 METAR MRPV 272100Z 02004KT 9999 4500NW -TSRA FEW020CB SCT030 BKN100 18/15 A2997 NOSIG=
201804272200 METAR MRPV 272200Z VRB02KT 9999 -DZ VCTS FEW025CB BKN100 19/17 A2999 RETSRA NOSIG=
201804272300 METAR MRPV 272300Z 09007KT 9999 -RA FEW025 BKN100 21/17 A2998 NOSIG=
201804280000 METAR MRPV 280000Z 14003KT CAVOK 21/17 A2999 NOSIG=
```

A7.2: Caso 2.

```
#####
# MROC, Alajuela / Juan Santamaria Int. Airport (Costa Rica)
# Indicativo sinóptico: 78762. Latitud 10-00N. Longitud 084-13W. Altitud 920 m.
# METAR/SPECI de MROC
#####
201710051200 METAR MROC 051200Z 25003KT 2500 -RA BR FEW002 SCT010 OVC100 19/18 A2994 NOSIG=
201710051300 METAR MROC 051300Z 26005KT 3000 -RA BR FEW002 OVC015 19/19 A2996 NOSIG=
201710051400 METAR MROC 051400Z 24006KT 1500 RA DZ BR FEW002 BKN010 19/19 A2998 NOSIG=
201710051429 SPECI MROC 051429Z 23007KT 1000 SHRA BR FEW002 SCT004 BKN010 19/19 A2999 RERA NOSIG=
201710051500 METAR MROC 051500Z 26008KT 2000 RA BR SCT002 BKN025 19/19 A3000 RESHRA NOSIG=
201710051600 METAR MROC 051600Z 24006KT 190V260 1800 -RA BR SCT005 BKN020 19/19 A3000 NOSIG=
201710051700 METAR MROC 051700Z 27006KT 6000 2500SW -RA BCFG BKN012 19/19 A2998 NOSIG=
201710051800 METAR MROC 051800Z 24009KT 2000 RA BR SCT002 BKN010 19/19 A2995 NOSIG=
201710051900 METAR MROC 051900Z 22009KT 2000 -RA BR BKN020 20/19 A2994 NOSIG=
201710051937 SPECI MROC 051937Z 22011G21KT 2500 +RA BR FEW015 BKN020 19/18 A2993 NOSIG=
201710052000 METAR MROC 052000Z 23007KT 3000 +RA BR FEW004 BKN025 19/18 A2992 NOSIG=
201710052032 SPECI MROC 052032Z 27008KT 1500 +RA BR FEW003 BKN015 19/18 A2992 NOSIG=
201710052100 METAR MROC 052100Z 27006KT 1200 RA BR SCT002 BKN010 19/19 A2992 TEMPO 0600 FG=
201710052200 METAR MROC 052200Z 22008KT 180V250 7000 3000N -RA BCFG FEW002 SCT015 BKN030 18/18 A2994 NOSIG=
201710052300 METAR MROC 052300Z 22007KT 170V240 9999 4000N SCT020 BKN080 19/17 A2994 NOSIG=
201710060000 METAR MROC 060000Z 26005KT 220V300 9999 SCT035 BKN080 19/18 A2995 NOSIG=
201710060100 METAR MROC 060100Z 30005KT 270V360 9999 -RA SCT030 BKN080 19/18 A2997 NOSIG=
201710060200 METAR MROC 060200Z 31005KT 9999 -RA FEW004 SCT010 BKN080 19/18 A2999 NOSIG=
201710060300 METAR MROC 060300Z VRB02KT 8000 3500SW -RA BCFG SCT006 BKN015 19/19 A3001 NOSIG=
201710060400 METAR MROC 060400Z 28007KT 3000 +RA SCT005 BKN015 19/19 A3002 NOSIG=
201710060500 METAR MROC 060500Z 24006KT 9999 FEW002 SCT015 BKN030 19/19 A3003 RERA NOSIG=
201710060530 METAR MROC 060530Z 23003KT 5000 RA SCT005 BKN015 19/19 A3002 NOSIG=
201710060530 METAR MROC 060530Z 23003KT 5000 RA SCT005 BKN015 19/19 A3002 NOSIG=
201710060600 METAR MROC 060600Z 23008KT 200V260 9999 FEW005 SCT015 BKN200 19/19 A3002 RERA NOSIG=
```

```
#####
# MRPV, Tobias Bolanos International (Costa Rica)
# Indicativo sinóptico: -----. Latitud 09-57N. Longitud 084-09W. Altitud 994 m.
# METAR/SPECI de MRPV
#####
201710051200 METAR MRPV 051200Z 29008KT 1500 -RA BR BKN005 SCT010 18/17 A2995 NOSIG=
201710051219 METAR MRPV 051219Z 29012KT 1000 +RA FG OVC002 18/18 A2996 NOSIG=
201710051300 METAR MRPV 051300Z 29010KT 2000 RA BR BKN005 SCT010 18/18 A2997 NOSIG=
201710051400 METAR MRPV 051400Z 29011KT 2000 RA BR BKN005 SCT010 18/18 A2999 NOSIG=
201710051500 METAR MRPV 051500Z 29013KT 2000 +RA BR OVC005 18/18 A3000 NOSIG=
201710051600 METAR MRPV 051600Z 28016KT 3000 +RA BR BKN005 OVC010 18/18 A3001 NOSIG=
201710051700 METAR MRPV 051700Z 29010KT 2000 RA BR SCT005 BKN010 19/18 A2999 NOSIG=
201710051737 METAR MRPV 051737Z 30008KT 5000 -RA BCFG SCT015 BKN025 20/18 A2997 NOSIG=
201710051800 METAR MRPV 051800Z COR 29012KT 4000 -RA BCFG SCT010 BKN025 19/18 A2996 BECMG 2000=
201710051805 METAR MRPV 051805Z COR 29012KT 3000 RA BR SCT005 BKN010 19/18 A2996 NOSIG=
201710051900 METAR MRPV 051900Z 28014KT 3000 -RA BR SCT010 BKN025 19/18 A2995 NOSIG=
201710052000 METAR MRPV 052000Z 27009KT 4500 RA BR FEW005 SCT010 BKN030 19/16 A2993 NOSIG=
201710052025 SPECI MRPV 052025Z 31010KT 3000 RA BR SCT004 BKN030 18/17 A2992 NOSIG=
201710052040 SPECI MRPV 052040Z 30008KT 3000 RA BR BKN004 18/17 A2992 NOSIG=
201710052100 METAR MRPV 052100Z 29011G21KT 3000 RA BR BKN004 18/17 A2993 NOSIG=
201710052200 METAR MRPV 052200Z 23007KT 6000 DZ BCFG FEW002 SCT025 BKN100 17/16 A2995 RERA NOSIG=
201710052300 METAR MRPV 052300Z 33006KT 9999 DZ FEW005 SCT020 BKN100 18/16 A2995 NOSIG=
201710060000 METAR COR MRPV 060000Z 32007KT 9999 BCFG FEW005 BKN020 18/16 A2995 REDZ NOSIG=
```

A7.3: Caso 3.

```
#####
# MROC, Alajuela / Juan Santamaria Int. Airport (Costa Rica)
# Indicativo sinóptico: 78762. Latitud 10-00N. Longitud 084-13W. Altitud 920 m.
# METAR/SPECI de MROC
#####
201805241200 METAR MROC 241200Z 07003KT 350V080 CAVOK 20/19 A3002 NOSIG=
201805241300 METAR MROC 241300Z VRB01KT CAVOK 22/19 A3004 NOSIG=
201805241400 METAR MROC 241400Z VRB02KT CAVOK 24/20 A3005 NOSIG=
201805241500 METAR MROC 241500Z VRB03KT CAVOK 25/20 A3006 BECMG 24008KT=
201805241600 METAR MROC 241600Z 24006KT 200V290 9999 FEW030 SCT250 26/19 A3006 NOSIG=
201805241700 METAR MROC 241700Z 25009KT 230V290 9999 SCT035 26/20 A3005 NOSIG=
201805241800 METAR MROC 241800Z 26011KT 9999 SCT030 26/21 A3003 NOSIG=
201805241900 METAR MROC 241900Z 25009KT 210V280 9999 FEW025 TCU SCT035 27/21 A3001 NOSIG=
201805242000 METAR MROC 242000Z 25010KT 220V280 9999 4500SW RA VCTS SCT030 27/22 A2998 TEMPO -TSRA=
201805242100 METAR MROC 242100Z 24012KT 9999 VCTS VCSH FEW015CB SCT025 BKN080 25/22 A2996 RERA
TEMPO TSRA=
201805242200 METAR MROC 242200Z 24008KT 8000 -TSRA FEW010 FEW015CB SCT025 BKN080 23/21 A2997 NOSIG=

#####
# MRPV, Tobías Bolanos International (Costa Rica)
# Indicativo sinóptico: -----. Latitud 09-57N. Longitud 084-09W. Altitud 994 m.
# METAR/SPECI de MRPV
#####
201805241200 METAR MRPV 241200Z 00000KT CAVOK 19/18 A3005 NOSIG=
201805241300 METAR MRPV 241300Z 01001KT CAVOK 21/18 A3006 NOSIG=
201805241400 METAR MRPV 241400Z 00000KT CAVOK 24/16 A3007 NOSIG=
201805241500 METAR MRPV 241500Z 30002KT 9999 FEW035 26/16 A3008 NOSIG=
201805241600 METAR MRPV 241600Z 28007KT 9999 FEW035 26/17 A3008 NOSIG=
201805241700 METAR MRPV 241700Z 27009KT 9999 FEW035 26/18 A3006 NOSIG=
201805241800 METAR MRPV 241800Z 27013KT 9999 SCT040 SCT250 26/19 A3005 NOSIG=
201805241900 METAR MRPV 241900Z 29010KT 9999 -TSRA FEW020CB SCT035 27/19 A3003 NOSIG=
201805242000 METAR MRPV 242000Z 27010KT 9999 RA FEW020TCU SCT035 SCT140 27/19 A2999 RETS NOSIG=
201805242022 METAR MRPV 242022Z 27010KT 9999 TSRA FEW010CB SCT030 SCT160 26/19 A2998 NOSIG=
201805242100 METAR MRPV 242100Z 28011KT 9999 3000NE TSRA FEW010CB BKN035 25/19 A2998 NOSIG=
201805242200 METAR MRPV 242200Z 04005KT 5000 RA FEW010 BKN025 22/16 A3000 RETS NOSIG=
```

A7.4: Caso 4.

```
#####
# MROC, Alajuela / Juan Santamaria Int. Airport (Costa Rica)
# Indicativo sinóptico: 78762. Latitud 10-00N. Longitud 084-13W. Altitud 920 m. METAR/SPECI de MROC
#####
201611241200 METAR MROC 241200Z 0000KT 6000 -RA FEW010 SCT020 BKN030 19/18 A2996 NOSIG=
201611241230 SPECI MROC 241230Z 14002KT 1500 -RA BR FEW001 SCT015 BKN010 20/18 A3000 NOSIG=
201611241300 METAR MROC 241300Z 10002KT 2000 -RA BR FEW001 SCT010 OVC040 20/18 A3001 NOSIG=
201611241331 METAR MROC 241331Z 08003KT 4000 -RA BR FEW002 SCT010 OVC040 20/19 A3002=
201611241331 SPECI MROC 241331Z 08003KT 4000 -RA BR FEW002 SCT010 OVC040 20/19 A3002=
201611241400 METAR MROC 241400Z 06002KT 6000 -RA FEW003 SCT030 BKN100 20/19 A3002 NOSIG=
201611241500 METAR MROC 241500Z 19003KT 5000 -RA BR FEW001 SCT030 OVC100 20/19 A3001 NOSIG=
201611241517 SPECI MROC 241517Z 19005KT 2000 -RA BR FEW001 SCT020 OVC100 20/19 A3000=
201611241600 METAR MROC 241600Z 28003KT 4000 -RA FEW002 SCT030 BKN100 20/19 A2999 NOSIG=
201611241700 METAR MROC 241700Z 29004KT 4000 -RA BR FEW002 SCT030 BKN100 20/19 A2999 NOSIG=
201611241741 SPECI MROC 241741Z 26006KT 2000 RA BR FEW001 BKN010 20/19 A2998 NOSIG=
201611241800 METAR MROC 241800Z 26008KT 3000 -RA BR FEW001 BKN010 20/19 A2997 NOSIG=
201611241841 SPECI MROC 241841Z 25006KT 3000 0500SW BR FEW001 BKN005 20/19 A2996 NOSIG=
201611241900 METAR MROC 241900Z 23004KT 3000 0500SW -RA BR FEW001 BKN005 20/19 A2995 NOSIG=
201611242000 METAR MROC 242000Z 26008KT 3000 0500SW -RA BR FEW001 BKN005 20/19 A2994 NOSIG=
201611242100 METAR MROC 242100Z 23005KT 5000 1800SW BR SCT002 BKN070 20/19 A2994 NOSIG=
201611242121 SPECI MROC 242121Z 25006KT 1500 0500SW BR BKN002 20/19 A2994 TEMPO 0600 FG VV///=
201611242200 METAR MROC 242200Z 32004KT 5000 2000SW BR SCT002 BKN100 20/19 A2993 NOSIG=
201611242238 SPECI MROC 242238Z 31002KT 7000 2000SW BCFG BKN010 20/19 A2994 NOSIG=
201611242300 METAR MROC 242300Z 28003KT 9999 2000SW BCFG BKN008 20/19 A2995 NOSIG=
201611242356 METAR MROC 250000Z 0000KT 9999 4000SW BCFG FEW005 BKN025 20/18 A2995 NOSIG=
201611250000 METAR MROC 250000Z 0000KT 9999 4000SW BCFG FEW005 BKN025 20/18 A2995 NOSIG=
201611250100 METAR MROC 250100Z VRB02KT 5000 0500SW BR SCT002 20/18 A2998 NOSIG=
201611250200 METAR MROC 250200Z VRB02KT 8000 2500SW BCFG FEW002 SCT030 20/18 A3000 NOSIG=
201611250300 METAR MROC 250300Z VRB02KT 9000 VCFG FEW015 SCT040 20/18 A3002 NOSIG=
#####
# MRPV, Tobías Bolaños International (Costa Rica)
# Indicativo sinóptico: -----. Latitud 09-57N. Longitud 084-09W. Altitud 994 m.
#####
201611241200 METAR MRPV 241200Z 0000KT 0800 -RA FG VV/// 19/18 A2999 NOSIG=
201611241300 METAR MRPV 241300Z 0000KT 3500 DZ BR SCT015 BKN100 19/18 A3001 NOSIG=
201611241322 SPECI MRPV 241322Z 08003KT 5000 DZ BR SCT020 BKN100 19/19 A3002 NOSIG=
201611241400 METAR MRPV 241400Z 07001KT 5000 RA BR FEW035 BKN100 20/19 A3002 NOSIG=
201611241500 METAR MRPV 241500Z 15002KT 9999 -RA VCFG FEW035 BKN100 20/19 A3001 NOSIG=
201611241600 METAR MRPV 241600Z 11003KT 9999 4000NW -RA BCFG NSC 21/18 A2998 NOSIG=
201611241626 SPECI MRPV 241626Z 30005KT 2500 -RA BR NSC 21/20 A2999 NOSIG=
201611241700 METAR MRPV 241700Z 29005KT 3000 -RA BR NSC 20/19 A2999 NOSIG=
201611241736 SPECI MRPV 241736Z 30005KT 3000 -RA BR BKN005 20/19 A2997 NOSIG=
201611241800 SPECI MRPV 241800Z 31004KT 3000 -RA BR OVC005 20/19 A2996 NOSIG=
201611241800 METAR MRPV 241800Z 31004KT 3000 -RA BR OVC005 20/19 A2996 NOSIG=
201611241820 SPECI MRPV 241820Z 29008KT 2000 -RA BR OVC002 20/19 A2996 NOSIG=
201611241900 METAR MRPV 241900Z 28008KT 3500 -RA BR FEW002 SCT005 BKN100 20/19 A2994 NOSIG=
201611242000 METAR MRPV 242000Z 30005KT 4000 -RA BR SCT002 BKN045 20/19 A2994 NOSIG=
201611242009 SPECI MRPV 242009Z 30006KT 4000 -RA BR BKN002 20/19 A2994 NOSIG=
201611242100 METAR MRPV 242100Z 28006KT 4000 BR FEW002 SCT040 BKN120 20/19 A2993 NOSIG=
201611242124 SPECI MRPV 242124Z 28006KT 4000 BR BKN003 20/18 A2993 NOSIG=
201611242200 METAR MRPV 242200Z 34004KT 4000 BR BKN005 20/18 A2993 NOSIG=
201611242300 METAR MRPV 242300Z 30003KT 8000 4000SW BCFG SCT002 BKN100 20/18 A2995 NOSIG=
201611242332 SPECI MRPV 242332Z 28003KT 4000 BR FEW005 SCT010 BKN100 19/18 A2996 NOSIG=
201611250000 METAR MRPV 250000Z 0000KT 5000 BR FEW005 BKN100 19/18 A2996 NOSIG=
```

Continuación caso 4.

```
#####
# MRLB, Liberia / Daniel Oduber Int. Airport (Costa Rica)
# Indicativo sinóptico: 78774. Latitud 10-36-00N. Longitud 085-32-00W. Altitud 80 m.
# METAR/SPECI de MRLB
#####
201611241200 METAR MRLB 241200Z 01003KT 9999 BKN030 22/22 A2985 NOSIG=
201611241300 METAR MRLB 241300Z 06003KT 9999 BKN030 23/22 A2988 NOSIG=
201611241400 METAR MRLB 241400Z 00000KT 9999 SCT030 BKN070 24/23 A2990 NOSIG=
201611241500 METAR MRLB 241500Z 01005KT 9999 SCT030 BKN120 25/22 A2990 NOSIG=
201611241600 METAR MRLB 241600Z 02012KT 9999 FEW030 SCT100 BKN200 26/22 A2987 NOSIG=
201611241700 METAR MRLB NIL=
201611241800 METAR MRLB 241800Z 34008KT 9999 SCT030 BKN140 26/24 A2984NOSIG=
201611241900 METAR MRLB 241900Z 01006KT 9999 -RA FEW030 OVC120 24/21 A2983 NOSIG=
201611242000 METAR MRLB 242000Z 30003KT 9999 -RA FEW030 OVC120 24/22 A2980 NOSIG=
201611242100 METAR MRLB 242100Z 00000KT 9999 FEW030 OVC120 25/22 A2979 NOSIG=
201611242200 METAR MRLB 242200Z 24003KT 9999 BKN030 SCT100 25/22 A2979 NOSIG=
201611242300 METAR MRLB 242300Z 20003KT 9999 3000E RA SCT015 BKN030 24/23 A2979 NOSIG=
201611242353 METAR MRLB 250000Z 21002KT 8000 RA SCT010 BKN025 24/22 A2979 NOSIG=
201611250000 METAR MRLB 250000Z 21002KT 8000 RA SCT010 BKN025 24/22 A2979 NOSIG=
201611250030 SPECI MRLB 250030Z 24004KT 4000 RA BR FEW005 SCT010 BKN025 23/22 A2979 NOSIG=
201611250100 METAR MRLB 250100Z 28008KT 5000 RA FEW005 SCT010 BKN015 23/23 A2979 NOSIG=
201611250200 METAR MRLB 250200Z 26015KT 4000 RA FEW005 SCT010 BKN020 23/22 A2976 NOSIG=
201611250300 METAR MRLB 250300Z 23017G27KT 3000 +RA SCT004 OVC015 23/23 A2973 NOSIG=
201611250330 SPECI MRLB 250330Z 18020G30KT 1500 +RA SCT003 OVC009 23/22 A2972 NOSIG=

#####
# MRLM, Puerto Limón (Costa Rica)
# Indicativo sinóptico: 78767. Latitud 10-00N. Longitud 083-03W. Altitud 5 m.
# METAR/SPECI de MRLM
#####
201611241200 METAR MRLM 241200Z 29012KT 9999 -DZ FEW020 BKN110 26/23 A2974=
201611241300 METAR MRLM 241300Z 28011KT 9999 DZ VCSH SCT015 BKN100 25/23 A2978=
201611241400 METAR MRLM 241400Z 26007KT 9999 SCT020 BKN100 26/22 A2982 REDZ=
201611241500 METAR MRLM 241500Z 18007KT 9999 BKN025 SCT110 28/22 A2982=
201611241600 METAR MRLM 241600Z 13012KT 9999 SCT020 SCT120 28/23 A2979=
201611241700 METAR MRLM 241700Z 15012KT 9999 FEW020 BKN110 28/24 A2977=
201611241800 METAR MRLM 241800Z 16005KT 9999 +DZ VCSH FEW020 BKN110 27/24 A2975=
201611241900 METAR MRLM 241900Z 17005KT 9999 DZ FEW020 BKN120 26/24 A2973=
201611242000 METAR MRLM 242000Z 15006KT 9999 DZ FEW020 BKN120 27/25 A2972=
201611242100 METAR MRLM 242100Z 16007KT 9999 FEW020 BKN130 27/23 A2971=
201611242200 METAR MRLM 242200Z 16008KT 9999 FEW020 BKN130 28/24 A2973=
201611242300 METAR MRLM 242300Z 17006KT 9999 SCT015 SCT120 27/25 A2976=
201611250000 METAR MRLM 250000Z 11014KT 9999 BKN015 27/26 A2978=
```

A7.5: Caso 5.

```
#####
# MROC, Alajuela / Juan Santamaria Int. Airport (Costa Rica). WMO index: 78762.
# Latitude 10-00N. Longitude 084-13W. Altitude 920 m. METAR/SPECI from MROC
#####
201808141200 METAR MROC 141200Z 07009KT 020V110 CAVOK 21/16 A2998 NOSIG=
201808141300 METAR MROC 141300Z 11012KT CAVOK 24/17 A2998 NOSIG=
201808141400 METAR MROC 141400Z 11015KT CAVOK 24/17 A2999 NOSIG=
201808141500 METAR MROC 141500Z 11008KT 070V150 CAVOK 26/18 A3001 NOSIG=
201808141600 METAR MROC 141600Z 24009KT 180V270 9999 FEW040 BKN110 25/19 A3002 NOSIG=
201808141700 METAR MROC 141700Z 25009KT 9999 FEW020TCU SCT035 BKN130 24/20 A3003 NOSIG=
201808141710 SPECI MROC 141710Z 26010KT 9999 SHRA VCTS FEW020CB SCT030 BKN050 24/20 A3003 NOSIG=
201808141800 METAR MROC 141800Z 13007KT 090V170 9000 3000SW FEW004 SCT030 BKN080 21/18 A3003 RESH NOSIG=
201808141900 METAR MROC 141900Z 01004KT 350V060 9999 FEW035 SCT070 BKN110 22/20 A3000 RESH WS R07 NOSIG=
201808142000 METAR MROC 142000Z 12008KT 090V170 9999 FEW035 BKN120 23/18 A2999 WS R07 NOSIG=
201808142100 METAR MROC 142100Z 12009KT 9999 FEW040 BKN100 23/17 A2998 NOSIG=
201808142200 METAR MROC 142200Z 11012KT 090V150 9999 FEW040 BKN100 23/17 A2997 NOSIG=
201808142300 METAR MROC 142300Z 11013KT CAVOK 22/16 A2999 NOSIG=
201808150000 METAR MROC 150000Z VRB05KT CAVOK 22/16 A3000 NOSIG=

#####
# MRPV, Tobías Bolaños International (Costa Rica). WMO index: 78764.
# Latitude 09-57N. Longitude 084-09W. Altitude 994 m. METAR/SPECI from MRPV
#####
201808141200 METAR MRPV 141200Z 13007KT CAVOK 20/14 A3002 NOSIG=
201808141300 METAR MRPV 141300Z 12008KT CAVOK 22/14 A3002 NOSIG=
201808141400 METAR MRPV 141400Z 10009KT CAVOK 23/15 A3003 NOSIG=
201808141500 METAR MRPV 141500Z 08016KT CAVOK 24/15 A3005 NOSIG=
201808141600 METAR MRPV 141600Z 07012KT 9999 FEW030 BKN120 25/16 A3006 NOSIG=
201808141607 SPECI MRPV 141607Z 09015KT 9999 RA FEW020 BKN070 23/15 A3005 NOSIG=
201808141700 METAR MRPV 141700Z 08015KT 9999 FEW025 BKN080 23/16 A3005 NOSIG=
201808141707 SPECI MRPV 141707Z 09015KT 9999 RA FEW020 BKN070 23/15 A3005 NOSIG=
201808141729 SPECI MRPV 141729Z 11012KT 5000 RA SCT020 BKN070 20/16 A3008 NOSIG=
201808141800 METAR MRPV 141800Z 11007KT 9999 -RA FEW020 BKN090 20/16 A3007 NOSIG=
201808141900 METAR MRPV 141900Z 06012KT 9999 FEW025 BKN100 23/14 A3003 NOSIG=
201808142000 METAR MRPV 142000Z 12007KT 9999 FEW030 BKN090 22/15 A3003 NOSIG=
201808142100 METAR MRPV 142100Z 11008KT 9999 SCT030 BKN100 22/15 A3002 NOSIG=
201808142200 METAR MRPV 142200Z 11012KT 9999 FEW030 BKN100 21/14 A3001 NOSIG=
201808142300 METAR MRPV 142300Z 11008KT CAVOK 21/14 A3002 NOSIG=
201808150000 METAR MRPV 150000Z 09006KT CAVOK 20/13 A3003 NOSIG=

#####
# MRLM, Puerto Limón (Costa Rica). WMO index: 78767.
# Latitude 10-00N. Longitude 083-03W. Altitude 5 m. METAR/SPECI from MRLM
#####
201808141200 METAR MRLM 141200Z 29002KT 9999 -DZ VCSH BKN020 24/22 A2989=
201808141300 METAR MRLM 141300Z 26004KT 9999 SCT020 BKN090 24/22 A2988=
201808141400 METAR MRLM 141400Z 25005KT 9999 SCT020 BKN090 25/23 A2990=
201808141500 METAR MRLM 141500Z 31004KT 9999 FEW020 SCT100 BKN200 27/23 A2990=
201808141600 METAR MRLM 141600Z 32004KT 9999 VCTS VCSH SCT020 OVC100 27/23 A2992=
201808141700 METAR MRLM 141700Z 35012KT 9999 VCSH SCT015 OVC100 25/23 A2995=
201808141800 METAR MRLM 141800Z 32003KT 9999 DZ SCT010 OVC090 24/23 A2995=
201808141900 METAR MRLM 141900Z 27004KT 8000 +DZ SCT010 OVC090 24/23 A2992=
201808142000 METAR MRLM 142000Z 29004KT 9999 -DZ FEW015 OVC090 24/23 A2990=
201808142100 METAR MRLM 142100Z 26004KT 9999 FEW015 OVC100 25/23 A2989 REDZ=
201808142200 METAR MRLM 142200Z 22003KT 9999 FEW015 OVC100 25/23 A2988=
```

A7.6: Caso 6.

```
#####
# MROC, Alajuela / Juan Santamaria Int. Airport (Costa Rica)
# WMO index: 78762. Latitude 10-00N. Longitude 084-13W. Altitude 920 m.
# METAR/SPECI from MROC
#####
201707201500 METAR MROC 201500Z 26007KT 9999 FEW035 SCT140 24/21 A3004 NOSIG=
201707201600 METAR MROC 201600Z 27007KT 9999 FEW035 BKN090 24/21 A3004 NOSIG=
201707201700 METAR MROC 201700Z 26007KT 9999 FEW035 SCT100 26/22 A3003 NOSIG=
201707201800 METAR MROC 201800Z 24006KT 9999 SCT035 BKN100 26/22 A3002 NOSIG=
201707201900 METAR MROC 201900Z 23006KT 9999 FEW030 BKN100 26/23 A2999 NOSIG=
201707202000 METAR MROC 202000Z 27008KT 9999 SCT030 BKN180 27/23 A2994 NOSIG=
201707202100 METAR MROC 202100Z 25009KT 9999 FEW010 SCT030 BKN200 25/23 A2994 NOSIG=
201707202200 METAR MROC 202200Z 26009KT 8000 3000SW VCFG FEW005 SCT010 BKN020 23/22 A2995 BECMG 5000 BR=
201707202300 METAR MROC 202300Z 26007KT 5000 2000SW -RA BR FEW005 SCT010 BKN020 22/22 A2997 TEMPO 2000=
201707202315 SPECI MROC 202315Z 26006KT 1500 -RA BR FEW001 SCT005 BKN015 22/22 A2998 TEMPO 1000=
201707202326 SPECI MROC 202326Z 26005KT 0800 -RA FG SCT001 BKN010 22/22 A2998 NOSIG=
201707202335 SPECI MROC 202335Z 25005KT 1500 BR FEW001 SCT005 BKN010 22/22 A2999 NOSIG=
201707202335 METAR MROC 210000Z 26006KT 1000 BR FEW001 SCT005 BKN010 22/22 A2999 TEMPO 0500 FG=
201707210000 METAR MROC 210000Z 26006KT 1000 BR FEW001 SCT005 BKN010 22/22 A2999 TEMPO 0500 FG=
201707210005 SPECI MROC 210005Z 25004KT 0500 FG FEW001 SCT005 BKN010 22/22 A3000 NOSIG=
201707210045 SPECI MROC 210045Z 23005KT 1500 BR FEW001 SCT010 BKN015 22/22 A3001 NOSIG=
201707210100 METAR MROC 210100Z 26007KT 0500 -RA FG SCT001 BKN005 21/21 A3001 NOSIG=
201707210200 METAR MROC 210200Z 27003KT 0800 FG SCT001 BKN005 21/21 A3003 NOSIG=
201707210210 SPECI MROC 210210Z VRB02KT 1500 BR FEW001 SCT005 BKN010 21/21 A3003 NOSIG=
201707210220 SPECI MROC 210220Z VRB02KT 3000 BR SCT005 BKN010 21/21 A3003 NOSIG=
201707210300 METAR MROC 210300Z 24004KT 0500 FG VV002 21/21 A3003 NOSIG=
201707210400 METAR MROC 210400Z 24006KT 1800 BR SCT002 BKN015 21/21 A3005 NOSIG=
201707210424 SPECI MROC 210424Z 26004KT 5000 2000SW BR FEW002 SCT010 BKN020 21/21 A3004 NOSIG=
201707210500 METAR MROC 210500Z 31003KT 9999 3000SW BCFG SCT008 BKN025 21/21 A3004 NOSIG=
201707210600 METAR MROC 210600Z VRB02KT 9999 2500SW BCFG SCT005 BKN020 21/21 A3002 NOSIG=

#####
# MRPV, Tobías Bolaños International (Costa Rica)
# WMO index: ----. Latitude 09-57N. Longitude 084-09W. Altitude 994 m.
# METAR/SPECI from MRPV
#####
201707201200 METAR MRPV 201200Z 12006KT 9999 FEW030 SCT250 21/16 A3004 NOSIG=
201707201300 METAR MRPV 201300Z 11008KT 9999 FEW030 SCT250 23/16 A3005 NOSIG=
201707201400 METAR MRPV 201400Z 08012KT 9999 FEW040 SCT100 24/17 A3007 NOSIG=
201707201500 METAR MRPV NIL=
201707201600 METAR MRPV NIL=
201707201700 METAR MRPV NIL=
201707201800 METAR MRPV NIL=
201707201900 METAR MRPV 201900Z 07009KT 9999 SCT030 BKN200 26/17 A3002 NOSIG=
201707202000 METAR MRPV 202000Z 06012KT 9999 FEW030 BKN200 26/16 A2999 NOSIG=
201707202100 METAR MRPV 202100Z 06010KT 9999 FEW030 SCT100 BKN200 27/16 A2997 NOSIG=
201707202120 SPECI MRPV 202120Z 27009KT 080V260 9999 VCFG FEW010 SCT030 BKN200 27/18 A2997 NOSIG=
201707202200 METAR MRPV 202200Z 28008KT 8000 3000NW VCFG FEW010 BKN030 23/20 NOSIG=
201707202300 METAR MRPV 202300Z 28006KT 4500 -RA BR FEW005 BKN010 22/20 A3000 NOSIG=
201707202330 SPECI MRPV 202330Z 29004KT 2500 -RA BR FEW005 BKN010 22/21 A3002 NOSIG=
201707210000 METAR MRPV 210000Z 27003KT 1000 BR FEW001 BKN010 22/20 A3003 NOSIG=
```

A7.7: Caso 7.

```
#####
# MROC, Alajuela / Juan Santamaria Int. Airport (Costa Rica)
# WMO index: 78762. Latitude 10-00N. Longitude 084-13W. Altitude 920 m.
# METAR/SPECI from MROC
#####
201712110900 METAR MROC 110900Z 10017G28KT 9999 FEW030 BKN120 18/14 A3003 NOSIG=
201712111000 METAR MROC 111000Z 09014G24KT 9999 FEW025 BKN120 18/13 A3005 NOSIG=
201712111100 METAR MROC 111100Z 08013KT 050V120 9999 FEW025 BKN120 18/14 A3006 NOSIG=
201712111200 METAR MROC 111200Z 08017G33KT 040V110 9999 SCT030 BKN120 19/12 A3008 NOSIG=
201712111300 METAR MROC 111300Z 09019G33KT 060V120 9999 FEW030 BKN110 18/13 A3008 NOSIG=
201712111400 METAR MROC 111400Z 10014G24KT 050V150 9999 FEW030 BKN120 19/12 A3011 NOSIG=
201712111500 METAR MROC 111500Z 11012G22KT 070V180 9999 FEW030 BKN110 19/13 A3012 NOSIG=
201712111600 METAR MROC 111600Z 10017G30KT 080V150 9999 FEW030 BKN120 21/13 A3008 NOSIG=
201712111700 METAR MROC 111700Z 10016G28KT 040V140 9999 FEW035 BKN120 20/13 A3007 NOSIG=
201712111800 METAR MROC 111800Z 11017G30KT 080V140 9999 FEW035 BKN120 19/13 A3004 NOSIG=
201712111900 METAR MROC 111900Z 09014G28KT 050V120 9999 FEW035 BKN120 20/14 A3000 NOSIG=
201712112000 METAR MROC 112000Z 10016G28KT 9999 FEW035 SCT120 BKN200 22/14 A2998 NOSIG=
201712112100 METAR MROC 112100Z 10011G22KT 060V140 9999 FEW035 SCT120 BKN200 20/14 A2997=
201712112200 METAR MROC 112200Z 10015G29KT 050V140 9999 FEW035 BKN120 21/15 A2999 NOSIG=
201712112300 METAR MROC 112300Z 10008KT 040V200 9999 FEW035 BKN180 20/15 A3002 NOSIG=
201712120000 METAR MROC 120000Z 02006KT 300V110 9999 FEW035 BKN200 20/15 A3004 NOSIG=
201712120100 METAR MROC 120100Z 07012KT CAVOK 19/15 A3006 NOSIG=
201712120200 METAR MROC 120200Z 07011KT CAVOK 19/15 A3008 NOSIG=
201712120300 METAR MROC 120300Z 06007KT CAVOK 19/15 A3010 NOSIG=

#####
# MRPV, Tobías Bolaños International (Costa Rica)
# WMO index: ----. Latitude 09-57N. Longitude 084-09W. Altitude 994 m.
# METAR/SPECI from MRPV
#####
201712111200 METAR MRPV 111200Z 10018G31KT 9999 SCT030 BKN100 16/10 A3014 NOSIG=
201712111300 METAR MRPV 111300Z 09022G32KT 9999 FEW030 BKN100 16/11 A3015 NOSIG=
201712111400 METAR MRPV 111400Z 09023G35KT 9999 FEW030 BKN100 17/10 A3016 NOSIG=
201712111500 METAR MRPV 111500Z 10017G27KT 9999 FEW025 BKN120 17/10 A3015 NOSIG=
201712111600 METAR MRPV 111600Z 09023KT 9999 FEW025 BKN120 18/10 A3013 NOSIG=
201712111700 METAR MRPV 111700Z 10019G30KT 9999 FEW035 BKN120 18/11 A3012 NOSIG=
201712111800 METAR MRPV 111800Z 09019G33KT 9999 -DZ FEW035 BKN120 17/11 A3008 NOSIG=
201712111900 METAR MRPV 111900Z 09019G32KT 9999 -DZ FEW030 BKN120 18/12 A3005 NOSIG=
201712112000 METAR MRPV 112000Z 10019G30KT 9999 SCT025 BKN100 19/12 A3004 REDZ NOSIG=
201712112100 METAR MRPV 112100Z 10018G31KT 9999 SCT025 BKN120 18/11 A3001 NOSIG=
201712112200 METAR MRPV 112200Z 08018G28KT 9999 DZ SCT020 BKN120 18/14 A3005 NOSIG=
201712112300 METAR MRPV 112300Z 09019KT 9999 SCT020 BKN120 18/13 A3004 REDZ NOSIG=
201712120000 METAR MRPV 120000Z 09016G26KT 9999 FEW020 BKN100 18/13 A3007 NOSIG=
```

Continuación caso 7.

```
#####
# MRLB, Liberia / Daniel Oduber Int. Airport (Costa Rica)
# WMO index: 78774. Latitude 10-36-00N. Longitude 085-32-00W. Altitude 80 m.
# METAR/SPECI from MRLB
#####
201712111200 METAR MRLB 111200Z 28009KT CAVOK 22/17 A2992 NOSIG=
201712111300 METAR MRLB 111300Z 21010KT CAVOK 22/17 A2993 NOSIG=
201712111400 METAR MRLB 111400Z 27008KT CAVOK 23/18 A2995 NOSIG=
201712111500 METAR MRLB 111500Z 24012KT CAVOK 24/18 A2995 NOSIG=
201712111600 METAR MRLB 111600Z 24011KT CAVOK 26/18 A2994 NOSIG=
201712111700 METAR MRLB 111700Z 25011KT CAVOK 27/18 A2992 NOSIG=
201712111800 METAR MRLB 111800Z 23011KT CAVOK 26/18 A2988 NOSIG=
201712111900 METAR MRLB 111900Z 27009KT CAVOK 27/19 A2985 NOSIG=
201712112000 METAR MRLB 112000Z 24010KT 9999 FEW045 BKN140 27/19 A2984 NOSIG=
201712112100 METAR MRLB 112100Z 26008KT 9999 FEW045 BKN150 26/18 A2983 NOSIG=
201712112200 METAR MRLB 112200Z 28006KT 9999 FEW045 BKN200 27/19 A2983 NOSIG=
201712112300 METAR MRLB 112300Z 25006KT 9999 FEW045 BKN200 25/19 A2985 NOSIG=
201712120000 METAR MRLB 120000Z 22007KT 9999 FEW045 BKN140 24/19 A2987 NOSIG=
201712120100 METAR MRLB 120100Z 25007KT 9999 FEW045 BKN140 23/19 A2989 NOSIG=
201712120200 METAR MRLB 120200Z 19005KT 9999 FEW045 BKN140 23/19 A2992 NOSIG=
201712120300 METAR MRLB 120300Z 26009KT 9999 FEW045 BKN150 23/18 A2993 NOSIG=

#####
# MRLM, Puerto Limón (Costa Rica)
# WMO index: 78767. Latitude 10-00N. Longitude 083-03W. Altitude 5 m.
# METAR/SPECI from MRLM
#####
201712111200 METAR MRLM 111200Z 29012KT 9999 SCT015 BKN090 22/18 A3001=
201712111300 METAR MRLM 111300Z 29012KT 9999 SCT015 OVC090 22/17 A3001=
201712111400 METAR MRLM 111400Z 29011KT 9999 FEW015 BKN090 24/17 A3002=
201712111500 METAR MRLM 111500Z 30010KT 9999 FEW015 OVC100 25/17 A3002=
201712111600 METAR MRLM 111600Z 30012G24KT 9999 FEW020 OVC100 24/17 A3000=
201712111700 METAR MRLM 111700Z 30011G22KT 9999 FEW020 OVC100 24/17 A2998=
201712111800 METAR MRLM 111800Z 30012KT 9999 FEW020 OVC100 24/17 A2995=
201712111900 METAR MRLM 111900Z 29013KT 9999 FEW020 OVC100 24/17 A2992=
201712112000 METAR MRLM 112000Z 30012KT 9999 -DZ SCT150 OVC100 21/19 A2991=
201712112100 METAR MRLM 112100Z 30010KT 9000 -DZ SCT015 OVC090 21/19 A2990=
201712112135 SPECI MRLM 112135Z 29011G22KT 5000 +DZ BKN015 21/19 A2990=
201712112200 METAR MRLM 112200Z 31009KT 6000 DZ BKN015 21/19 A2991=
201712112300 METAR MRLM 112300Z 30007KT 8000 BKN015 SCT090 21/19 A2993 REDZ=
201712120000 METAR MRLM 120000Z 29008KT 9999 SCT010 BKN080 22/19 A2996=
```

Anexo 8: Ubicación de algunos de los sistemas analizados en los casos de estudio

En las siguientes imágenes correspondientes a casos de estudio seleccionados, se presenta la ubicación de dichos sistemas sinópticos utilizando la simbología propia de los mismos. Además, cada imagen corresponde al día de lanzamiento del radiosondeo analizado.

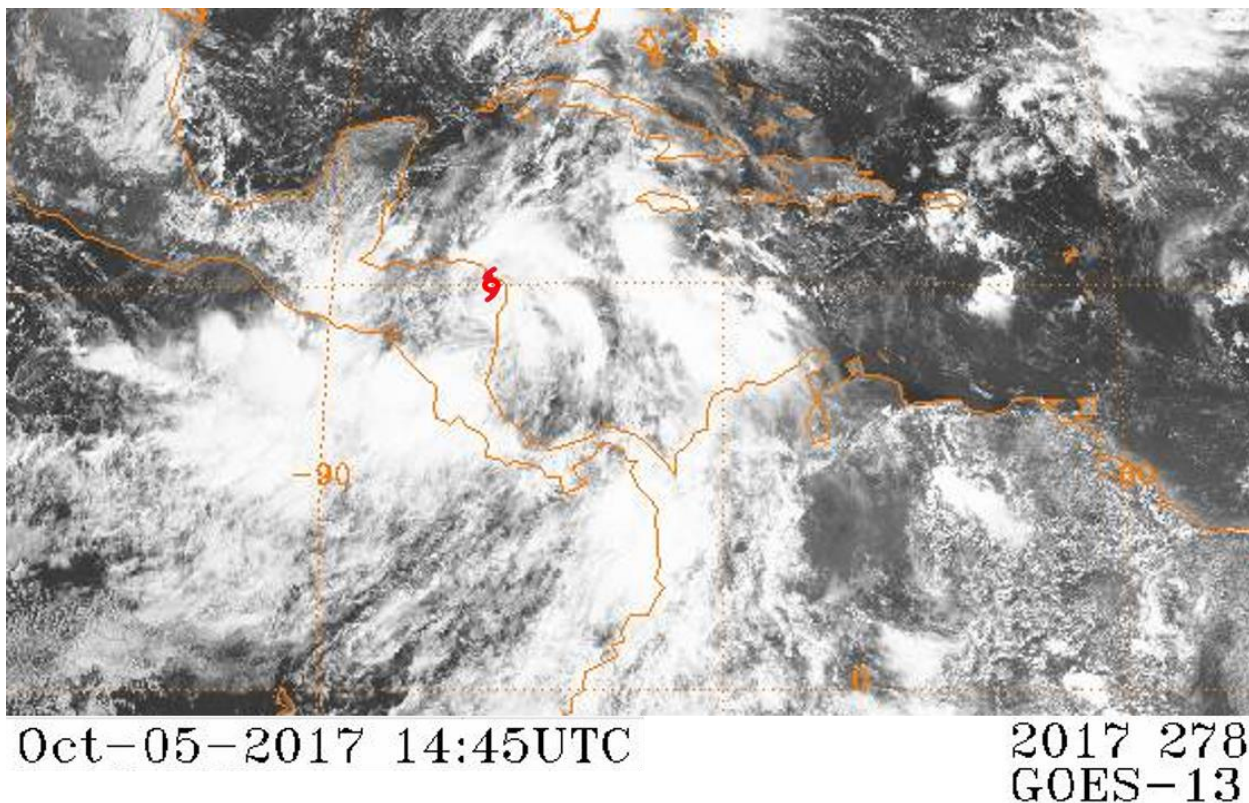


Figura A8.1: Ubicación de la Tormenta Tropical NATE el día 05 de octubre del 2017.

Fuente: Global ISCCP B1 Browse System, NCEI (<https://www.ncdc.noaa.gov/gibbs/>).

(Caso 2).

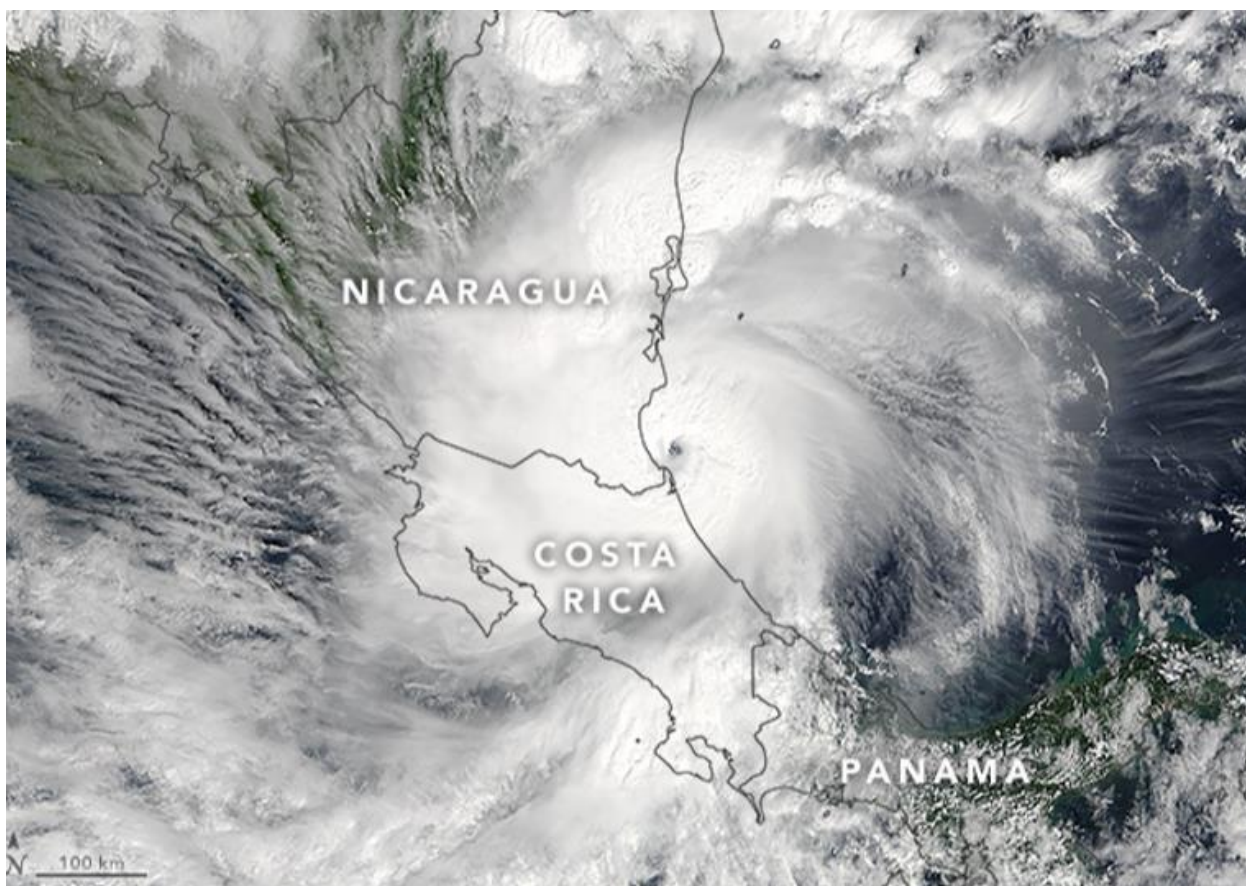


Figura A8.2: Ubicación del Huracán OTTO el día 24 de noviembre del 2016.

Fuente: NHC (2017).

(Caso 4).

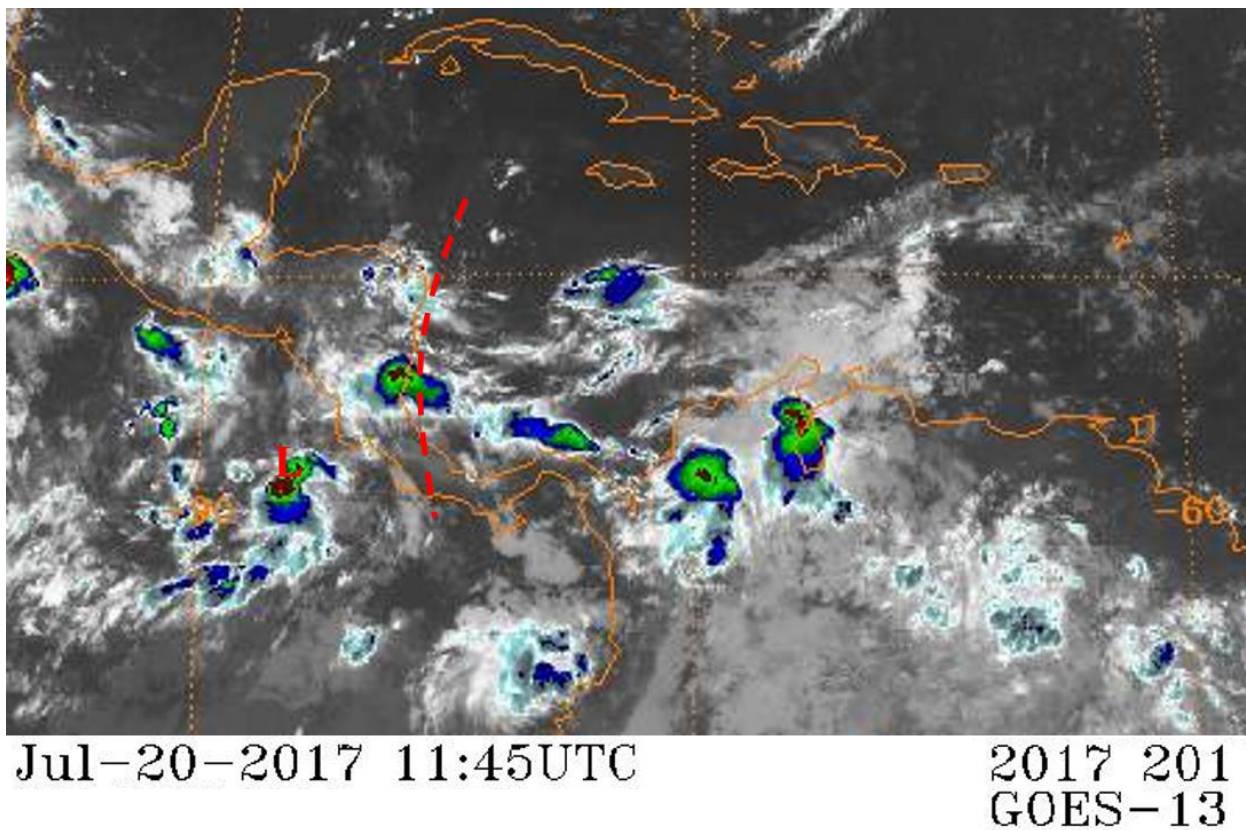
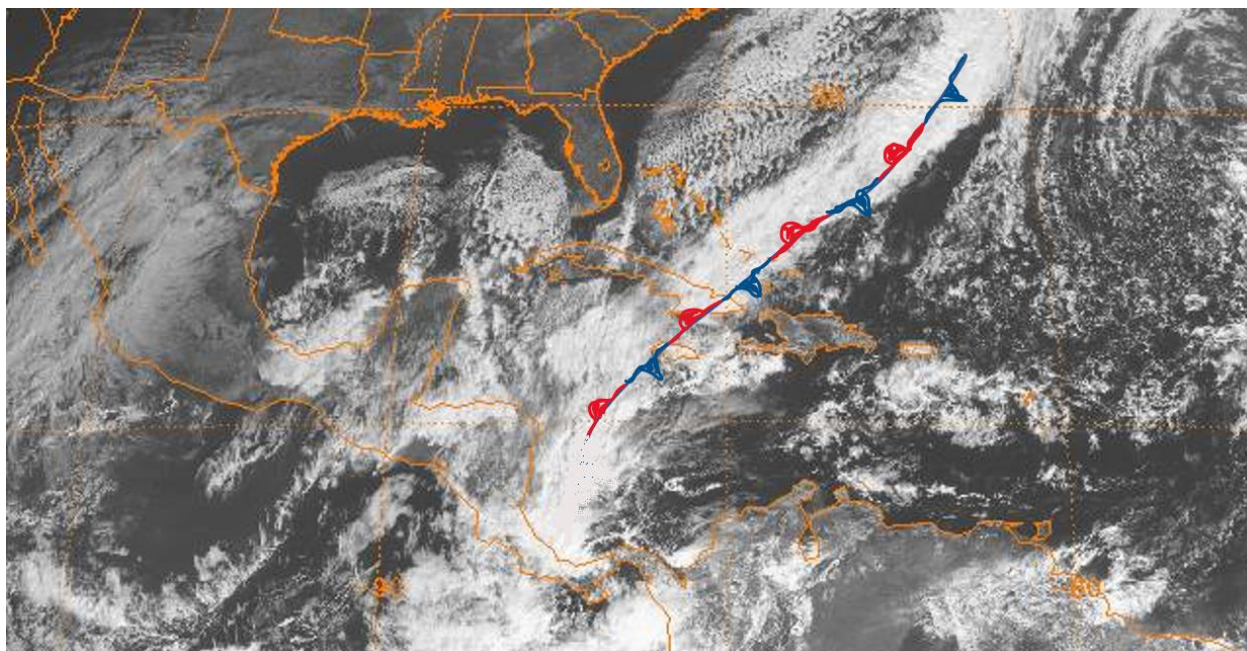


Figura A8.3: Ubicación de la Onda Tropical sobre el país y Baja Presión en la costa Pacífico de Costa Rica el día 20 de julio del 2017.

Fuente: Global ISCCP B1 Browse System, NCEI (<https://www.ncdc.noaa.gov/gibbs/>).

(Caso 6).



Dec-11-2017 14:45UTC

2017 345
GOES-13

Figura A8.4: Ubicación del sistema frontal (Empuje Frío) el día 11 de diciembre del 2017.

Fuente: Global ISCCP B1 Browse System, NCEI (<https://www.ncdc.noaa.gov/gibbs/>).

(Caso 7).