

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DEL PRONÓSTICO
TERMINAL DE AERÓDROMO CON ÉNFASIS EN LOS FENÓMENOS
METEOROLÓGICOS EN EL AEROPUERTO DE IQUITOS”**

Trabajo de Suficiencia Profesional para Optar el Título de:

INGENIERO METEORÓLOGO

CARLOS TETSUO YSHIDA RIVA

Lima – Perú

2022

La UNALM es la titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual)

Document Information

Analyzed document	TSP _Monografía_Carlos Yshida versión final.docx (D148056557)
Submitted	10/30/2022 12:32:00 AM
Submitted by	EUSEBIO IDELMO CISNEROS TARMEÑO
Submitter email	ecisneros@lamolina.edu.pe
Similarity	1%
Analysis address	ecisneros.unalm@analysis.arkund.com

Sources included in the report

Universidad Nacional Agraria La Molina / TSP -FELICIANO CABEZAS G 14 OCT-LINEAS-DE-CCTE último del 17 octubre.docx

SA	Document TSP -FELICIANO CABEZAS G 14 OCT-LINEAS-DE-CCTE último del 17 octubre.docx (D146720511)		1
	Submitted by: ecisneros@lamolina.edu.pe		
	Receiver: ecisneros.unalm@analysis.arkund.com		

Universidad Nacional Agraria La Molina / TSP_Ramos Garcia, Polet corregido 211022para ouriginal.docx

SA	Document TSP_Ramos Garcia, Polet corregido 211022para ouriginal.docx (D146722196)		4
	Submitted by: ecisneros@lamolina.edu.pe		
	Receiver: ecisneros.unalm@analysis.arkund.com		

Entire Document

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE CIENCIAS

"METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DEL PRONÓSTICO TERMINAL DE AERÓDROMO CON ÉNFASIS EN LOS FENÓMENOS METEOROLÓGICOS EN EL AEROPUERTO DE IQUITOS"

Presentada por:

Carlos Tetsuo Yshida Riva

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO METEORÓLOGO

Lima - Perú

2022 TÍTULO "METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DEL PRONÓSTICO TERMINAL DE AERÓDROMO CON ÉNFASIS EN LOS FENÓMENOS METEOROLÓGICOS EN EL AEROPUERTO DE IQUITOS"

DEDICATORIA A Dios por guiar e iluminar mis pasos, regalarme el don de la vida y la oportunidad de permitirme lograr mis metas y sueños.

A mi familia por su paciencia, apoyo y cariño incondicional.

AGRADECIMIENTOS

A mis colegas y amigos Marco, Polet, Pedro y Miguel por acompañarme y apoyarme durante todo este proceso.

A mis profesores por las sugerencias y por compartir su experiencia y conocimiento durante mi formación profesional.

A CORPAC que permite mi formación, desempeño y crecimiento profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDOS RESUMEN ix ABSTRACT x 1. INTRODUCCIÓN 1 1.1 Problemática 1 1.2 Objetivos 3 II. REVISIÓN DE LITERATURA 4 2.1.

Características climáticas de la ciudad de Iquitos 4 2.2. Circulación General Atmosférica en Sudamérica 7 2.2.1. Zona de Convergencia

Intertropical (ITCZ) 8 2.2.2. Sistema Monzónico Sudamericano (SAMS) 8 2.2.3. Líneas de Inestabilidad 11 2.2.4. Corriente en Chorro 12 2.3.

Pronóstico Terminal Aeródromo (TAF) 14 2.3.1. Indicadores o grupos de cambio que componen un Pronóstico Terminal de Aeródromo (TAF) 14

2.4. Características Físicas de una Tormenta 15 2.4.1. Etapas de desarrollo de una Tormenta 15 2.4.2. Relámpagos y truenos 16 2.4.3. Condiciones

necesarias para la formación de una Tormenta 17 2.5 Niebla 19 2.5.1. Procesos formadores de Niebla 19 2.5.2. Niebla por Radiación y Advección

20 III. DESARROLLO DEL TRABAJO 22 3.1. Área de estudio 22 3.2. Metodología 22 3.2.1. Determinación de la frecuencia de ocurrencia de

eventos de tormenta y niebla en el aeropuerto de Iquitos. 23 3.2.2. Identificación de las principales variables meteorológicas que favorecen la

ocurrencia de tormentas y niebla en el aeropuerto de Iquitos. 23 3.2.3. Identificación de las condiciones atmosféricas que favorecen la

ocurrencia de eventos de tormenta y niebla en el aeropuerto de Iquitos. 24 3.2.4. Determinación de la metodología para la elaboración del

pronóstico terminal de aeródromo (TAF) y la ocurrencia de tormentas y niebla en el aeropuerto de Iquitos. 25 IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 28

4.1. Frecuencia de ocurrencia de eventos de tormenta y de niebla en el aeropuerto de Iquitos durante el periodo de 2005 – 2021. 28 4.2.

variables meteorológicas que favorecen la ocurrencia de tormentas y niebla en el aeropuerto de Iquitos. 29 4.3. Condiciones atmosféricas que

favorecen la ocurrencia de eventos de tormenta y niebla en el aeropuerto de Iquitos. 31 4.4. Metodología para la elaboración del pronóstico

terminal de aeródromo (TAF) y la ocurrencia de tormentas y niebla en el aeropuerto de Iquitos. 46 V. CONCLUSIONES 49 VI.

RECOMENDACIONES 51 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 52 ANEXOS 55

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DEL PRONÓSTICO
TERMINAL DE AERÓDROMO CON ÉNFASIS EN LOS FENÓMENOS
METEOROLÓGICOS EN EL AEROPUERTO DE IQUITOS”**

Trabajo de Suficiencia Profesional para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO METEORÓLOGO

Presentada por:

CARLOS TETSUO YSHIDA RIVA

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Mg. Sc. Jerónimo García Villanueva
Presidente

Ing. Franklin Delio Unsihuay Tovar
Miembro

Ing. Héctor Ladislao Huisacaina Soto
Miembro

Mg. Sc. Eusebio Idelmo Cisneros Tarmeño
Asesor

DEDICATORIA

A Dios por guiar e iluminar mis pasos, regalarme el don de la vida y la oportunidad de permitirme lograr mis metas y sueños.

A mi familia por su paciencia, apoyo y cariño incondicional.

AGRADECIMIENTOS

A mis colegas y amigos Marco, Polet, Pedro y Miguel por acompañarme y apoyarme durante todo este proceso.

A mis profesores por las sugerencias y por compartir su experiencia y conocimiento durante mi formación profesional.

A CORPAC que permite mi formación, desempeño y crecimiento profesional.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	vii
ABSTRACT	viii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Problemática.....	1
1.2 Objetivos	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Características climáticas de la ciudad de Iquitos	4
2.2. Circulación General Atmosférica en Sudamérica	7
2.2.1. Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ)	7
2.2.2. Sistema Monzónico Sudamericano (SAMS)	8
2.2.3. Líneas de Inestabilidad	10
2.2.4. Corriente en Chorro	11
2.3. Pronóstico Terminal Aeródromo (TAF).....	13
2.3.1. Indicadores o grupos de cambio que componen un Pronóstico Terminal de Aeródromo (TAF).....	13
2.4. Características Físicas de una Tormenta.....	14
2.4.1. Etapas de desarrollo de una Tormenta.....	14
2.4.2. Relámpagos y truenos.....	15
2.4.3. Condiciones necesarias para la formación de una Tormenta.....	16
2.5 Niebla.....	17
2.5.1. Procesos formadores de Niebla	18
2.5.2. Niebla por Radiación y Advección.....	19
III. DESARROLLO DEL TRABAJO	20
3.1. Área de estudio	20
3.2. Metodología	20

3.2.1. Determinación de la frecuencia de ocurrencia de eventos de tormenta y niebla en el aeropuerto de Iquitos.	21
3.2.2. Identificación de las principales variables meteorológicas que favorecen la ocurrencia de tormentas y niebla en el aeropuerto de Iquitos.	21
3.2.3. Identificación de las condiciones atmosféricas que favorecen la ocurrencia de eventos de tormenta y niebla en el aeropuerto de Iquitos.	21
3.2.4. Determinación de la metodología para la elaboración del pronóstico terminal de aeródromo (TAF) y la ocurrencia de tormentas y niebla en el aeropuerto de Iquitos.	23
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
4.1. Frecuencia de ocurrencia de eventos de tormenta y de niebla en el aeropuerto de Iquitos durante el periodo de 2005 – 2021.	25
4.2. variables meteorológicas que favorecen la ocurrencia de tormentas y niebla en el aeropuerto de Iquitos.....	26
4.3. Condiciones atmosféricas que favorecen la ocurrencia de eventos de tormenta y niebla en el aeropuerto de Iquitos.....	28
4.3.1. Evento de Tormenta (10 marzo 2019).....	28
4.3.2. Evento de niebla (07 de mayo 2022)	35
4.4. Metodología para la elaboración del pronóstico terminal de aeródromo (TAF) y la ocurrencia de tormentas y niebla en el aeropuerto de Iquitos.	43
V. CONCLUSIONES	46
VI. RECOMENDACIONES	47
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
VIII. ANEXOS	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Temperatura del Aire Media Mensual	4
Figura 2. Velocidad Media y Dirección Predominante del Viento	5
Figura 3. Precipitación Total y Humedad Relativa Media mensual.	5
Figura 4. Sistemas que modulan el clima en Sudamérica en niveles bajos (Adaptado de Satyamurty)	7
Figura 5. Sistemas que modulan el clima en Sudamérica en niveles altos (Adaptado de Satyamurty)	7
Figura 6. Esquema Sección Transversal de elementos de gran escala asociados al Monzón Sudamericano	8
Figura 7. Regiones de entrada y salida del JS	12
Figura 8. Etapas del Desarrollo de una Tormenta: (a) Etapa Tower Cúmulos, (b) Etapa Madura y (c) Etapa Disipación.....	15
Figura 9. Línea de Turbonada/Cortante	17
Figura 10. Mecanismos para la formación de niebla	18
Figura 11. Procesos asociados a la formación de niebla por radiación y advección	19
Figura 12. Área de estudio	20
Figura 13. Contenido de un pronóstico terminal de aeródromo (TAF)	23
Figura 14. Frecuencia mensual de eventos Tormenta (2005 – 2021).....	25
Figura 15. Frecuencia mensual de eventos Niebla (2005 – 2021).....	26
Figura 16. Rosa de vientos evento tormenta (a) y evento de niebla (b).....	26
Figura 17. Gráfica de variación temporal horaria de humedad relativa (%), visibilidad (metros), (a) temperatura y temperatura de rocío (°C) evento tormenta y (b) evento de niebla	27
Figura 18. Líneas de Corriente y Divergencia para los niveles de 850, 700, 500 y 250 hPa.....	28
Figura 19. Líneas de Corriente y Divergencia para los niveles de 850, 700, 500 y 250 hPa.....	29

Figura 20. Humedad relativa y líneas de corriente 500 hPa, movimiento vertical, agua precipitable y humedad relativa – flujo promedio capa 850 – 200 hPa.....	29
Figura 21. Humedad relativa y líneas de corriente 500 hPa, movimiento vertical, agua precipitable y humedad relativa – flujo promedio capa 850 – 200 hPa.....	30
Figura 22. Divergencia y vector viento en niveles de 850 y 200 hPa.....	30
Figura 23. Divergencia y vector viento en niveles de 850 y 200 hPa.....	31
Figura 24. Índice CAPE	31
Figura 25. Índice de Galvez/Davison (GDI)	32
Figura 26. Gráfica Multivariable - CAPE y GDI	32
Figura 27. Temperatura potencial equivalente y viento en 850 hPa.....	33
Figura 28. Temperatura potencial equivalente y viento en 850 hPa.....	33
Figura 29. Corte transversal temperatura potencial equivalente, movimiento vertical, humedad relativa y viento	34
Figura 30. Serie de tiempo evento de tormenta 10/03/2019	35
Figura 31. Imágenes de Satélite Goes 16 evento tormenta. (a) Canal 16 – 13.30 microns y (b) Canal 09 – 06.90 microns.....	35
Figura 32. Líneas de corriente y movimiento vertical para los niveles de 850, 700, 500 y 250 hPa.....	36
Figura 33. Líneas de corriente y movimiento vertical para los niveles de 850, 700, 500 y 250 hPa.....	37
Figura 34. Líneas de corriente y movimiento vertical para los niveles de 1000, 975, 925 y 850 hPa.	37
Figura 35. Líneas de corriente y humedad relativa para los niveles de 1000, 975, 925 y 850 hPa.....	38
Figura 36. Divergencia y vector viento para niveles de 850 y 250 hPa.....	39
Figura 37. Divergencia y vector viento para niveles de 850 y 250 hPa.....	39
Figura 38. Índice de Galvez/Davison (GDI)	40
Figura 39. Índice Multivariable CAPE y GDI.....	40
Figura 40. Corte transversal temperatura potencial equivalente, movimiento vertical, humedad relativa y viento	41

Figura 41. Serie de tiempo evento de niebla 07/05/2022.....	42
Figura 42. Imágenes de Satélite Goes 16 evento niebla. (a) Canal 16 – 13.30 microns y (b) Canal 09 – 06.90 microns	42
Figura 43. Esquema resumen de las variables meteorológicas para la elaboración del TAF en el aeropuerto de Iquitos.....	43
Figura 44. Esquema resumen de la metodología para la elaboración del TAF en el aeropuerto de Iquitos.	43
Figura 45. Diagrama de flujo para el pronóstico de tormenta en el aeropuerto de Iquitos	44
Figura 46. Diagrama de flujo para el pronóstico de niebla en el aeropuerto de Iquitos ...	45

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Evento de niebla en el aeropuerto de Iquitos.	52
Anexo 2: Evento de tormenta en el aeropuerto de Iquitos	54

RESUMEN

El presente trabajo describe la metodología para la elaboración del Pronóstico Terminal de Aeródromo (TAF), el cual constituye uno de los procedimientos operativos que se realiza en la Oficina Meteorológica de Aeródromo (OMA) en la Corporación Peruana de Aeropuertos y Aviación Comercial (CORPAC).

De acuerdo a la Organización Meteorológica Mundial (OMM), tres cuartas partes de las demoras importantes de los vuelos en las regiones con alta densidad de tránsito aéreo están relacionadas con las condiciones meteorológicas (convección, turbulencia, engelamiento, cizalladura del viento, niebla, entre otros). A raíz de ello, es que surgió la necesidad de establecer una metodología para la elaboración del pronóstico de terminal de aeródromo (TAF) con énfasis en los fenómenos meteorológicos que afectan las operaciones aéreas.

Para el desarrollo de la metodología se realizaron los siguientes pasos: realizar gráficas de frecuencia de la ocurrencia de eventos de tormenta y niebla en el aeropuerto de Iquitos, identificar las variables asociadas al desarrollo de estos fenómenos, identificar las condiciones atmosféricas propicias para su ocurrencia y por último determinar una metodología que permita su inclusión en la elaboración del pronóstico de terminal de aeródromo (TAF) para el aeropuerto de Iquitos por medio del análisis de dos casos de estudio, uno de tormenta y el otro de niebla.

Por medio de la metodología encontrada en el presente trabajo que enfatiza la inclusión de los fenómenos meteorológicos en el procedimiento de realización del pronóstico de terminal de aeródromo (TAF) en el aeropuerto de Iquitos, se logrará una mejora en el servicio de meteorología aeronáutica; puesto que esta constituye uno de los factores más importantes para la gestión del tránsito aéreo (*air traffic management*, ATM), debido a que contribuye a la mejora de la seguridad y la eficiencia de las operaciones de las compañías aéreas, tanto en tierra como durante distintas fases del vuelo de las aeronaves.

Palabras clave: Pronóstico de terminal de aeródromo (TAF), fenómeno meteorológico, tormenta, niebla, aeropuerto de Iquitos

ABSTRACT

This work describes the methodology for the elaboration of the Terminal Aerodrome Forecast (TAF), which is considered one of the main operative procedures that is carried out in the Aerodrome Meteorological Office (OMA) in the Peruvian Corporation of Airports and Commercial Aviation (CORPAC).

According to the World Meteorological Organization (WMO), three quarters of major flight delays in regions with high air traffic density are related to weather conditions (convection, turbulence, icing, wind shear, fog, etc.) others). This is the reason why a methodology for performing the aerodrome terminal forecast (TAF) is needed with emphasis on the meteorological phenomena that may affect aeronautical operations.

For the development of the methodology, the following steps were carried out: frequency tables of the occurrences of thunderstorm and fog events at the Iquitos airport were made. Then, the variables associated with the development of these phenomena were identified. After that, the atmospheric conditions associated to their occurrences were identified and finally, a methodology that allows its inclusion in the aerodrome terminal forecast (TAF) for the Iquitos airport was performed through the analysis of two case studies, one of storm and the other of fog.

Through the methodology found in the present work that emphasizes the inclusion of meteorological phenomena in the procedure for carrying out the aerodrome terminal forecast (TAF) at the Iquitos airport, an improvement in the aeronautical meteorology service will be achieved; since this constitutes one of the most important factors for air traffic management (ATM), because it contributes to improving the safety and efficiency of operations both for airlines on the ground and during different aircraft flight phases.

Keywords: Terminal aerodrome forecast (TAF), weather phenomena, thunderstorm, fog, Iquitos airport

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Problemática

La realización del presente trabajo fue motivada por el deseo de superación y el compromiso de seguir con el camino de mi formación y desarrollo profesional, para poder ofrecer un mejor servicio en mi centro laboral, además de poder optar a la obtención del título profesional, el cual me permitirá aspirar en un futuro a cargos jerárquicos, tanto en el ámbito público como en el privado.

Actualmente, el autor de este trabajo se desempeña profesionalmente en la Corporación Peruana de Aeropuertos y Aviación Comercial (CORPAC), la cual es una empresa paraestatal fundada el 25 de junio de 1943 que tiene como misión: “Gestionar los Servicios de navegación Aérea y Aeroportuarios con seguridad, eficiencia y calidad”.

CORPAC es la autoridad Meteorológica designada por la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) que representa el estado contratante ante la Organización Internacional de Aviación Civil (OACI). Brinda el servicio meteorológico a la aviación de conformidad con el Anexo 3 de la OACI, compuesto por disposiciones, normas y métodos recomendados internacionalmente y coordinados con la Organización Mundial de Meteorología (OMM).

Por consiguiente, uno de los servicios que ofrece CORPAC es el de meteorología aeronáutica y este consiste en proporcionar a los usuarios información meteorológica (estado del tiempo, pronósticos y resúmenes climáticos) necesaria para el desempeño de las funciones aeronáuticas y así contribuir a la seguridad, regularidad y eficiencia de la navegación aérea nacional e internacional. La Oficina Meteorológica de Aeródromo (OMA) es la responsable de este servicio y cuenta con 4 sedes: Lima, Iquitos, Cusco y Arequipa, siendo la sede principal de Lima.

Entre las principales actividades que desempeña un egresado en meteorología en la OMA están las siguientes: realizar y difundir los pronósticos de aeródromo (TAF) de la Estación Meteorológica Aeródromo (EMA) asociada y EMAs tributarias asignadas, vigilar continuamente las condiciones meteorológicas previstas y realizar las enmiendas a los

informes TAF(s) en el menor tiempo posible en alguna de las EMAs bajo su responsabilidad en caso se presenten cambios significativos, elaborar y difundir tanto avisos de cizalladura de viento como avisos de aeródromo de acuerdo a la RAP 303, Reglamento Aeronáutico del Perú, que es un documento normativo que rige para el Servicio Meteorológico para la Navegación Aérea en el Perú y verificar la operatividad y correcto funcionamiento de equipos, sistemas y medios de comunicación, entre otras actividades.

Según Fultz (2016), las malas condiciones meteorológicas siempre han sido una de las causas de mayor influencia en la falta de seguridad de los vuelos, pero como única causal solamente engloban el 15% de los casos de accidentes. No obstante, está más presente cuando es una causa añadida a otras, en la que influye decisivamente en el desenlace de los accidentes (entre un 30 – 35%).

De acuerdo a Abbas et al (2012) uno de los fenómenos meteorológicos que mayormente afecta al sector aeronáutico son las tormentas eléctricas, debido al elevado costo que estas implican en los prolongados cierres generados en los aeropuertos, además de su impacto en las aeronaves, así como en la ocurrencia de accidentes a nivel mundial.

Como evidencia de ello, el artículo publicado por el canal RPP, titulado “Intensa lluvia deja sin luz a aeropuerto de Iquitos y afecta vuelos”, del 24 de octubre del 2016, el cual manifiesta que cerca de 200 pasajeros con destino Lima - Iquitos quedaron varados en el aeropuerto de la ciudad de Lima debido a problemas climáticos en donde las intensas lluvias no permitieron el aterrizaje de la aeronave en la ciudad de Iquitos. (RPP, 2016)

Así mismo, de acuerdo a una publicación online en el periódico El Correo (2013) se informó que “Niebla impide llegada de aviones a Iquitos”, donde el corresponsal de dicho diario resaltó la presencia de una niebla intensa en horas de la mañana que impidió el ingreso de los vuelos comerciales que unen la ciudad de Iquitos con el resto del Perú.

Con el fin de garantizar la seguridad operacional en el Aeropuerto Internacional coronel FAP Francisco Secada Vignetta y con la ayuda de las herramientas aprendidas durante la formación académica través de las diferentes materias, el presente trabajo de suficiencia profesional (TSP) tiene por finalidad servir de guía para la comprensión de las condiciones atmosféricas que promueven el desarrollo de los fenómenos meteorológicos que afectan las operaciones aéreas en el aeropuerto de Iquitos y resaltar la importancia de su pronóstico con el fin de disminuir el riesgo operativo y generar pérdidas económicas por su ocurrencia.

1.2 Objetivos

Objetivo general:

- Elaborar una metodología del pronóstico terminal de aeródromo (TAF) con énfasis en la ocurrencia de tormenta y niebla en el aeropuerto internacional coronel FAP Francisco Secada Vignetta de Iquitos.

Objetivos específicos:

- Determinar la frecuencia de ocurrencia de eventos de tormenta y de niebla en el aeropuerto de Iquitos durante el periodo de 2005 – 2021.
- Identificar principales variables atmosféricas asociadas al desarrollo de tormentas y niebla en el aeropuerto de Iquitos.
- Identificar las condiciones atmosféricas que favorecen la ocurrencia de eventos de tormenta y niebla en el aeropuerto de Iquitos.
- Determinar la metodología para elaborar el pronóstico terminal de aeródromo (TAF) y la ocurrencia de tormentas y niebla en el aeropuerto de Iquitos.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Características climáticas de la ciudad de Iquitos

Para Trewartha, citado en Marengo (1998) “la ciudad de Iquitos al encontrarse localizada en la Amazonia peruana y a orillas del río Amazonas presenta un clima caracterizado por la presencia de aire tropical húmedo durante todo el año, sin presencia de meses secos” (p.35), donde los valores de temperatura del aire presentan mínimas medias de 20 – 22 °C y máximas entre los 29 – 31°C y cuya distribución media anual presenta un valor de 26°C. Durante la estación de invierno el rango térmico tiende a aumentar en donde las máximas temperaturas pueden alcanzar valores de hasta 36°C.

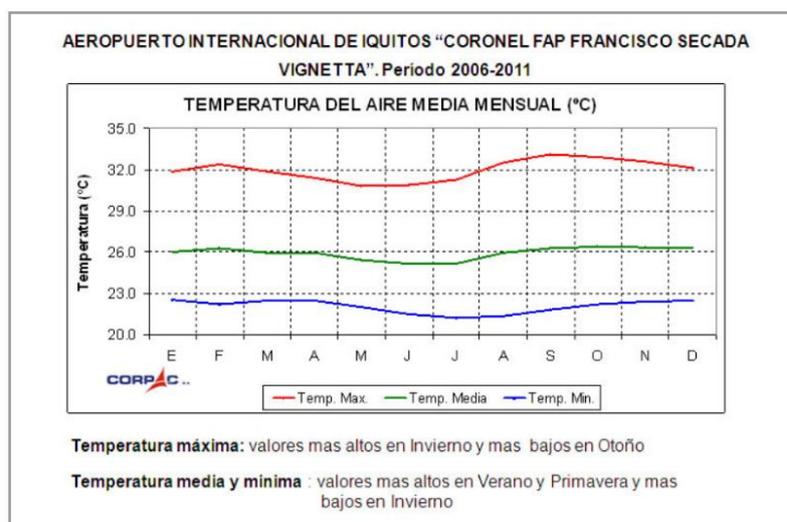


Figura 1. Temperatura del Aire Media Mensual

FUENTE: Área Climatología, CORPAC (2017)

Estudios realizados por la ONERN y Marengo (1998) muestran que en la región de Iquitos los vientos generalmente no son tan intensos, con promedios mensuales entre 3 – 4 m/s durante los meses de verano, y de 4 – 5 m/s en los meses de invierno. No obstante, en los días de friaje, los vientos pueden alcanzar valores de 10 m/s. Las calmas se manifiestan normalmente en horas de la mañana y en la noche, mientras que al medio día predominan los vientos débiles del norte y noreste.

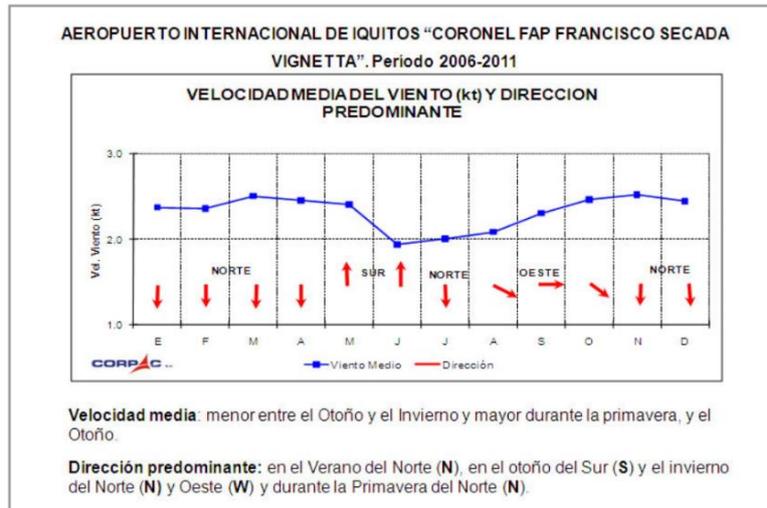


Figura 2. Velocidad Media y Dirección Predominante del Viento
FUENTE: Área Climatología CORPAC (2017)

La humedad relativa presenta una media anual bastante alta con valores que oscilan entre los 80 y 90% durante todo el año, y donde en los meses de invierno alcanza una mayor extensión con valores superiores al 90%. Estos valores son favorecidos por los procesos de evaporación de cursos de agua y zonas pantanosas, así como por la evapotranspiración de los bosques.

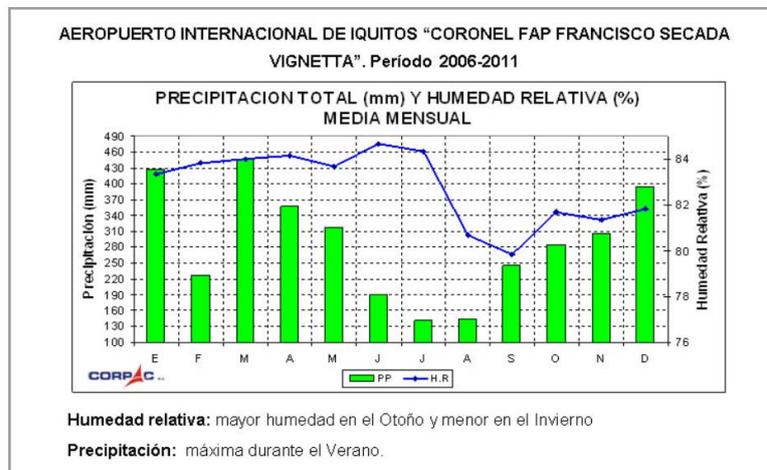


Figura 3. Precipitación Total y Humedad Relativa Media mensual.
FUENTE: Área Climatología CORPAC (2017).

De acuerdo a estudios realizados por diversos autores, entre ellos Marengo (2009), en la región de la Amazonía se tienen tres máximos de precipitación anual. El primero se ubica en el noroeste de la Amazonía, con lluvias superiores a los 3000 mm/año, y está asociada a la condensación del aire húmedo transportado por los vientos alisios del noreste que convergen en la ZCIT, y que son elevados por la topografía de los Andes. Estas lluvias se producen en los meses de abril – junio.

El segundo centro se localiza en la parte central de la Amazonía, aproximadamente a los 5°S, con valores de 2500 mm/año, esta se manifiesta a través de una banda orientada de este a oeste, donde la estación lluviosa se concentra en el trimestre de marzo – mayo. Por último, tenemos al tercer máximo de lluvias que se ubica en la parte este de la cuenca del río Amazonas, con precipitación anual superior a los 4000 mm/año, y con valores máximos de precipitación entre los meses de febrero – abril. Este máximo posiblemente este asociado a las líneas de inestabilidad que se forman a lo largo de la costa, durante o al final de la tarde, y que son forzadas por la circulación de la brisa marítima.

La ciudad de Iquitos se sitúa al sudoeste del primer máximo de lluvias localizado en el noroeste de la Amazonía, con totales anuales entre 2400 – 3100 mm, y con el trimestre más lluvioso entre los meses de febrero y abril, el periodo con menores precipitaciones ocurre en los meses de junio – agosto. Kousky (1988), respecto a las características de la estación lluviosa, identificó que en promedio esta inicia a mediados de agosto y culmina a mediados de junio, con un máximo en los meses de marzo y abril.

Debido a su ubicación en las tierras bajas del trópico húmedo peruano, el estado del tiempo en la ciudad de Iquitos se encuentra afectado por la circulación atmosférica tropical, y a su vez por los centros de alta presión sobre el Océano Pacífico y el Atlántico. Además, también está influenciado por la presencia de los vientos alisios y la convergencia de estos en la llamada zona de convergencia intertropical (ZCIT), así como por las perturbaciones frontales y líneas de inestabilidad de corta duración que pueden alcanzar esta región en verano o invierno.

Durante el mes de enero, la ZCIT atraviesa una mayor área del trópico húmedo peruano a medida que avanza hacia la Amazonia del sur, y hacia el norte sobre la desembocadura del Amazonas en los meses de marzo y abril. (Kousky, 1988)

Durante la estación lluviosa de verano, la banda nubosa asociada a la ZCIT cubre la Amazonía generando altas precipitaciones debido a la inestabilidad atmosférica. Adicionalmente, los vientos predominantes son de componente norte y transportan humedad del Atlántico tropical hacia la Amazonía y el Noreste Brasileño. Caso contrario, durante el invierno, los anticiclones del Atlántico y del Pacífico en el hemisferio sur están intensificados y se encuentran desplazados más al norte, esto hace que la ZCIT alcance su posición más al norte; donde se produce la estación lluviosa y genera precipitaciones en regiones que abarca América central hasta las Guayanas.

2.2. Circulación General Atmosférica en Sudamérica

En el transcurso del año la circulación atmosférica en el continente sudamericano presenta las siguientes características (ver Figura 5), y entre las estructuras más influyentes en el clima de la cuenca amazónica tenemos las siguientes:

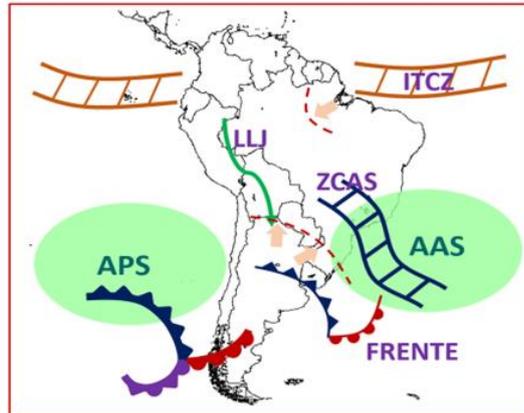


Figura 4. Sistemas que modulan el clima en Sudamérica en niveles bajos (Adaptado de Satyamurty)

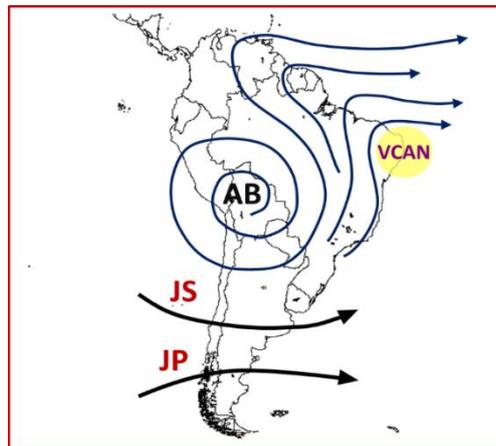


Figura 5. Sistemas que modulan el clima en Sudamérica en niveles altos (Adaptado de Satyamurty)

2.2.1. Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ)

De acuerdo a la OMM, citado en Paccini (2016) “la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ) es una región estrecha móvil donde convergen los vientos alisios provenientes de ambos hemisferios” (p.4), y se caracteriza por una convección profunda con presencia de humedad, la cual está asociada a la zona de ascenso de las celdas de Hadley debido al mayor calentamiento en el Ecuador. Garreaud, citado en Paccini, (2016)“indica que este sistema presenta un ciclo estacional de desplazamiento en dirección norte y sur; por lo tanto, su

posición y tiempo de desplazamiento tienen importantes implicancias para el inicio y duración de las lluvias en los Andes ecuatoriales y diversas regiones amazónicas” (p.4 – 5).

2.2.2. Sistema Monzónico Sudamericano (SAMS)

El Sistema Monzónico Sudamericano (SAMS, por sus siglas en inglés) constituye uno de los mayores regímenes de circulación en Sudamérica. El inicio de la fase húmeda de este sistema acontece a comienzos de octubre y se caracteriza por la presencia de intensas lluvias, especialmente en la zona central y este de Brasil, y las regiones de los andes entre los 12 – 32° S, donde más del 50% de la lluvia total anual se observa en estas regiones durante la fase madura del SAMS, en la época del verano austral (Kousky, 1988).

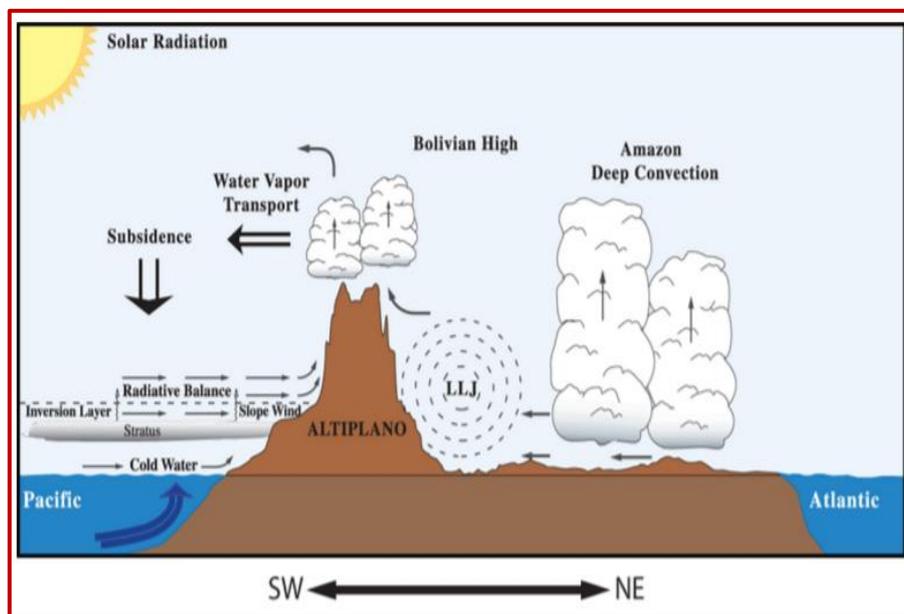


Figura 6. Esquema Sección Transversal de elementos de gran escala asociados al Monzón Sudamericano

FUENTE: Climate Variability and Predictability Program. CLIVAR (2005)

Este sistema tiene como una de sus forzantes a los vientos alisios que transportan la humedad desde el Atlántico. La cadena montañosa de los Andes actúa como una barrera para la circulación de bajos niveles que hace que este flujo se dirija sobre la zona oeste de Brasil, Bolivia y Paraguay. Adicionalmente, el intenso calor latente presente sobre la región del Chaco favorece a la formación de una baja presión térmica en superficie y en altos niveles, una alta presión conocida como Alta de Bolivia que es la causante de la presencia de lluvias en el verano austral sobre el Altiplano. Este movimiento ascendente sobre el continente tiene su contraparte a través de movimientos descendentes sobre los océanos adyacentes Pacífico y Atlántico. Garreaud et al, citado en Paccini (2016) “indica que estas regiones se caracterizan por presentar subsidencia en bajos niveles, mientras que en la tropósfera

superior existe una circulación ciclónica” (p.5). Entre los sistemas acoplados al SAMS tenemos a los siguientes:

a. Alta Bolivia (BH)

La circulación general de la alta tropósfera sobre Sudamérica ha sido estudiada durante los últimos años. El Alta de Bolivia posee una característica muy peculiar al presentar el desarrollo de un sistema de circulación anticiclónica en niveles altos (200 hPa) durante los meses de verano asociado a una fuerte convección en la región amazónica. Este sistema anticiclónico (BH), se sitúa sobre el altiplano boliviano. Durante los meses de invierno, ocurre una desintensificación de este sistema o desaparece por completo.

La permanencia de este sistema está asociada a la convergencia de humedad en bajos niveles que van de noreste y del este de Bolivia, debido a que esta convergencia provoca fuerte convección, condensación y liberación de calor latente en media y alta tropósfera asociada a la actividad convectiva.

Jones y Horel (1989, citado en Quispe, 2005), “analizando años de ocurrencia de eventos El Niño, observaron que la BH se localiza en general al oeste de su posición climatológica” (p.17). Esta peculiaridad también fue vista por Carvalho (2005) que durante el evento El Niño 82 – 83 la actividad convectiva de precipitación en la Amazonía disminuía, con la desintensificación de la BH.

b. Zona de Convergencia Atlántico Sur (SACZ)

La Zona de Convergencia del Atlántico Sur (SACZ) es una configuración que se presenta como una banda de nubosidad convectiva que se extiende en la dirección noroeste – sureste y cuya persistencia e intensidad definen la variación espacial y temporal de la precipitación (Carvalho, Jones, & Liebmann, 2004). A pesar de estar influenciado por varios factores se localiza aproximadamente entre los 15 y 40° S en bajos niveles (menor a 850 hPa) y es la encargada del transporte de humedad y calor desde la cuenca amazónica hacia Paraguay, norte de Argentina y sudeste de Brasil entre los meses de noviembre y marzo. Además, propicia el desarrollo de sistemas convectivos de mesoescala sobre la cuenca del río de la Plata.

Adicionalmente, este sistema presenta una variabilidad en diferentes escalas de tiempo que sido documentados en diversos estudios (Carvalho, Jones, & Liebmann, 2004)

c. Jet de Bajos Niveles Sudamericano (SALLJ)

Entre otros de los sistemas influyentes de la SAMS tenemos al Jet de Bajos Niveles que constituye un flujo de transporte de humedad en dirección oeste (por medio de un giro anticiclónico) proveniente del océano Atlántico hacia la cuenca amazónica y hacia el sur en dirección a la cuenca del río de La Plata. El fortalecimiento de esta circulación al este de los Andes en las regiones de Santa Cruz y Mariscal Estigarribia (Bolivia) da lugar al denominado SALLJ (ej. Marengo et al.,) (2004, citado en Paccini, 2016) (p.6).

Uno de los criterios para la identificación de esta circulación consiste en lo siguiente: 1) Identificar vientos a 850 hPa de velocidades mayor o igual a 12 m/s, 2) Una cizalladura vertical mayor o igual a 6 m/s entre los 850 y 700 hPa; y 3) Una componente meridional del viento mayor al componente zonal.

La presencia de eventos SALLJ se detectan durante todo el año, sin embargo, la mayoría de eventos (75 %) se dan en la época de noviembre y febrero donde se acoplan al sistema SAMS. Por otro lado, los eventos SALLJ que ocurren en invierno se asocian a la intensidad y posicionamiento del anticiclón del Atlántico Subtropical (Marengo et al., 2004) (Citado por Paccini). Adicionalmente, perturbaciones extratropicales como las ondas de latitudes medias influyen en el comportamiento del SALLJ (Carvalho, Jones, & Liebmann, 2004)

2.2.3. Líneas de Inestabilidad

Las líneas de inestabilidad (LI) constituyen uno de los más importantes productores de lluvia en la cuenca amazónica. Estos sistemas normalmente se forman a lo largo de la costa noreste de Sudamérica como resultado de la convección inducida por la brisa marina. Este fenómeno frecuentemente se propaga hacia el interior del continente y en algunos casos llega a alcanzar los andes 48h después de su formación (Kousky, 1988)

Según Molion (1987) estas líneas de inestabilidad pueden tener una longitud de 1000km y propagarse con una velocidad media de 10° de longitud por día, es decir 45 – 55 km/h. De acuerdo con Garstang (1994), las líneas amazónicas costeras pasan por 6 etapas en su ciclo de vida: origen, intensificación, madurez, debilitamiento, re – intensificación y disipación. Además, estudios detallados manifiestan que las líneas están compuestas por tres componentes: una región de pre – tempestad, que contienen cúmulos en desenvolvimiento, una banda principal con convección profunda (nubes cumulonimbus) y una zona con nubes estratiforme en la parte posterior del sistema, denominada región de yunque.

Estas líneas de inestabilidad de origen costero se desarrollan durante el final de la mañana y al inicio de la tarde a lo largo de la costa norte de Sudamérica y en ella se transporta calor sensible e hidrometeoros. Luego de su desarrollo estos sistemas se intensifican y se propagan hacia el continente, posiblemente como ondas de mesoescala asociadas con inestabilidad trapezoidal (Sun y Orlanski, 1981; Silva Dias y Ferrerira, 1992).

2.2.4. Corriente en Chorro

La Corriente en Chorro (JS: Jet Stream), es una región de vientos máximos en altura, esta zona de vientos máximo está asociado directamente al gradiente horizontal de temperatura (Holton, 1979) (como se cita en Quispe, 2005, p. 17) y la presencia del mismo, es indicador de la presencia de dos masas de aire con una frontera que las separa. Esta banda de flujos de aire se caracteriza por presentar de acuerdo a la OMM una velocidad mínima de 30 m/s, tienen la peculiaridad de ser flujos sinuosos donde se forman ondas con amplitudes latitudinales muy grandes; esta naturaleza sinuosa además de estar influenciada por el gradiente horizontal de temperatura se asocia a la existencia de vaguadas y cuñas o dorsales en altura.

Quispe (2005) indica que durante los meses de verano (diciembre, enero y febrero) el JS se ubica entre los 40° S a 50° S, con intensidades máximas promedio superior a los 32 m/s; mientras que para los meses de invierno (junio, julio y agosto) alcanza su máxima intensidad y acción en Sudamérica con valores medios de 45 m/s. El JS subtropical juega un rol importante en los procesos de intercambio estratosfera – tropósfera (Kowol-Santen, 1999; Ancellet y otros, 2000; Timmis - Vaughan y otros, 1999) asociado a hundimientos de la tropopausa provocados por anomalías frías en niveles medios.

Uccellini (1987), hace referencia de una porción localizada dentro del JS, donde los vientos a largo del flujo son más fuertes que en otras áreas a lo largo del JS, estas son conocidos como Jet Streak. Las regiones de entrada y salida del Jet Streak (ver figura 7) son importantes en términos de movimiento vertical, sistemas de presión en superficie y precipitación organizada donde proporciona suficiente humedad en bajos niveles. Como se puede apreciar en la figura 7 podemos ver una región de entrada que son por donde las parcelas de aire entran al jet streak y aceleran corriente arriba del Jet central y una region de salida que es por donde la parcela de aire sale fuera del jet streak y desaceleran corriente abajo del Jet central.

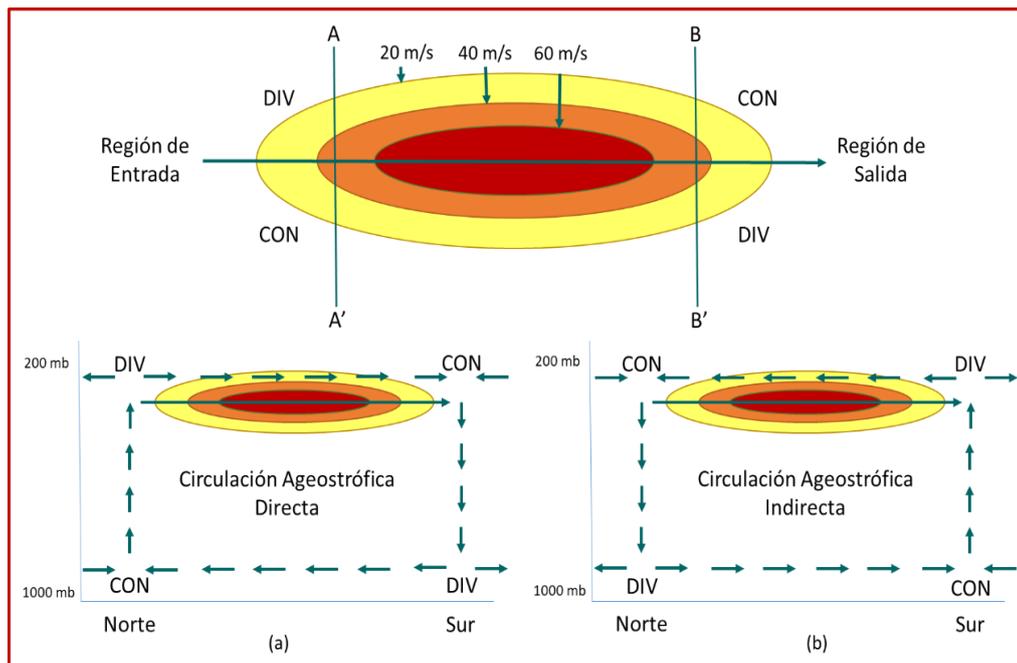


Figura 7. Regiones de entrada y salida del JS

De acuerdo al Aviation Weather Center/Transition Aviation Program, el criterio para evaluar la posición del Jet streak en la carta de 250 hPa, se realiza utilizando los siguientes valores promedios del nivel geopotencial:

- Jet Subtropical: sobre los 10,440 mgp (típicamente 10680mgp.).
- Rama Norte del Jet Polar: entre 10,200 y los 10,440 mgp.
- Rama Sur del Jet Polar: bajo los 10,200 mgp (típicamente entre 10080 y 9600mgp).

Cuando los jets streak están paralelos, en su análisis se debe de mantener una separación de por lo menos cinco grados de latitud.

Otro criterio es el planteado por Nielsen, de Texas A&M University, que por medio de una escala de temperaturas potenciales distingue los máximos de viento asociados a los diferentes tipos de Jet Stream. A través de un corte transversal del Jet, define que la temperatura potencial media asociada a masas polares es de 320 K y al Jet Subtropical de 340 K. En el continente Sudamericano se ha observado que la rama polar puede subdividirse en dos clases más, tenemos a la rama polar norte caracterizada por temperaturas de 330 K, y a la rama polar sur que presenta temperaturas de 320 K o menos y su valor depende de la temporada del año.

2.3. Pronóstico Terminal Aeródromo (TAF)

Según el documento OMM N° 782, los pronósticos terminales de aeródromo (TAF) constituyen descripciones completas de los elementos meteorológicos que se esperan ocurran en el aeródromo durante el período de validez del pronóstico y en el cual se encuentran incluidos todos los cambios que se consideren significativos para las operaciones de aeronaves.

Estos son elaborados por profesionales de las oficinas meteorológicas de aeródromo que, por medio de la normativa vigente, velan por el cumplimiento de las prácticas acordadas en el marco internacional. Además, abarcan un periodo que no debería ser menor de 6 horas ni mayor de 30 horas; donde el periodo de validez es determinado por un acuerdo de navegación aérea regional.

Los parámetros meteorológicos descritos en un pronóstico de aeródromo son los siguientes: viento en la superficie (velocidad y dirección), visibilidad reinante en la superficie, tiempo presente, nubosidad (o visibilidad vertical en caso de esperarse cielo oscurecido), cizalladura del viento a bajo nivel (LLWS) y cualquier cambio significativo esperado en uno o más de estos elementos durante el periodo de validez del respectivo TAF.

Por último, debe entenderse que el valor específico de cualquier elemento meteorológico indicado en el TAF constituye el valor más probable de ocurrencia que ese elemento podría alcanzar durante el periodo de pronóstico.

2.3.1. Indicadores o grupos de cambio que componen un Pronóstico Terminal de Aeródromo (TAF)

1) From (FMYYGGgg): Este indicador puede ser usado cuando se espere que un conjunto de condiciones meteorológicas reinantes cambie apreciablemente y más o menos completamente hasta presentar un conjunto de condiciones distintas.

2) Becoming (BECMG YYGG/YeYeGeGe): Este indicador hace referencia a un cambio relevante regular o irregular de las condiciones y elementos meteorológicos pronosticados en un momento no especificado comprendido en el periodo YYGG a YeYeGeGe. Por lo general, este periodo no excederá a 2 horas; pero en todo caso nunca será superior a 4 horas.

3) Tempo (TEMPO YYGG/YeYeGeGe): Este indicador señala fluctuaciones temporales en las condiciones y elementos meteorológicos pronosticados que pueden acaecer en cualquier

momento durante el periodo YYGG a YeYeGeGe. Estas fluctuaciones temporales deben durar menos de una hora en cada caso y, en conjunto, menos de la mitad del período indicado por YYGG/YeYeGeGe.

4) Prob (PROBC2C2 YYGG/YeYeGeGe): Este grupo será utilizado cuando no exista mucha confianza en otros valores alternativos de pronóstico, más el elemento de pronóstico considerado sea relevante para las operaciones de aeronaves. C2C2 indica la probabilidad porcentual de acaecimiento, donde se usan sólo los valores de 30 y 40 por ciento.

Cabe resaltar que este indicador de cambio siempre va seguido de un grupo horario (YYGG/YeYeGeGe) o de un grupo de cambio y de un grupo horario (TTTT YYGG/YeYeGeGe).

2.4. Características Físicas de una Tormenta

Según Donn (1978) una tormenta es un sistema atmosférico local caracterizado por la presencia de una nube del tipo cumulonimbos, que resulta de la convección que forma los cúmulos, y que generalmente produce rayos, truenos, vientos racheados, lluvias fuertes y, algunas veces, granizo. Su formación es altamente probable cuando coexisten condiciones de suficiente humedad, inestabilidad y ascenso. Además, la turbulencia que acompaña a esta fenómeno resulta fatal tanto para las embarcaciones de superficie como para la navegación aérea.

2.4.1. Etapas de desarrollo de una Tormenta

A pesar que el desarrollo de una tormenta es un proceso continuo, durante su evolución los sucesos pueden agruparse en tres etapas: etapa cúmulo, etapa de maduración y etapa de disipación (Donn, 1978).

La etapa de cúmulo se caracteriza por la presencia de corrientes ascendentes, estas se hacen más intensas en la parte superior de la nube, donde se pueden alcanzar velocidades de 16 m/s. Además, en esta etapa el aire penetra en el interior de la superficie lateral de la nube, a este proceso se le denomina arrastre. Esta etapa mantiene una duración de unos 15 minutos, en donde la nube puede llegar a alcanzar los 25000 o 30000 pies (8000 a 9000 metros).

La etapa de madurez inicia por medio de la aparición de lluvia, donde las gotas que precipitan crean una corriente descendente; y la mezcla de esta corriente descendente con el aire más seco de la troposfera inferior genera un fuerte enfriamiento evaporativo. El aire frío se

extiende en forma de un frente de racha en la superficie (flujo de salida que forma la bolsa de aire frío).

Asociados al flujo descendente, también tienen lugar los aguaceros más intensos de la tormenta, que en algunos casos puede darse en forma de granizo cuando las partículas son arrastradas por encima y debajo del nivel de engelamiento; notable rafagosidad del viento, disminución de temperatura y un brusco aumento de presión. La duración de esta etapa es de unos 15 a 30 minutos, y es donde la célula tormentosa alcanza su máxima extensión vertical, de unos 30000 a 60000 pies.

La etapa de disipación se inicia cuando el suministro de aire húmedo está bloqueado por corrientes descendentes en la parte inferior de la nube ocupándola por completo; privada de la humedad la tormenta se debilita, la precipitación disminuye y la nube se disipa

2.4.2. Relámpagos y truenos

El fuerte rozamiento del aire con los hidrometeoros en el interior de una nube cumulonimbos, genera que en las nubes una separación de cargas eléctricas, con aglomeración de las positivas en la parte superior, mientras las negativas se acumulan en la parte inferior.

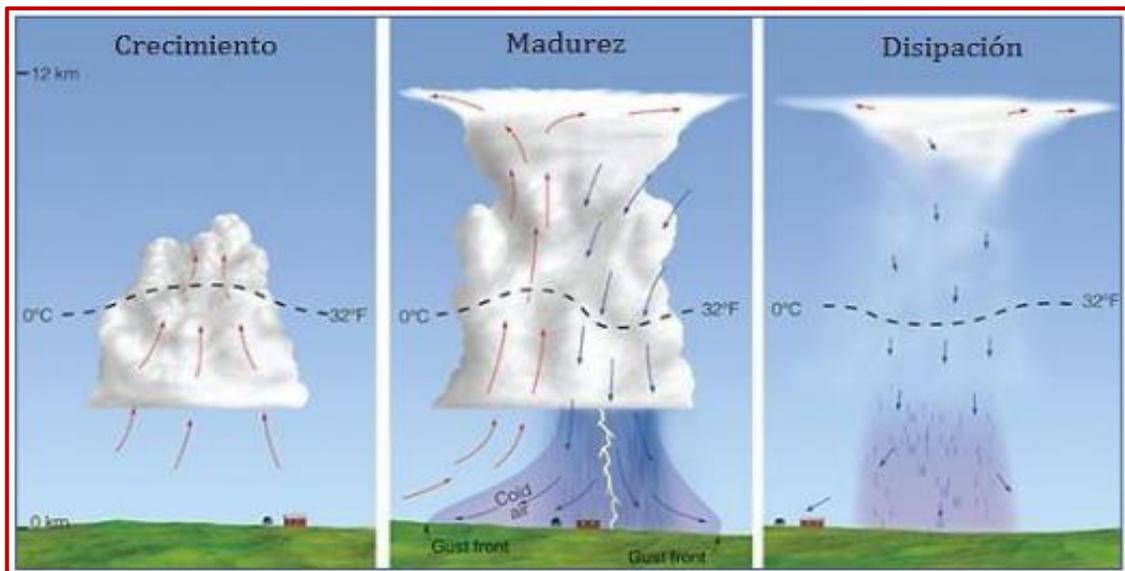


Figura 8. Etapas del Desarrollo de una Tormenta: (a) Etapa Tower Cúmulos, (b) Etapa Madura y (c) Etapa Disipación

FUENTE: Thomson, Higher Education, 2007

Estas últimas, dan lugar a la aparición de una carga positiva sobre el suelo (que en un inicio está cargado negativamente respecto al aire), y por consiguiente produce la inversión del campo eléctrico de buen tiempo. Cuando la diferencia de potencial llega a ser lo bastante alta, puede tener lugar descargas eléctricas desde la nube al suelo (rayo), entre nube y nube

(relámpago), o dentro de la propia nube. A raíz de la rápida expansión y contracción del aire, generada en la trayectoria de la descarga eléctrica se produce el sonido, conocido como trueno.

2.4.3. Condiciones necesarias para la formación de una Tormenta

2.4.3.1. Tormentas de Masas de Aire:

Las masas de aire constituyen enormes volúmenes de aire en los que prevalecen características uniformes de temperatura y humedad. Las tormentas que tienen lugar dentro del propio seno de una masa de aire, sin ninguna relación con los efectos frontales, se denominan tormentas de masa de aire (Donn, 1978).

La mayoría de estas se originan como células convectivas aisladas, y tienen la tendencia a producirse sobre tierra firme en las últimas horas de la tarde, durante el verano, cuando el calentamiento superficial del suelo origina el aumento del gradiente vertical de temperatura que da lugar a condiciones de inestabilidad.

Por otro lado, las tormentas locales, de origen marítimo, son más frecuentes en las primeras horas matinales, debido al contraste térmico entre el aire superficial y el aire en niveles superiores, donde se origina un gradiente térmico vertical elevado que constituye una condición necesaria para el inicio de toda tormenta.

Además, las tormentas pueden tener lugar en virtud de efectos advectivos, donde debido a la advección (movimiento horizontal) del aire cálido junto al suelo, o de aire frío en altura, se puede producir un alto gradiente térmico vertical, favorable para la iniciación de una tormenta.

La convergencia del viento es otra causa de producción de tormentas de masa de aire, en donde la corriente ascensional presente en la zona de convergencia puede actuar como efecto disparador, esto genera el ascenso del aire que se encontraba o no en condiciones de inestabilidad, y como resultado se puede originar una nube tormentosa.

2.4.3.2. Tormentas Frontales

Las tormentas frontales constituyen otro caso de líneas de tormenta y se forman dentro de una masa de aire cálido, que se ve forzada a ascender por encima de un abrupto frente frío o línea de intersección de la superficie fría con el suelo.

Este tipo de tormentas pueden ocurrir en cualquier momento y estación, pero suelen ser más frecuentes e intensas en verano, y a última hora de la tarde, cuando el sobrecalentamiento produce o aumenta la inestabilidad, en dicho aire cálido por delante del frente frío móvil.

2.4.3.3. Tormentas de Línea de Turbonada

Estas tormentas son de tipo lineal y se desarrollan en el aire cálido a lo largo de una línea paralela a un frente frío y anterior al mismo.

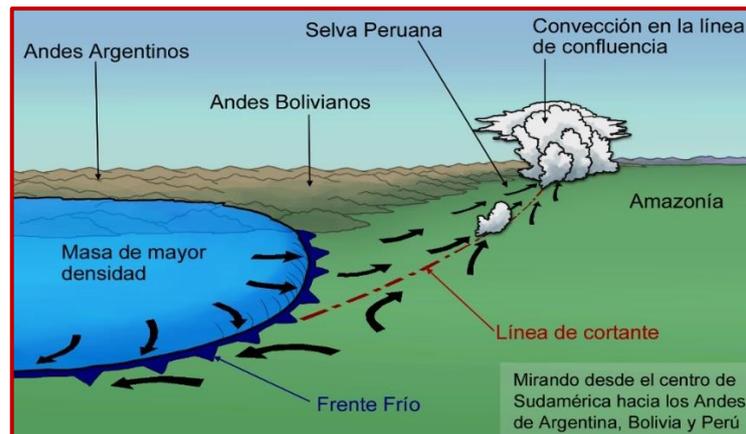


Figura 9. Línea de Turbonada/Cortante
FUENTE: NCEP (2016).

El ascenso del aire cálido inestable, por delante del frente que avanza, puede ser disparado por los propios efectos frontales; una vez que se ha originado, la línea de tormentas se desplaza, en la misma dirección que el frente, pero a mayor velocidad. Los vientos asociados con estas tormentas, por lo general exceden de las 60 millas por hora (27 metros por segundo) y producen daños considerables.

2.5 Niebla

La niebla es la suspensión en el aire de gotas de agua muy pequeñas o cristales de hielo que reducen la visibilidad horizontal a menos de 1000 m. A diferencia de la niebla, la neblina está constituida por la suspensión en el aire de gotas microscópicas de agua o partículas higroscópicas húmedas que reducen la visibilidad horizontal de 1000 a 5000 m, donde la humedad relativa es superior a 95 por ciento (OMM N° 782).

Además, una característica de este fenómeno es que puede cubrir un área extensa y continua o puede formarse parcialmente (PRFG) o en bancos (BCFG) donde llega a cubrir una parte o partes pequeñas de un aeródromo. Por otro lado, si la capa de niebla formada es inferior a 2 metros de espesor, esta es denominada niebla baja (MIFG).

2.5.1. Procesos formadores de Niebla

Para que se genere cualquier tipo de niebla o estratos bajos en la capa límite, la temperatura y el punto de rocío deben aproximarse. Esto puede ocurrir cuando aumenta el nivel de humedad en la capa límite o cuando la temperatura baja hasta alcanzar el estado de saturación.

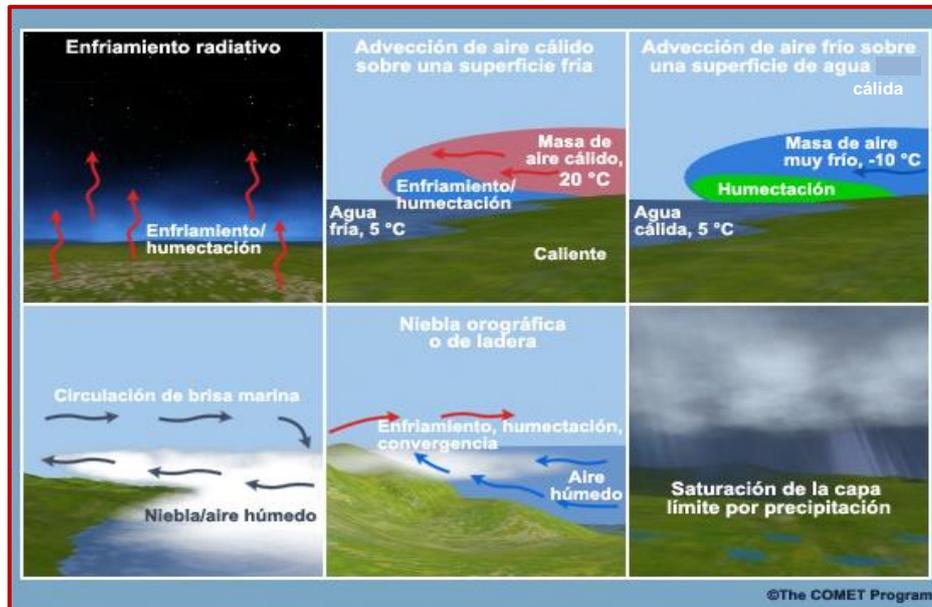


Figura 10. Mecanismos para la formación de niebla
FUENTE: COMET, 2006

De acuerdo a la figura 3, algunos de los mecanismos que favorecen la formación de niebla son los siguientes: Enfriamiento radiactivo, advección de aire cálido sobre una superficie fría, advección de aire frío sobre una superficie cálida, efectos de la circulación de brisa marina en la formación de niebla, ascenso orográfico y saturación de la capa límite mediante la precipitación.

En resumen, los procesos presentados en la figura se basan en las siguientes condiciones favorables para la formación de niebla o estratos:

- 1) Enfriamiento y/o humectación de la capa límite inferior.
- 2) Desarrollo de una inversión, un aspecto importante que contribuye a atrapar la humedad. Por ejemplo, el enfriamiento radiactivo que se produce durante la noche puede humedecer la capa límite inferior y dar lugar a la formación de algún tipo de niebla.

Sin una inversión que atrape la humedad, las capas atmosféricas justo arriba de esa capa húmeda se mezclarían y la absorción de aire más seco causaría la disipación de la niebla o estratos que se hubieran desarrollado. En otras palabras, para que se desarrolle un episodio

de niebla o estratos algún mecanismo debe provocar el desacoplamiento de la capa límite de la atmósfera arriba de ella.

2.5.2. Niebla por Radiación y Advección

La niebla puede clasificarse según su proceso de formación, ya sea por proceso de advección o enfriamiento radiativo. A partir de la figura 4, se puede apreciar las diferencias en los procesos de formación y desarrollo de las nieblas de radiación y advección, donde en el caso de la niebla de radiación, los procesos radiativos dominan la situación, mientras que niebla de advección se observa que el transporte de masa a gran escala es el que domina la situación y además se tiene la influencia del relieve topográfico. Sin embargo, en ambos tipos de niebla la mayor intensidad se produce sobre superficies de agua, que constituye una fuente de humedad.



Figura 11. Procesos asociados a la formación de niebla por radiación y advección
FUENTE: COMET, 2006

III. DESARROLLO DEL TRABAJO

3.1. Área de estudio

La unidad de análisis es el aeropuerto de Iquitos, cuya ubicación está dada por las siguientes coordenadas: Latitud $03^{\circ}47'05.06''$ S y Longitud $73^{\circ}18'31.70''$ O y se encuentra en la selva peruana, la cual se localiza en el interior de la cuenca amazónica, caracterizada por sus valores altos de temperatura y abundantes precipitaciones. Si bien las precipitaciones se presentan durante todo el año, estas ocurren con mayor frecuencia e intensidad en los meses de verano (diciembre – marzo).

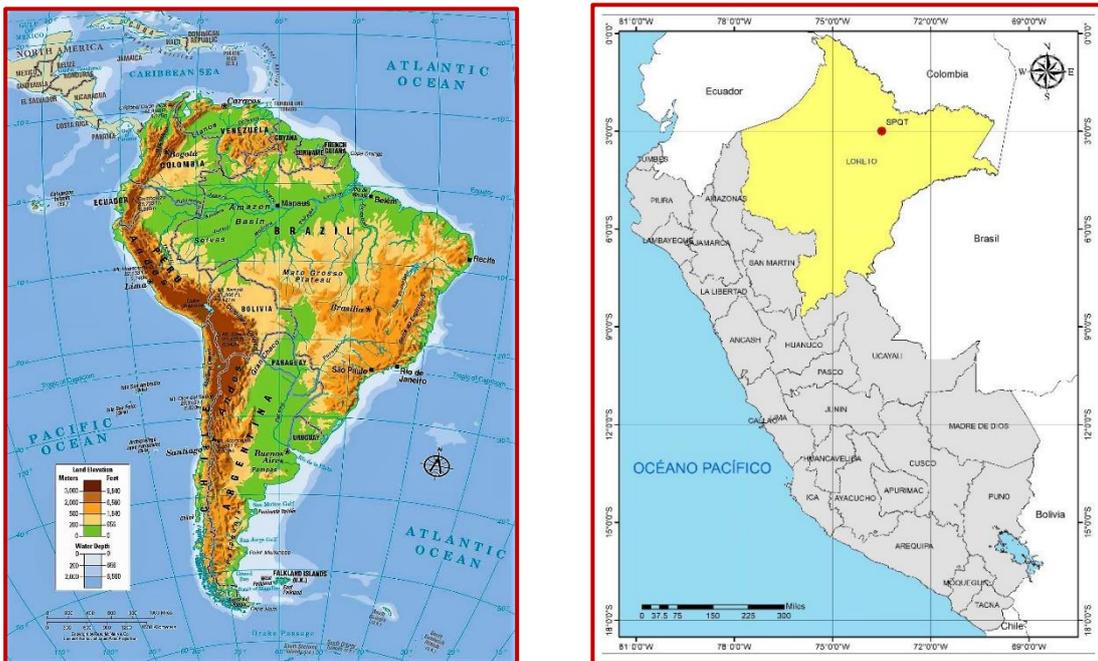


Figura 12. Área de estudio

3.2. Metodología

La elaboración de una metodología para el pronóstico de aeródromo (TAF) con énfasis la ocurrencia de fenómenos meteorológicos como tormentas y niebla en el aeropuerto de Iquitos surge como una necesidad de mejorar el servicio brindado por la oficina meteorológica de aeródromo (OMA) en relación al pronóstico de estos fenómenos que causan y han causado impactos significativos en la aviación. Debido a ello, es que se vio

conveniente determinar una metodología para el pronóstico de estos fenómenos meteorológicos en el TAF. En el proceso de desarrollo de la metodología, se realizaron los pasos a continuación.

3.2.1. Determinación de la frecuencia de ocurrencia de eventos de tormenta y niebla en el aeropuerto de Iquitos.

Para cumplir con este primer paso, a partir de la información proveniente de los reportes METAR del periodo 2005 – 2021 se desarrollaron figuras donde se presentan resúmenes de la frecuencia de ocurrencia de estos fenómenos a nivel mensual en el cual se identificó los meses con mayor presencia de eventos de tormenta y niebla acontecidos en el aeropuerto de Iquitos.

3.2.2. Identificación de las principales variables meteorológicas que favorecen la ocurrencia de tormentas y niebla en el aeropuerto de Iquitos.

El siguiente paso consistió en la identificación y determinación de las principales variables atmosféricas de superficie que favorecen la ocurrencia de tormentas y niebla en el aeropuerto de Iquitos. Para ello, basado en la revisión de literatura pertinente y a partir de los datos registrados en los reportes METAR se realizó un análisis temporal horario de las variables registradas, como viento, visibilidad, temperatura del aire, temperatura rocío, entre otras, durante los eventos de tormenta y niebla acontecidos en el aeropuerto de Iquitos.

A partir del análisis temporal se determinó cómo es que estas variables meteorológicas varían ante la presencia de estos fenómenos en el aeropuerto de Iquitos. El periodo que se consideró para el análisis comprendió las horas previas, las mismas horas y horas posteriores a la ocurrencia de los fenómenos en el aeródromo.

3.2.3. Identificación de las condiciones atmosféricas que favorecen la ocurrencia de eventos de tormenta y niebla en el aeropuerto de Iquitos.

A partir de los ítems 3.2.1 y 3.2.2, se seleccionaron un evento de tormenta y un evento de niebla que ocurrieron en el aeropuerto de Iquitos. Luego, para el análisis de las condiciones atmosféricas en escala sinóptica se utilizó información proveniente del modelo global GFS (NCEP) con una resolución de 0.25° , donde se generarán gráficas de las variables atmosféricas para el análisis en baja, media y alta tropósfera.

Las variables que se consideraron en el análisis atmosférico en niveles bajos, medios y altos de la tropósfera con la finalidad de determinar las condiciones que desarrollaron el evento de tormenta seleccionado fueron las siguientes:

- Flujo promedio (850 – 200 hPa) para evaluar el movimiento de las nubes de desarrollo vertical (Cb).
- Humedad relativa promedio en las capas de 850 – 500 hPa y 850 – 200 hPa, con el fin de determinar la saturación de la columna (nubes).
- Campos de viento (vector viento y líneas de corriente), para identificar zonas de confluencia y difluencia del viento en diferentes niveles.
- Temperatura potencial equivalente, esta variable permitirá determinar la condición térmica asociada al evento.
- Divergencia en bajos niveles (925 – 850 hPa) y en altura (250 – 200 hPa), para evaluar convergencia de humedad y ventilación en niveles altos.
- Agua precipitable o Relación de mezcla para evaluar la disponibilidad y el contenido de humedad.
- Omega (ω) (m/s) para describir los movimientos verticales en la atmósfera.
- Índice de Estabilidad de Gálvez – Davidson (GDI) con el objeto de evaluar la convección en la zona tropical.

Por otro lado, para el caso del evento de niebla se consideraron las siguientes variables:

- Humedad relativa y vientos en bajos niveles (1000 – 850 hPa), para evaluar saturación en capas bajas.
- Relación de mezcla (g/kg) y viento en la capa límite planetaria, para evaluar contenido de humedad.
- Omega (ω) (m/s) para describir los movimientos verticales en la atmósfera.
- Índice de Estabilidad de Gálvez – Davidson (GDI) con el fin de evaluar la estabilidad durante la ocurrencia de la niebla.
- Campos de viento (vector viento y líneas de corriente), para identificar zonas de confluencia y difluencia del viento en diferentes niveles.

- Divergencia en bajos niveles (925 – 850 hPa) y en altura (250 – 200 hPa), para evaluar subsidencia en la zona de ocurrencia del evento.

Las imágenes de satélite serán usadas con la finalidad de evaluar la distribución temporal y espacial de la nubosidad y convección para el caso del evento de tormenta, así como para evaluar la advección de nubosidad en el caso del evento de niebla que son materia del presente estudio.

3.2.4. Determinación de la metodología para la elaboración del pronóstico terminal de aeródromo (TAF) y la ocurrencia de tormentas y niebla en el aeropuerto de Iquitos.

Para cumplir con este último paso, basado en la RAP 303 vigente y con ayuda del manual de procedimientos vigente a través de un esquema se resumirá los procedimientos realizados y las herramientas utilizadas por el pronosticador de la OMA Iquitos para la elaboración del pronóstico terminal de aeródromo (TAF) y la ocurrencia de tormentas y niebla.

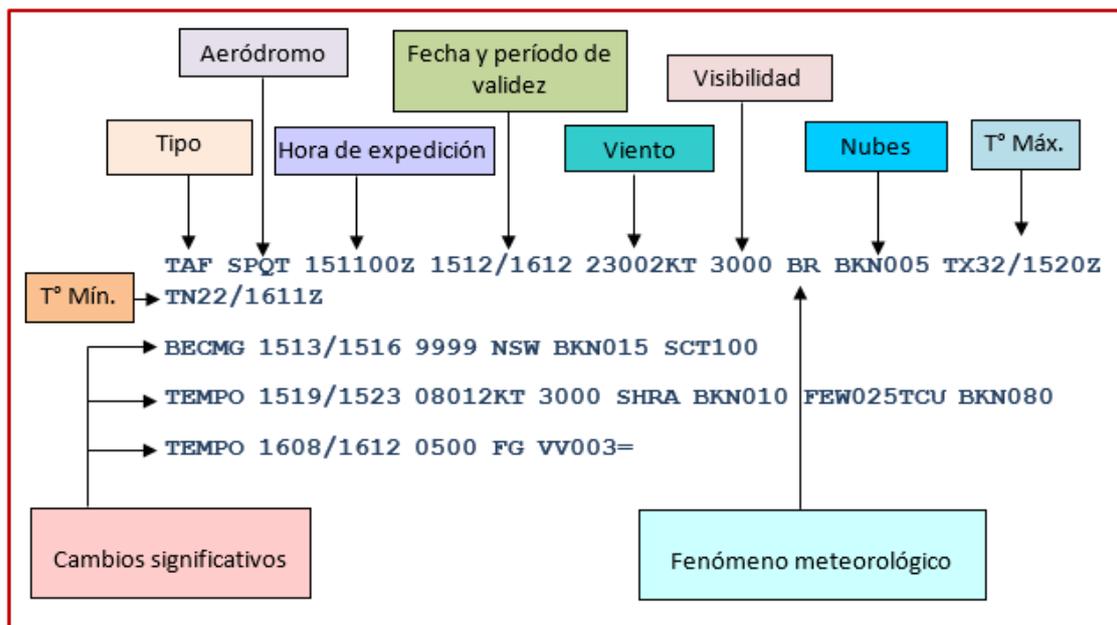


Figura 13. Contenido de un pronóstico terminal de aeródromo (TAF)

En la figura 13, se presenta el contenido de un pronóstico terminal de aeródromo (TAF), donde se presenta cada uno de sus elementos conformantes, cabe resaltar que la hora indicada es en UTC.

a) Competencias y habilidades adquiridas durante el proceso de formación: Durante el proceso de desarrollo de la metodología para la elaboración del pronóstico terminal de aeródromo (TAF) con énfasis en la ocurrencia de tormentas y niebla en el aeropuerto de Iquitos se aplicaron las competencias y habilidades asociadas a la elaboración de pronósticos

meteorológicos de corto plazo (herramientas y técnicas de pronóstico del tiempo, dinámica y termodinámica de los sistemas atmosféricos, meteorología sinóptica y climatología), y el análisis de datos meteorológicos, tanto de estaciones meteorológicas como de modelos numéricos (datos grillados), así como la organización de actividades, la capacidad de realización de las mismas y la coordinación con los respectivos colaboradores, debido a que el presente trabajo contiene el aporte de profesionales que han contribuido con su experiencia para el desarrollo del mismo.

b) La contribución en la solución de problemas durante la experiencia profesional:

Uno de los principales problemas que a menudo se presenta en los aeropuertos a nivel mundial y nacional es la presencia de fenómenos meteorológicos que afectan de manera significativa las operaciones aéreas generando pérdidas económicas y humanas.

Dentro de estos fenómenos tenemos a las tormentas eléctricas y niebla, y con la finalidad de tener un mejor entendimiento de estos fenómenos es que surge la iniciativa de la Oficina Meteorológica de Aeródromo de Iquitos (OMA Iquitos), en la cual me desempeño laboralmente, de desarrollar una metodología basada en la evaluación y análisis de las variables y condiciones atmosféricas que contribuyen a la formación y desarrollo de estos fenómenos en el aeropuerto de Iquitos con el objeto de generar una herramienta operativa de mayor precisión que nos permita mejorar en su pronóstico y a su vez garantizar la seguridad de las operaciones en el aeropuerto de Iquitos.

c) Beneficio obtenido por el centro laboral de su contribución a la solución de problemas: Por medio del presente trabajo se ha desarrollado una metodología para la elaboración el pronóstico terminal de aeródromo (TAF) con énfasis en la ocurrencia de eventos de tormentas y niebla en el aeropuerto de Iquitos.

A la vez, los resultados del presente trabajo de suficiencia profesional serán para el pronosticador una herramienta de análisis para que este pueda desempeñar sus funciones eficientemente, siendo una de estas el pronóstico de fenómenos meteorológicos que afecten las operaciones aéreas como lo son las tormentas eléctricas y la niebla en el aeropuerto de Iquitos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en base a los objetivos planteados para el desarrollo del presente TSP son los siguientes:

4.1. Frecuencia de ocurrencia de eventos de tormenta y de niebla en el aeropuerto de Iquitos durante el periodo de 2005 – 2021.

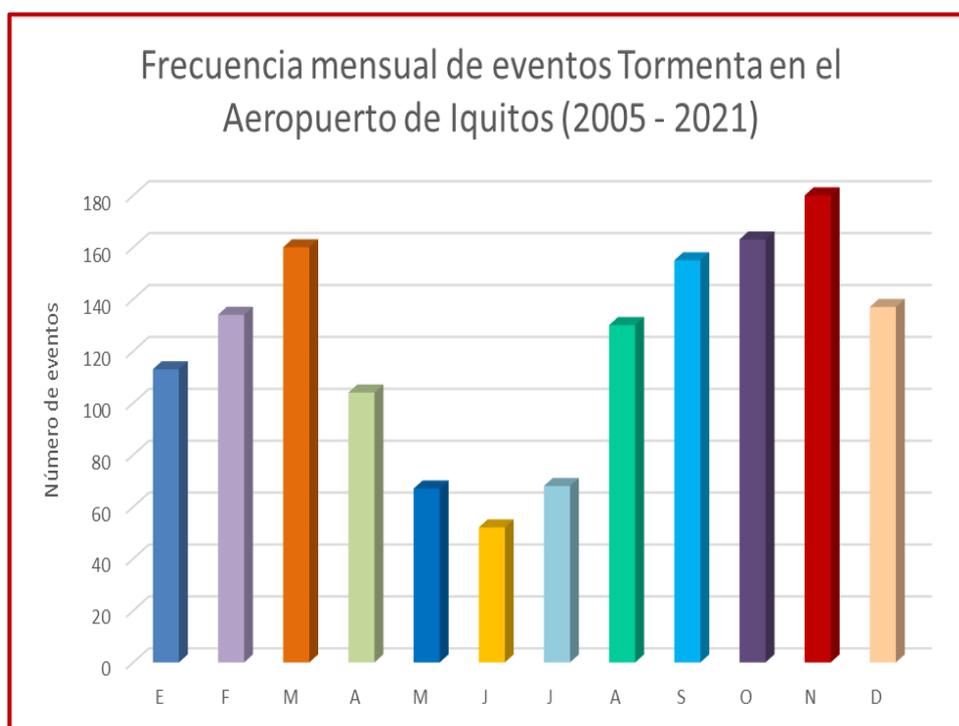


Figura 14. Frecuencia mensual de eventos Tormenta (2005 – 2021)

De acuerdo a la figura 14, en la que se muestra la frecuencia mensual de eventos de tormentas acontecidos en el aeropuerto de Iquitos se puede observar que, a lo largo del año la mayor cantidad de eventos de tormenta acontecen en los meses de transición (marzo, septiembre, octubre y noviembre) y esto coincide con un estudio realizado por Anselmo (2014), donde menciona que en su mayoría las tormentas se desarrollan en los meses de transición de la época seca a la época húmeda en la región amazónica.

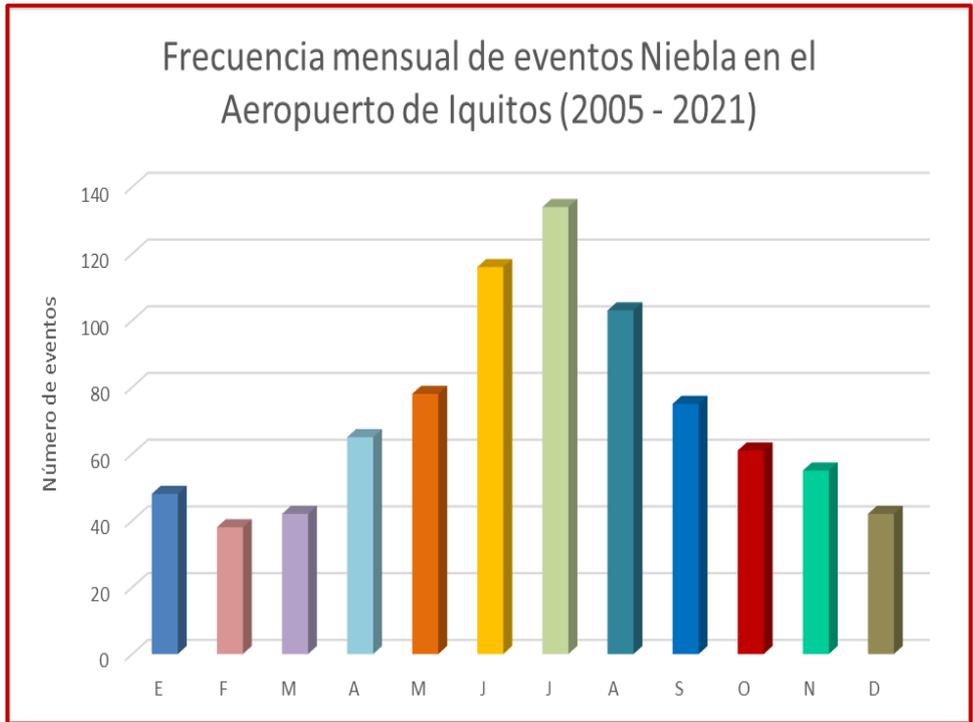


Figura 15. Frecuencia mensual de eventos Niebla (2005 – 2021)

Por otro lado, a diferencia de los eventos de tormenta y de acuerdo a la figura 15, se puede apreciar que los eventos de niebla en su mayoría acontecen en los meses de mayo, junio, julio y agosto, los cuales se encuentran dentro de la época seca en la región; y está asociada en su mayoría a la presencia de cielos despejados y vientos calmos, donde a la vez coincide con la ausencia de la zona de convergencia intertropical sobre la región, que se encuentra en su posición más al norte a diferencia de la época de lluvias.

4.2. variables meteorológicas que favorecen la ocurrencia de tormentas y niebla en el aeropuerto de Iquitos.

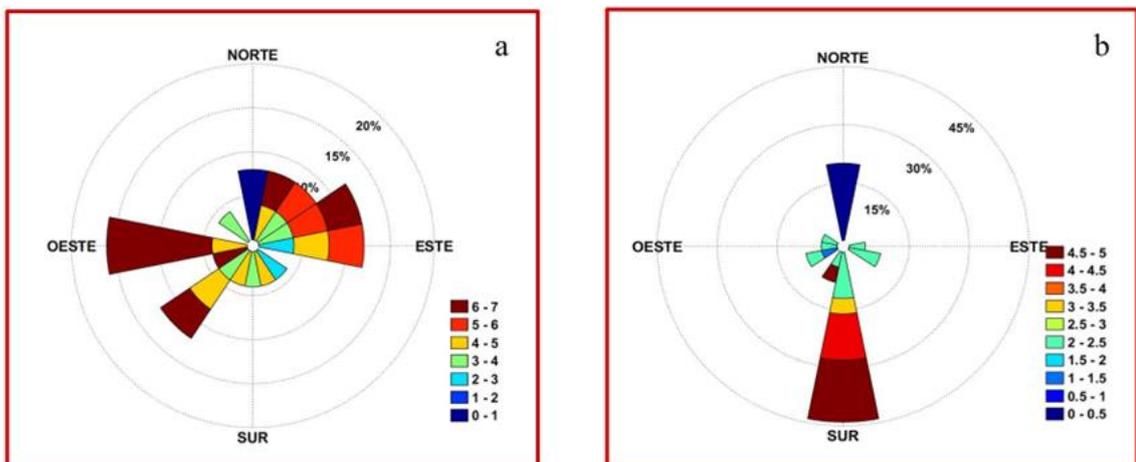


Figura 16. Rosa de vientos evento tormenta (a) y evento de niebla (b)

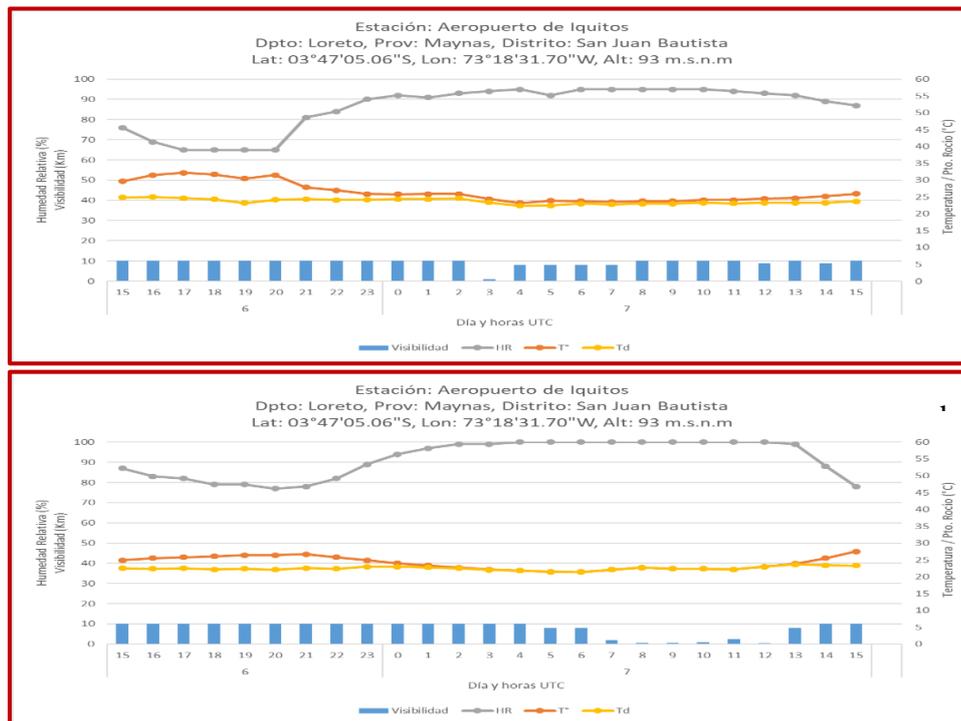


Figura 17. Gráfica de variación temporal horaria de humedad relativa (%), visibilidad (metros), (a) temperatura y temperatura de rocío (°C) evento tormenta y (b) evento de niebla

En lo que a la figura 16 se refiere, se puede observar como para ambos fenómenos (tormenta y niebla), se da una determinada hora en la que la presencia de estos fenómenos hace que el aeropuerto se encuentre bajo mínimos operacionales para el caso de la niebla. Por otro lado, se puede ver la evolución de estas variables a lo largo del desarrollo de estos fenómenos, lo cual constituye una herramienta importante para futuras evaluaciones y pronóstico de estos fenómenos.

Además, es preciso resaltar que dentro de las variables más asociadas al desarrollo de estos fenómenos tenemos a la humedad relativa, temperatura del aire y temperatura de rocío, que como se ve en la figura 17, son aquellas que manifiestan un cambio significativo durante la evolución del fenómeno.

En el caso de los vientos, se puede apreciar que en la figura 16 asociada a la presencia del evento de tormenta estos en su mayoría provienen del cuadrante oeste con intensidades entre los 6 a 7 nudos. Por otro lado, se tiene que para el caso del evento de niebla (figura 16b) el viento predominante proviene del cuadrante sur, con intensidades que oscilan desde los 2 hasta los 5 nudos.

4.3. Condiciones atmosféricas que favorecen la ocurrencia de eventos de tormenta y niebla en el aeropuerto de Iquitos.

A continuación, se realiza el análisis de las gráficas de variables atmosféricas correspondientes a un evento de tormenta y un evento de niebla acontecido en el aeropuerto de Iquitos.

4.3.1. Evento de Tormenta (10 marzo 2019)

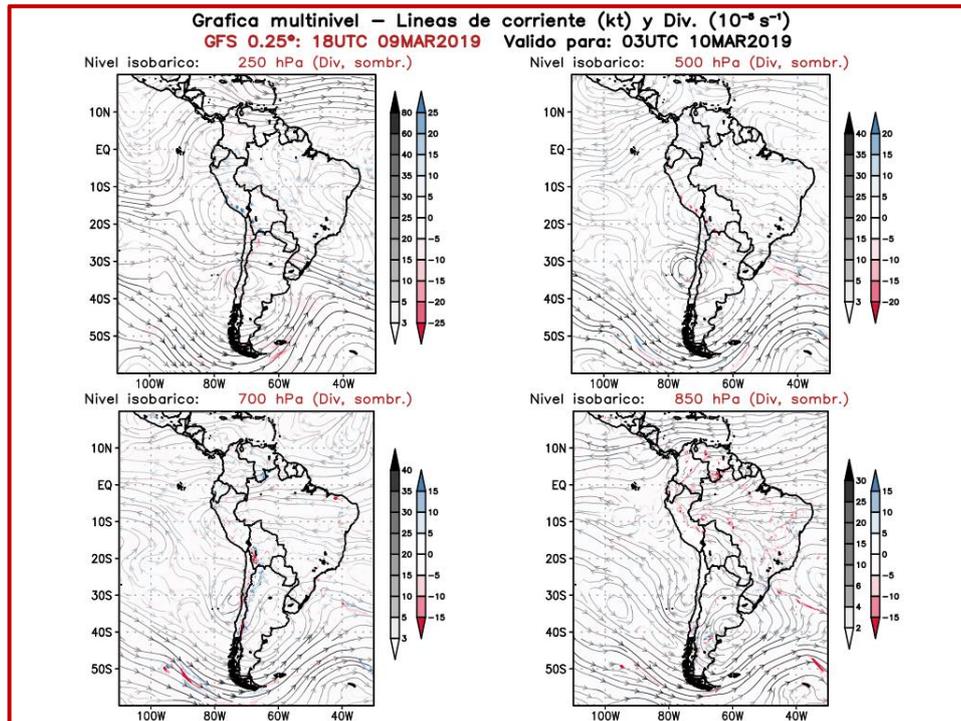


Figura 18. Líneas de Corriente y Divergencia para los niveles de 850, 700, 500 y 250 hPa

En la figura 18, a nivel de 850 hPa se puede observar una convergencia del viento proveniente del este en forma de onda. En el nivel de 700 hPa, se observa vientos provenientes del este, que pueden estar asociados a ingreso de masa de aire húmeda. En niveles altos (500 – 250 hPa), se puede apreciar un sistema con giro antihorario con núcleo sobre los $58^{\circ} W$ y $20^{\circ} S$ a nivel de continente generando vientos del este sobre la región.

Para el segundo dominio (figura 19), se puede apreciar a nivel de 850 hPa una onda proveniente del este asociado a una línea de inestabilidad y zonas con valores de divergencia negativos, lo cual indica convergencia del viento. Por otro lado, a nivel de 250 hPa se puede observar zonas de divergencia con valores positivos asociados a una ventilación en niveles superiores.

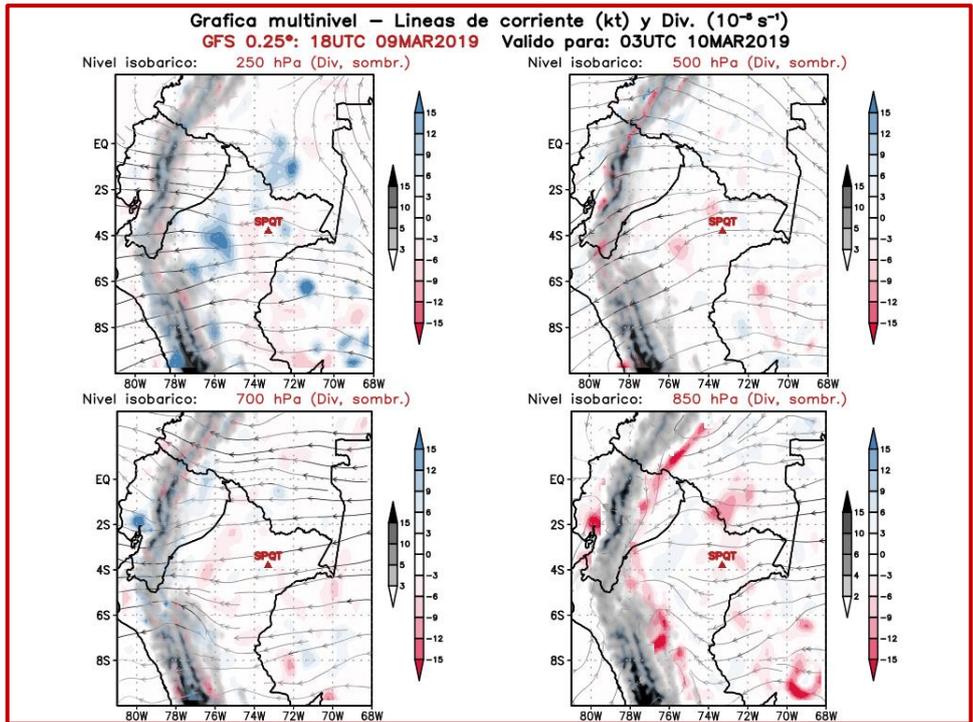


Figura 19. Líneas de Corriente y Divergencia para los niveles de 850, 700, 500 y 250 hPa.

En la figura 20, se puede ver sobre la región este del Perú valores de humedad relativa que fluctúan entre 85 – 90% en las capas de 850 – 200 hPa, lo cual es un indicador de una atmósfera casi saturada con un contenido de agua precipitable sobre los 55 mm.

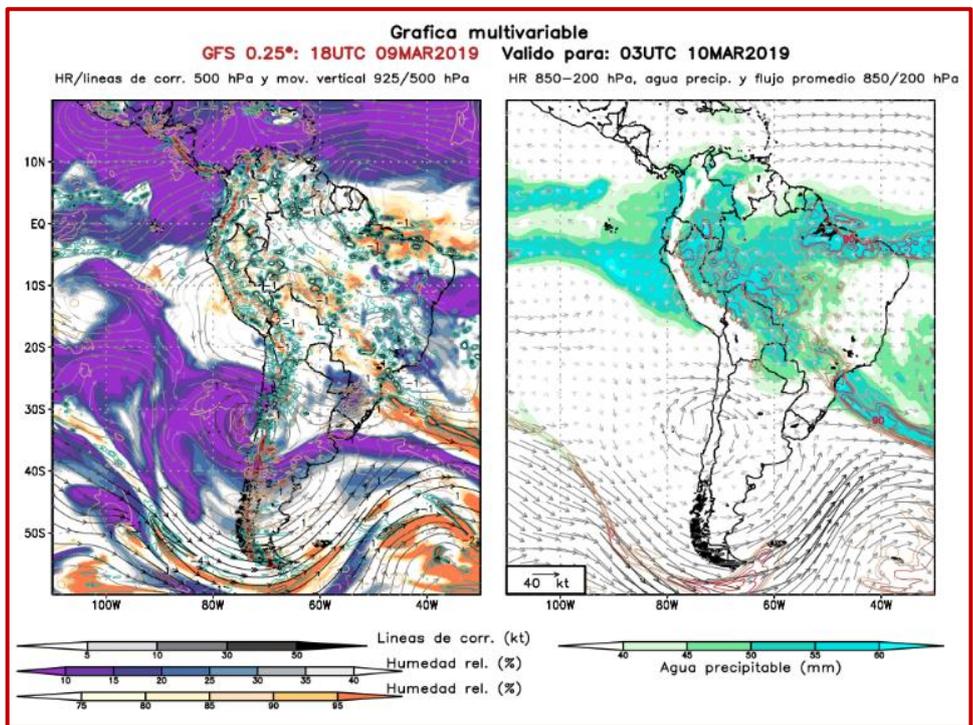


Figura 20. Humedad relativa y líneas de corriente 500 hPa, movimiento vertical, agua precipitable y humedad relativa – flujo promedio capa 850 – 200 hPa

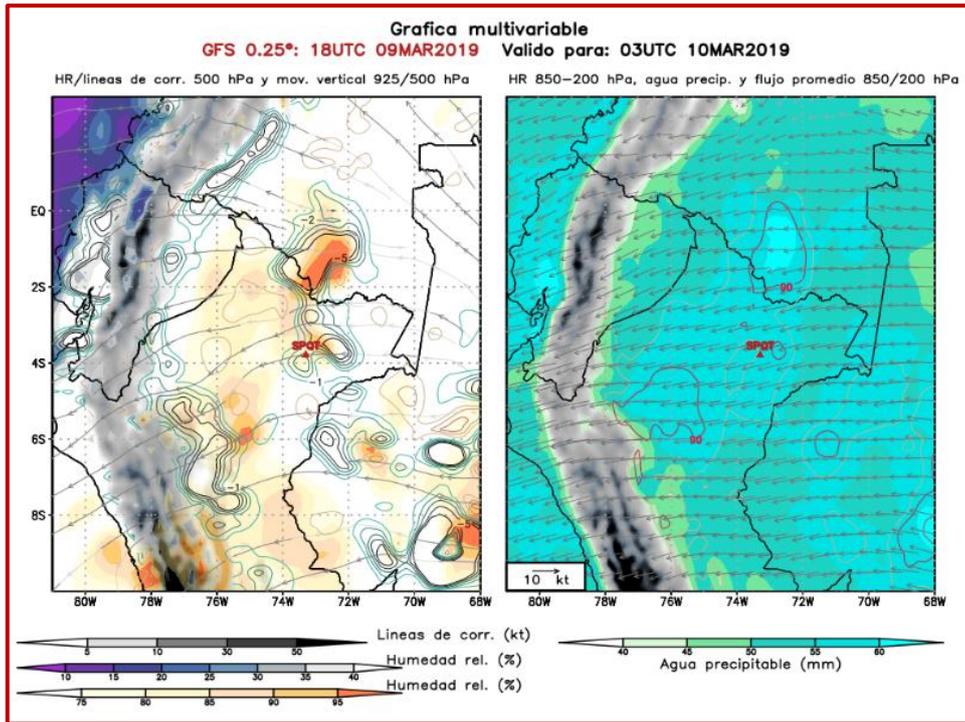


Figura 21. Humedad relativa y líneas de corriente 500 hPa, movimiento vertical, agua precipitable y humedad relativa – flujo promedio capa 850 – 200 hPa

Además, se puede apreciar un pequeño núcleo con movimiento vertical, lo cual coincide con la onda asociada a una línea de inestabilidad proveniente del este; este núcleo es más notorio en la figura 21, donde se puede observar el núcleo al norte del aeropuerto de Iquitos y un flujo de viento proveniente del este.

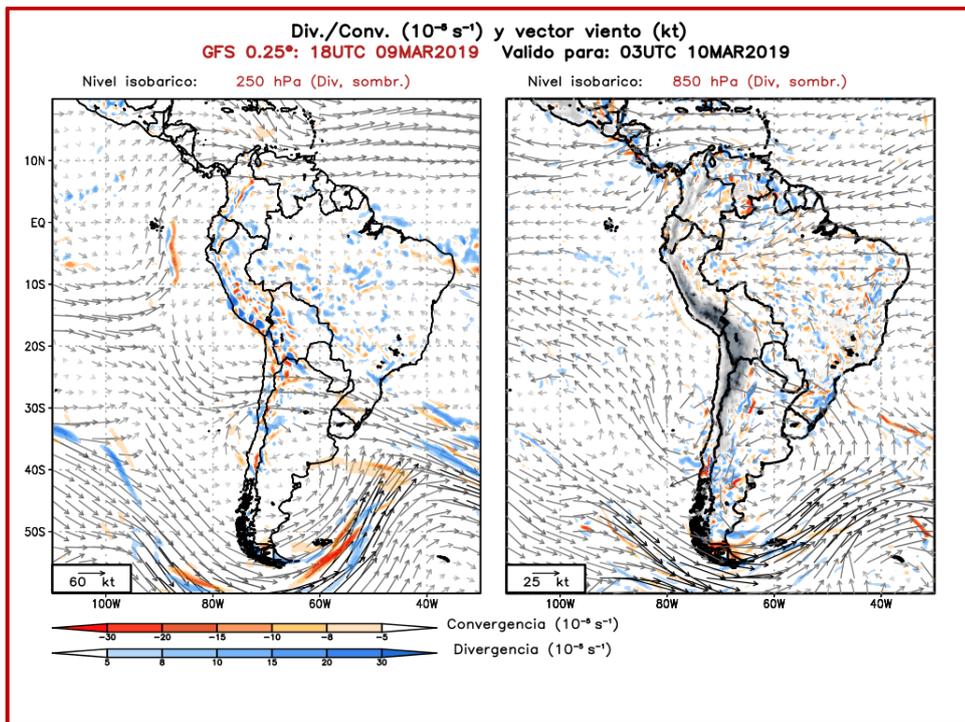


Figura 22. Divergencia y vector viento en niveles de 850 y 200 hPa

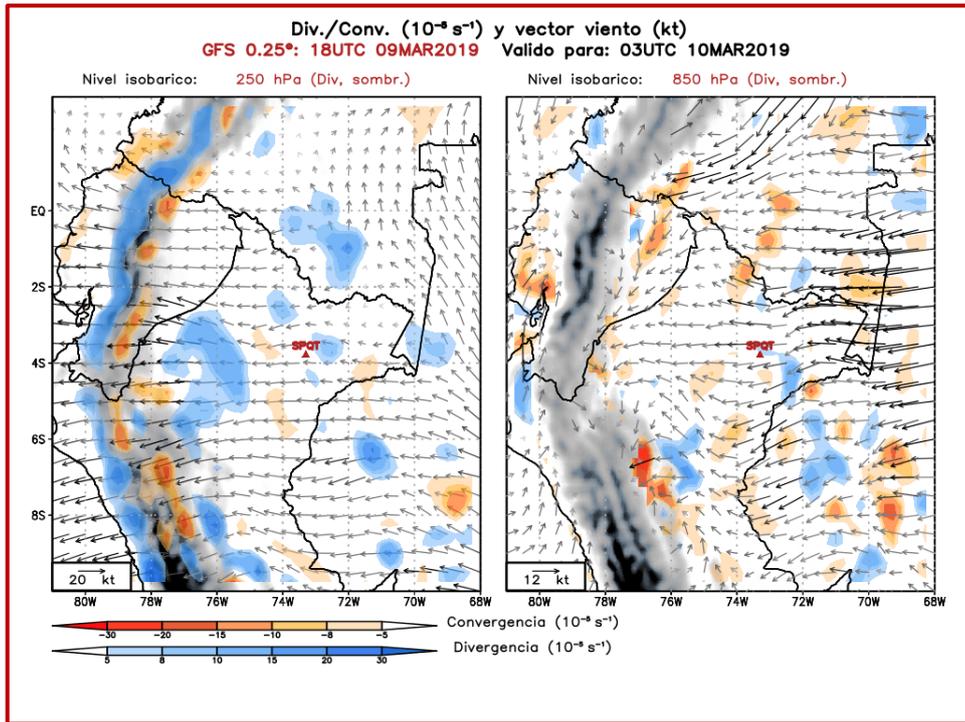


Figura 23. Divergencia y vector viento en niveles de 850 y 200 hPa

Tanto en la figura 22 como en la figura 23, se puede apreciar convergencia en niveles bajos (850 hPa) en ambos dominios, lo cual como se mencionó anteriormente está asociado a una línea de inestabilidad proveniente del este. Por otro lado, a nivel de 200 hPa se observa una zona de divergencia sobre la región de estudio en ambos dominios.

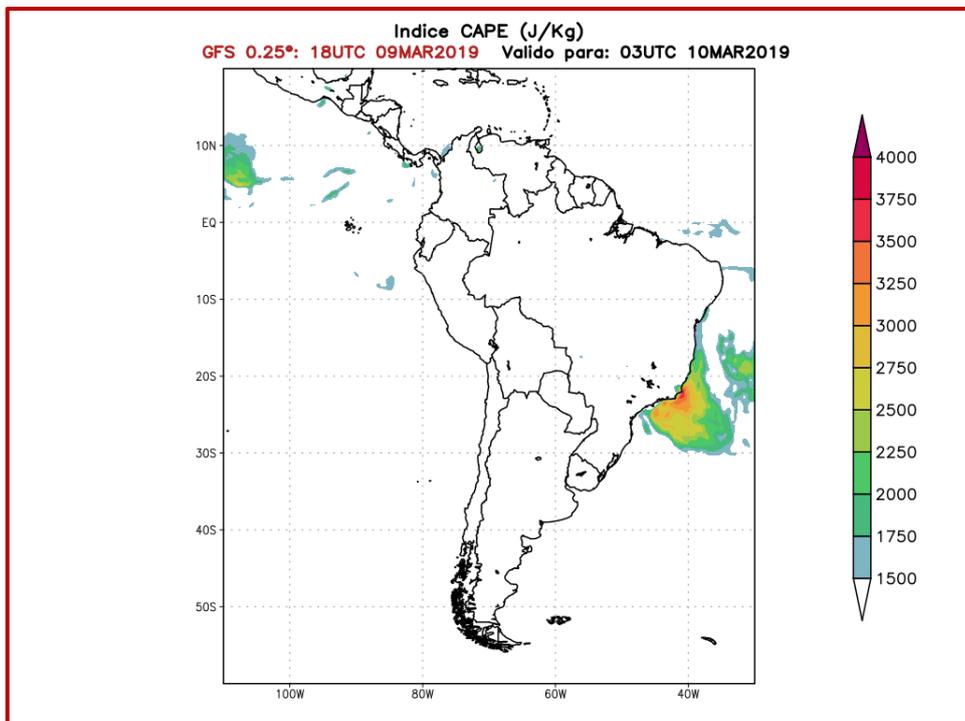


Figura 24. Índice CAPE

En la Figura 24 podemos apreciar valores de CAPE inferiores a los 1500 J/kg sobre la región de Iquitos. Si bien en promedio un CAPE de 1000 J/kg suele ser suficiente para el desarrollo de tormentas fuertes y severas, esta variable no debe ser usada de manera exclusiva y deben considerarse otros parámetros atmosféricos para el pronóstico de convección sobre la región.

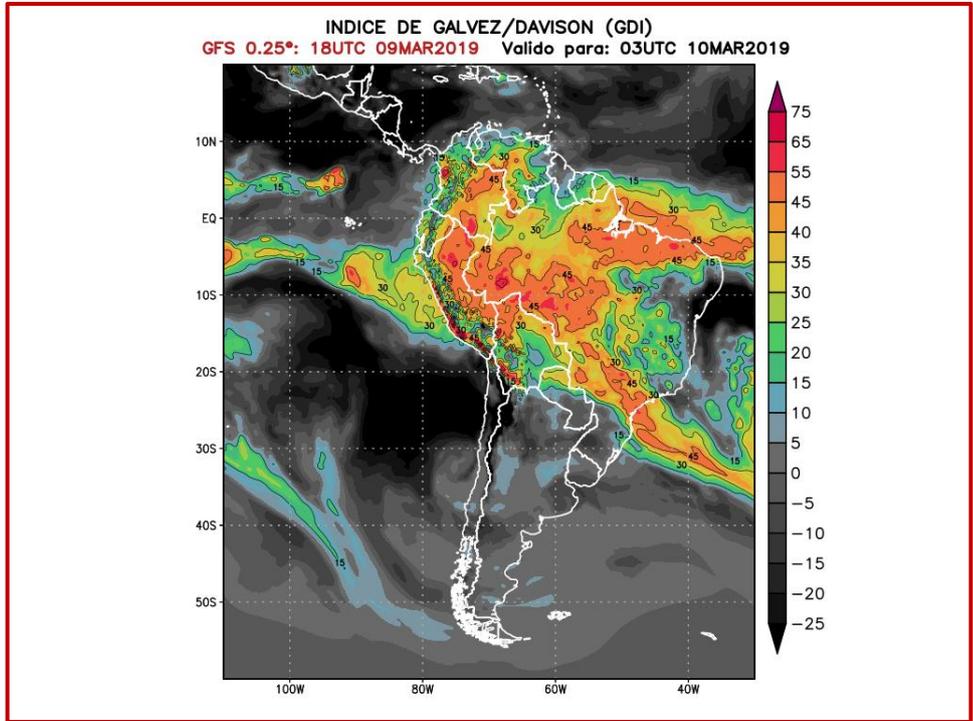


Figura 25. Índice de Galvez/Davison (GDI)

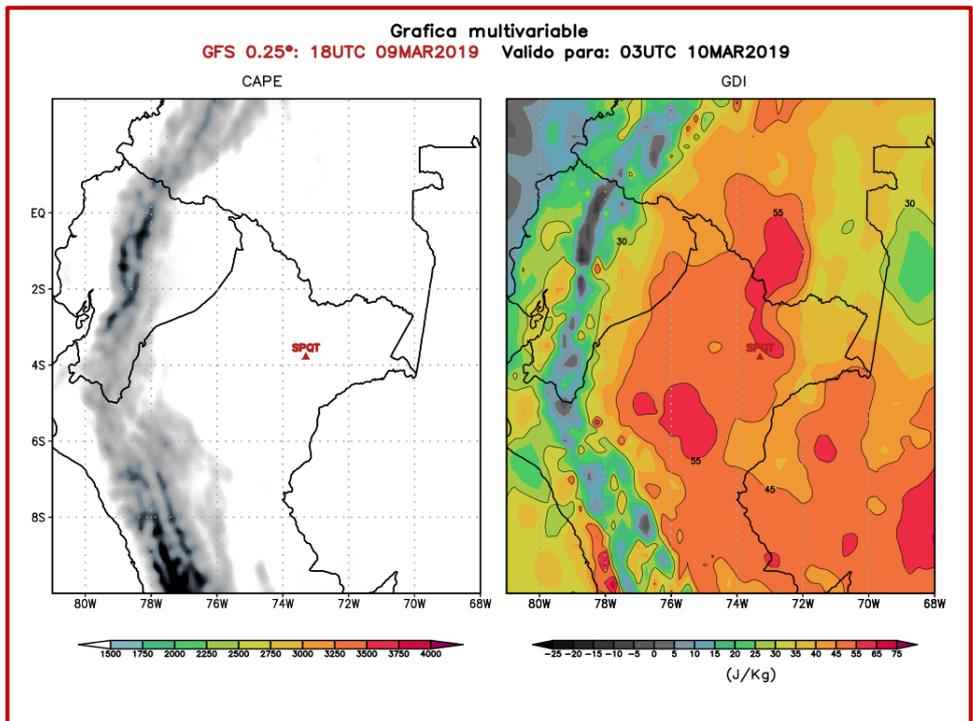


Figura 26. Gráfica Multivariable - CAPE y GDI

En la figura 25 se puede visualizar el GDI, donde para la hora de ocurrencia del evento este presenta valores entre 45 a 55 lo cual está asociado a la convección profunda sobre la zona de estudio. Además, por medio de la figura 26 se puede ver como el GDI a diferencia del CAPE es un mejor indicador de la inestabilidad en la región.

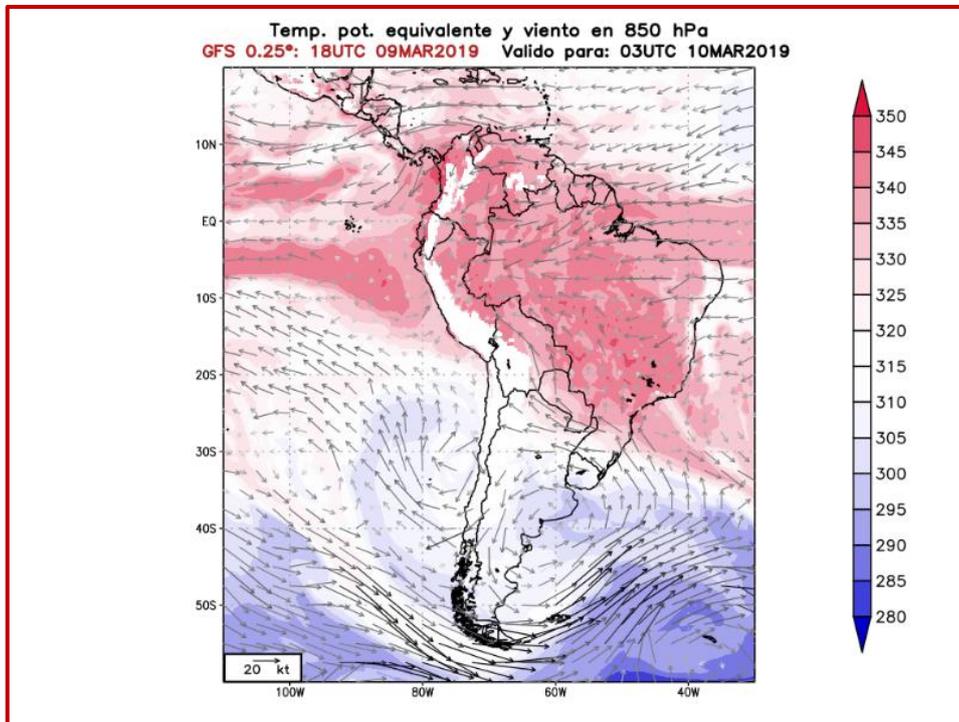


Figura 27. Temperatura potencial equivalente y viento en 850 hPa

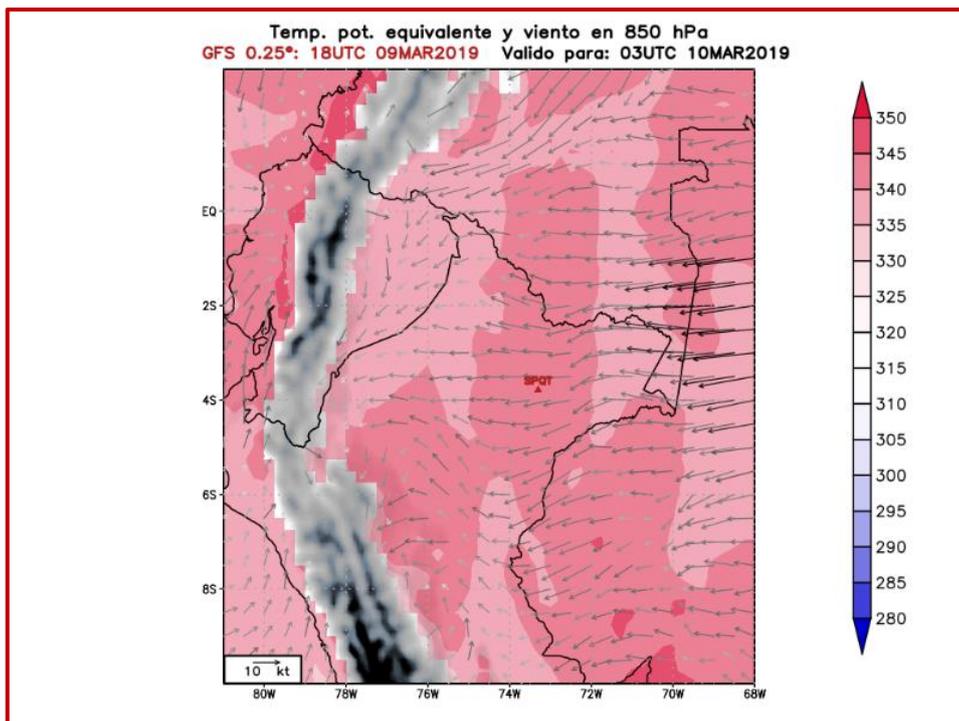


Figura 28. Temperatura potencial equivalente y viento en 850 hPa

A partir de la figura 27 y la figura 28, se puede apreciar el ingreso de una masa de aire de baja densidad proveniente del este, y esta se caracteriza por ser cálida y húmeda. Además, por medio del flujo en 850 hPa se puede observar una zona de confluencia sobre la región este de la Amazonía.

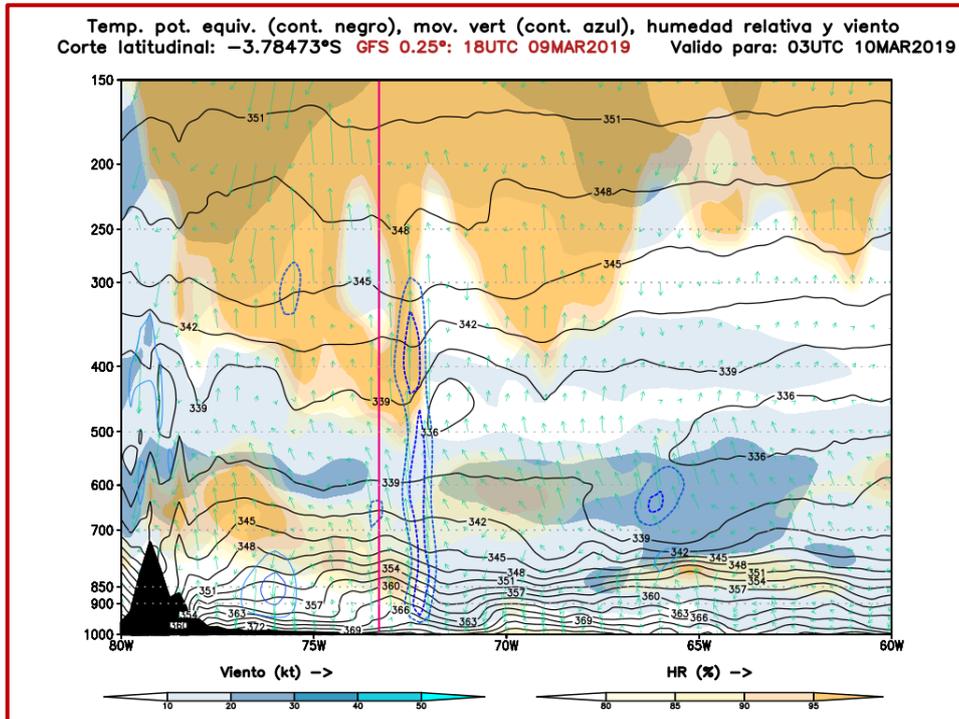


Figura 29. Corte transversal temperatura potencial equivalente, movimiento vertical, humedad relativa y viento

En la figura 29, se puede apreciar una disminución de la temperatura potencial equivalente con la altura el cual es un indicador de inestabilidad en la región. Además, en capas medias se puede apreciar valores humedad relativa cercanas a la saturación y un movimiento vertical considerable a lo largo de los diferentes niveles de presión.

En la figura 30, se tiene una serie de tiempo en la que se han considerado las variables temperatura del aire, temperatura de rocío y humedad relativa cuyo inicio va desde las 18 UTC del día 09 de marzo del 2019, donde se puede visualizar como a partir de las 00 UTC del 10 de marzo la atmosfera comienza a saturarse y esto se evidencia en la figura por medio del aumento de la humedad relativa y la cercanía en los valores de temperatura del aire y temperatura de rocío.

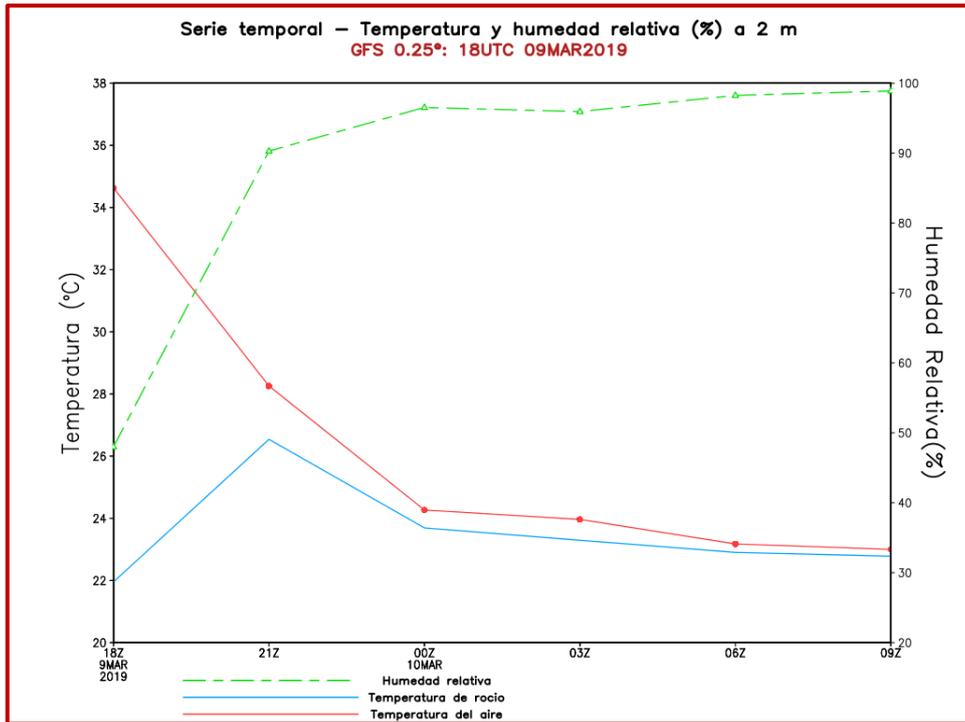


Figura 30. Serie de tiempo evento de tormenta 10/03/2019

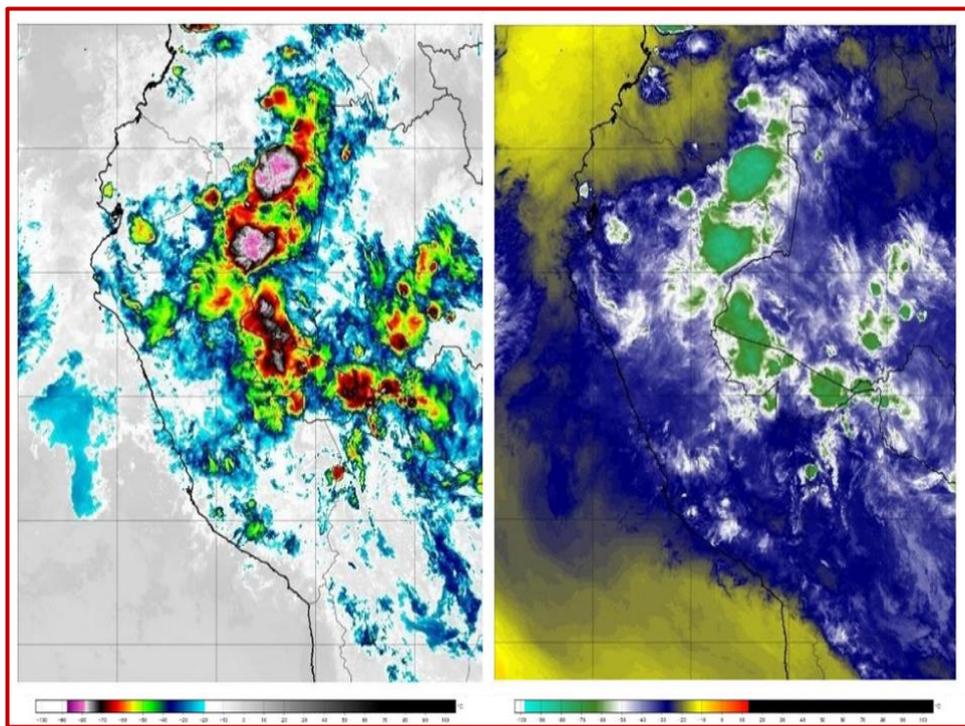


Figura 31. Imágenes de Satélite Goes 16 evento tormenta. (a) Canal 16 – 13.30 microns y (b) Canal 09 – 06.90 microns

4.3.2. Evento de niebla (07 de mayo 2022)

Por último, en la figura 31 se puede apreciar el ingreso de una onda asociada a una línea de inestabilidad, lo cual refleja lo que se manifestó en las figuras precedentes. A la vez se puede observar que las temperaturas de los topes de nubes están por debajo de los -70°C , y esto es

indicador de la presencia de núcleos convectivos asociados a la presencia y desarrollo de tormentas en la región amazónica.

A partir de la figura 32 se podrá apreciar flujos del sureste a nivel de 850 hPa y flujos del este en 700 hPa. Sin embargo, en la figura 41, correspondiente a las imágenes de satélite se puede visualizar un debilitamiento del núcleo proveniente del este, esto es consecuente con lo observado en niveles altos (500 – 250 hPa) en las figuras 32, 33 y 34, donde se puede observar a grosso modo convergencia en dichos niveles y no existe movimiento vertical sobre la zona de estudio. Además, el flujo proveniente del sureste acarrea masa de aire fría y seca la cual actúa como inhibidora de la convección en la región. Esto se puede observar mejor en la figura 36 y 37, donde se observa condiciones de estabilidad sobre la región.

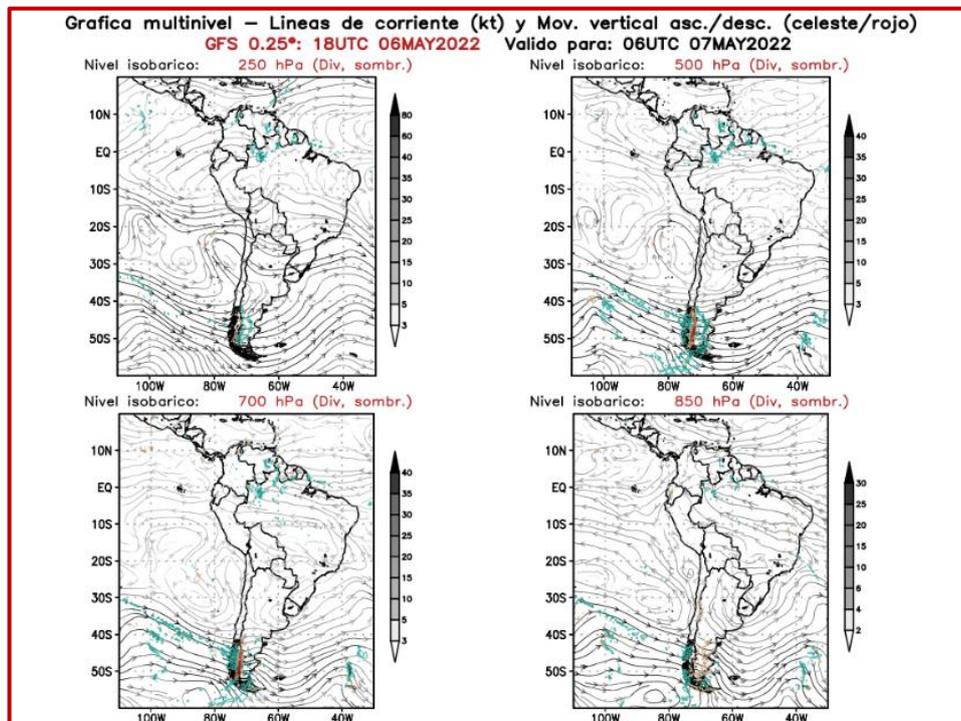


Figura 32. Líneas de corriente y movimiento vertical para los niveles de 850, 700, 500 y 250 hPa.

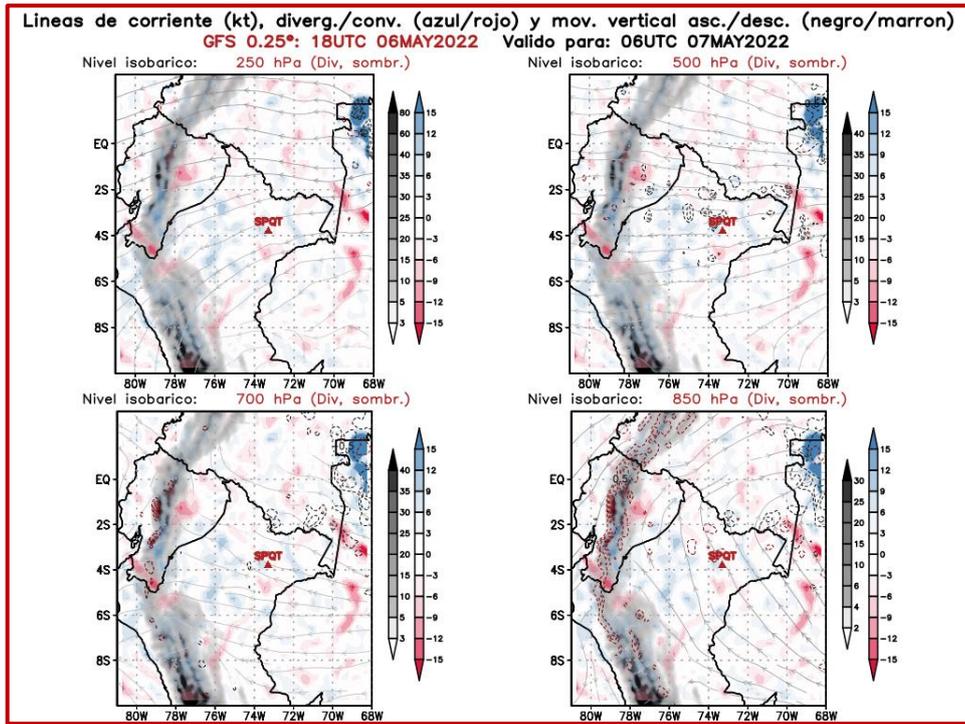


Figura 33. Líneas de corriente y movimiento vertical para los niveles de 850, 700, 500 y 250 hPa

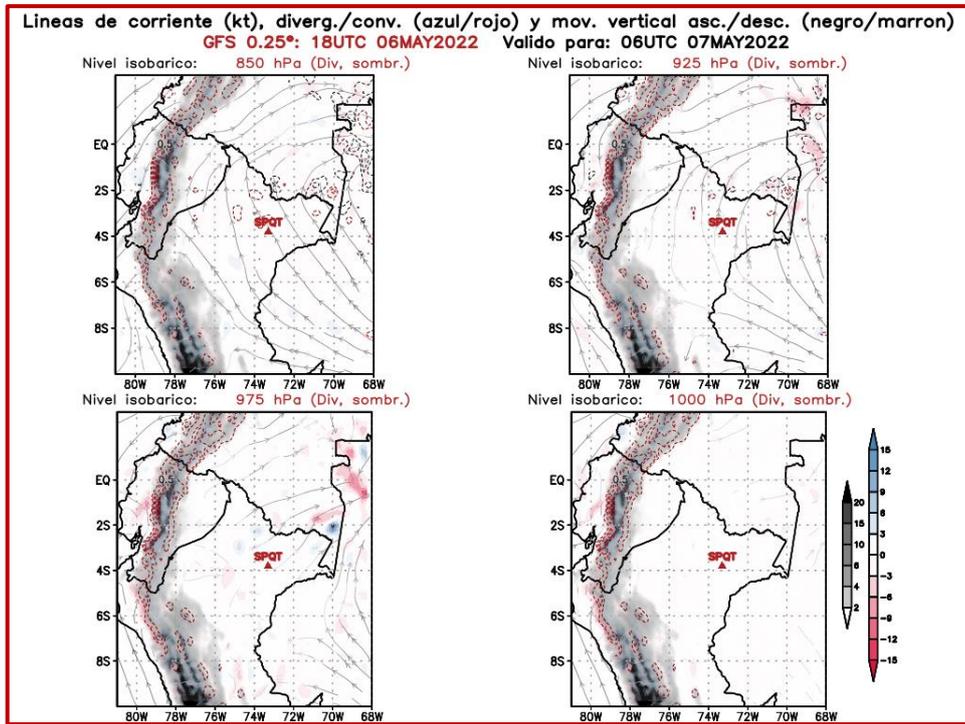


Figura 34. Líneas de corriente y movimiento vertical para los niveles de 1000, 975, 925 y 850 hPa.

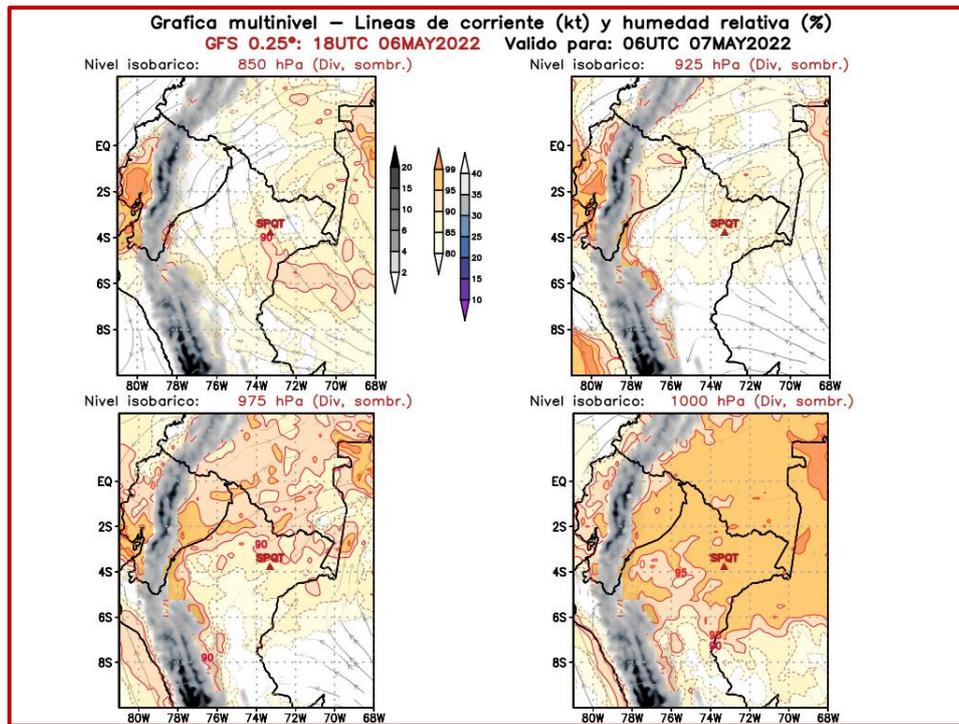


Figura 35. Líneas de corriente y humedad relativa para los niveles de 1000, 975, 925 y 850 hPa

Para el caso de la humedad relativa, la cual es un indicador del grado de saturación de la atmósfera, se puede observar que para los niveles comprendidos entre los 1000 y 850 hPa (figura 35) se presentan valores comprendidos entre 85 – 90 %, y para el nivel de 1000 hPa el valor de humedad relativa supera el 95 %, lo cual indica un elevado grado de saturación de la atmósfera en bajos niveles. Además, se presentaron vientos calmos provenientes del sureste con una masa de aire fría y seca; y un cielo despejado como se podrá observar en la figura 42, donde se puede observar el poco y escaso desarrollo nuboso sobre la región de estudio.

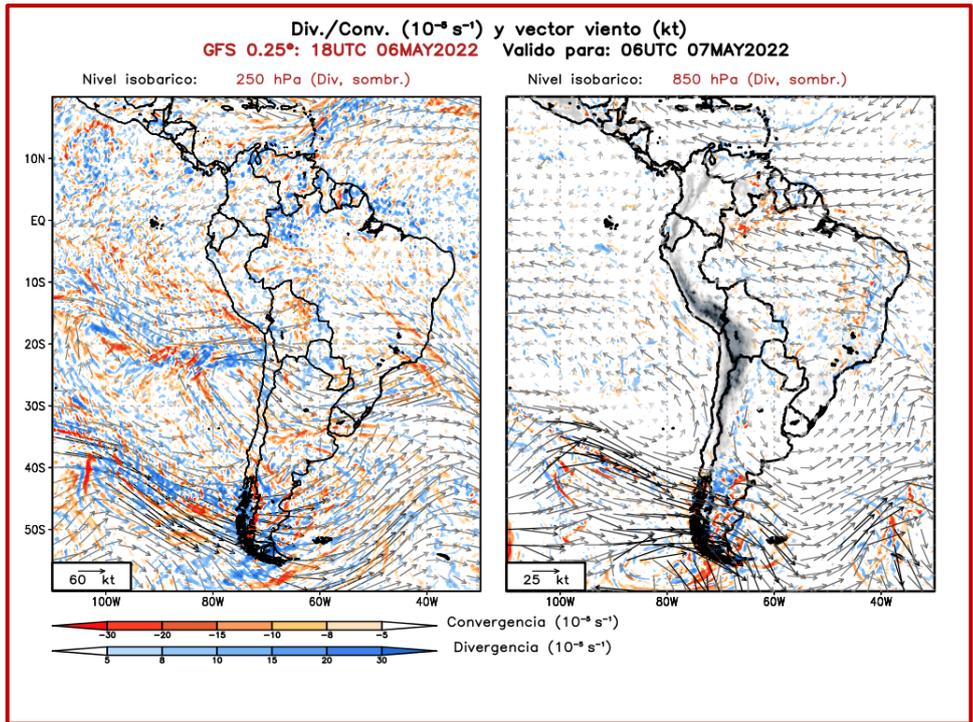


Figura 36. Divergencia y vector viento para niveles de 850 y 250 hPa

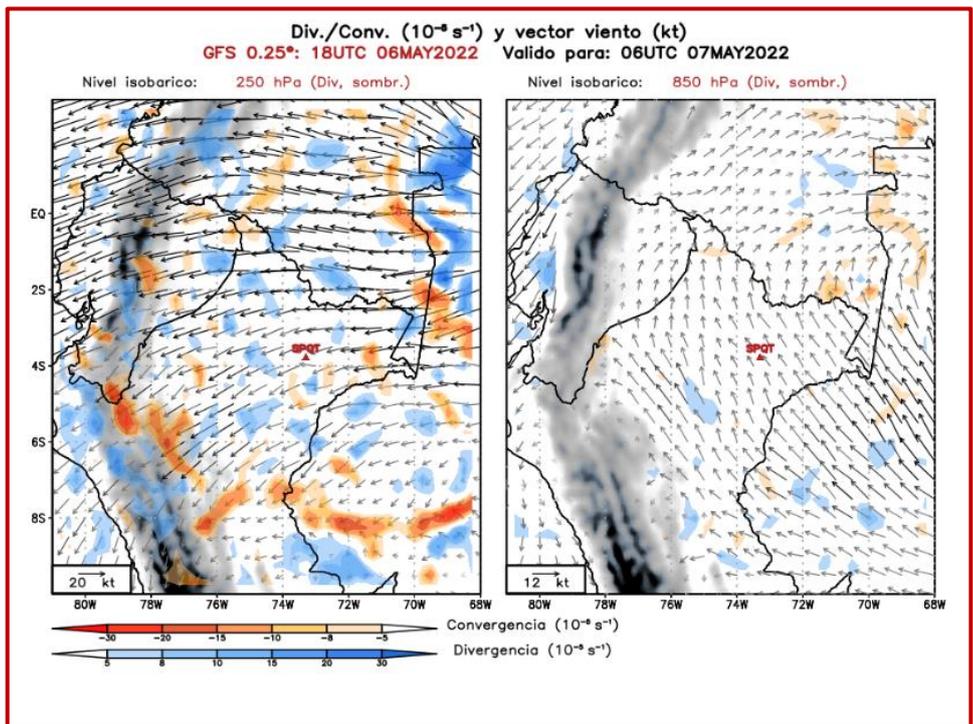


Figura 37. Divergencia y vector viento para niveles de 850 y 250 hPa

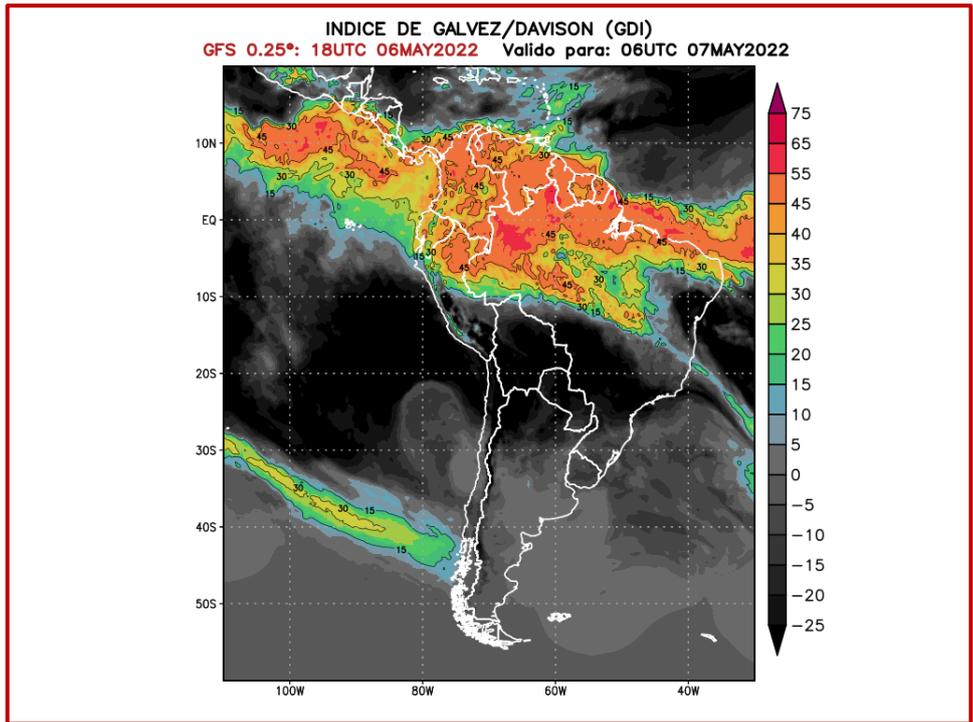


Figura 38. Índice de Galvez/Davison (GDI)

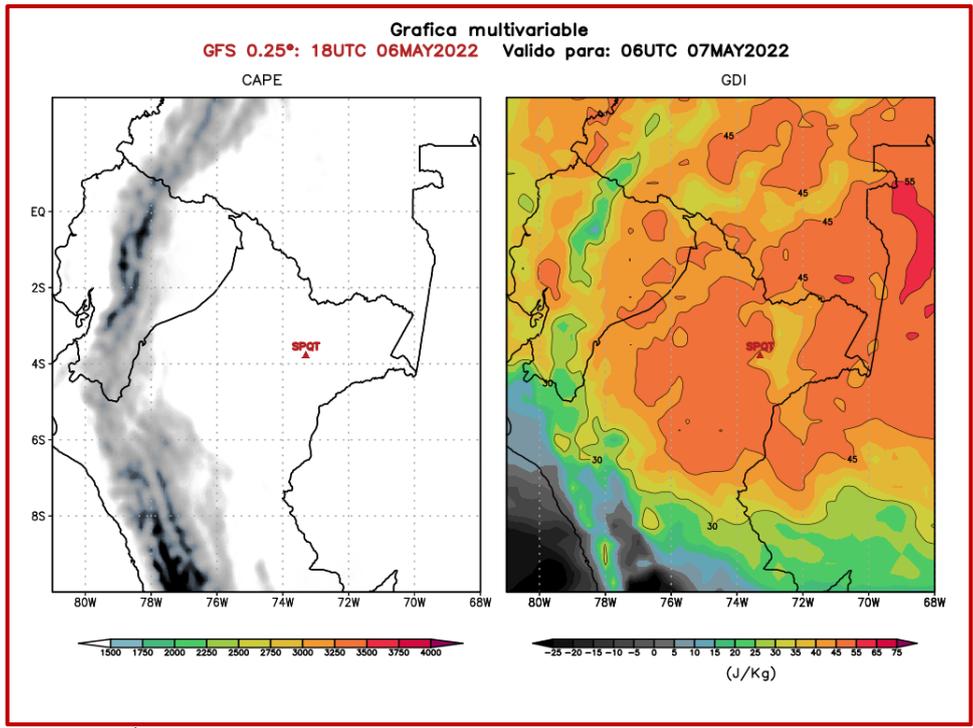


Figura 39. Índice Multivariable CAPE y GDI

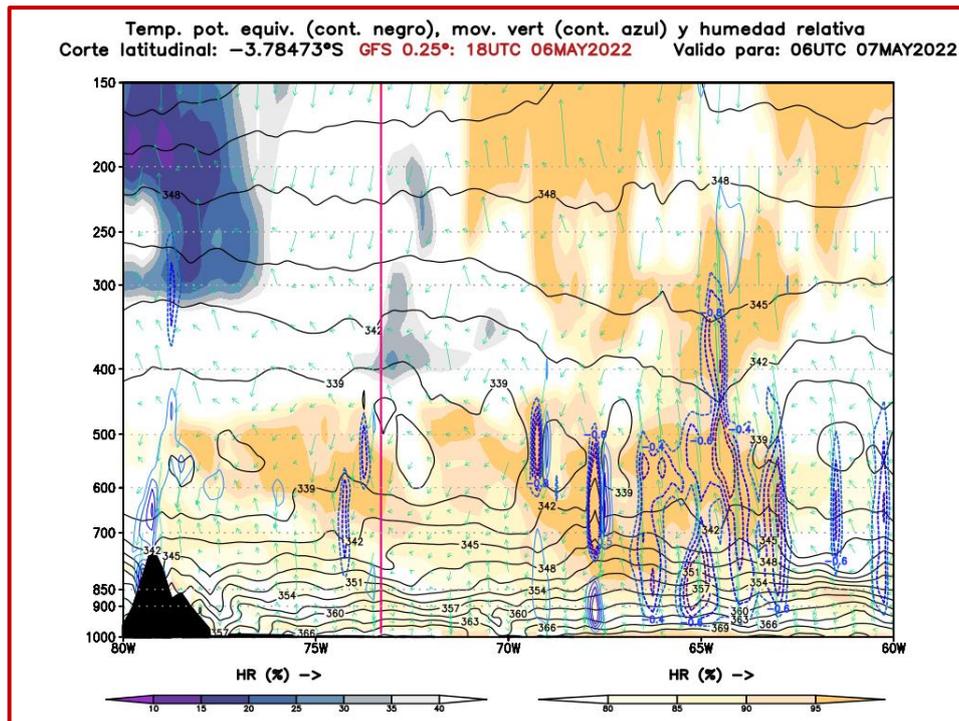


Figura 40. Corte transversal temperatura potencial equivalente, movimiento vertical, humedad relativa y viento

Por otro lado, se resalta la poca utilidad de los índices de convección en el pronóstico del fenómeno de la niebla, ya que para el caso del GDI (figura 38) muestra valores entre 35 a 40 asociados con desarrollo convectivo poco profundo y al igual que el en dominio 2 (figura 39) donde se considera al CAPE, no resultaron ser variables asociadas al proceso de desarrollo del fenómeno de niebla en la región.

En la figura 40, en el corte transversal de la temperatura potencial equivalente, se puede apreciar una atmósfera próxima a la saturación en bajos niveles y subsidencia sobre la región de estudio, la cual la hace una variable de consideración para el análisis y pronóstico del fenómeno de niebla en la región.

En la figura 41, se puede observar al igual que en el evento precedente las variables de temperatura del aire, temperatura de rocío y humedad relativa, cuyo inicio va desde las 18 UTC del día 06 de mayo del 2022; en ella se puede ver como a partir de las 00 UTC del 07 de mayo la atmósfera comienza a saturarse, evidencia de ello es el notable aumento de la humedad relativa a valores por encima del 95% y la disminución y cercanía de los valores de temperatura del aire y temperatura de rocío.

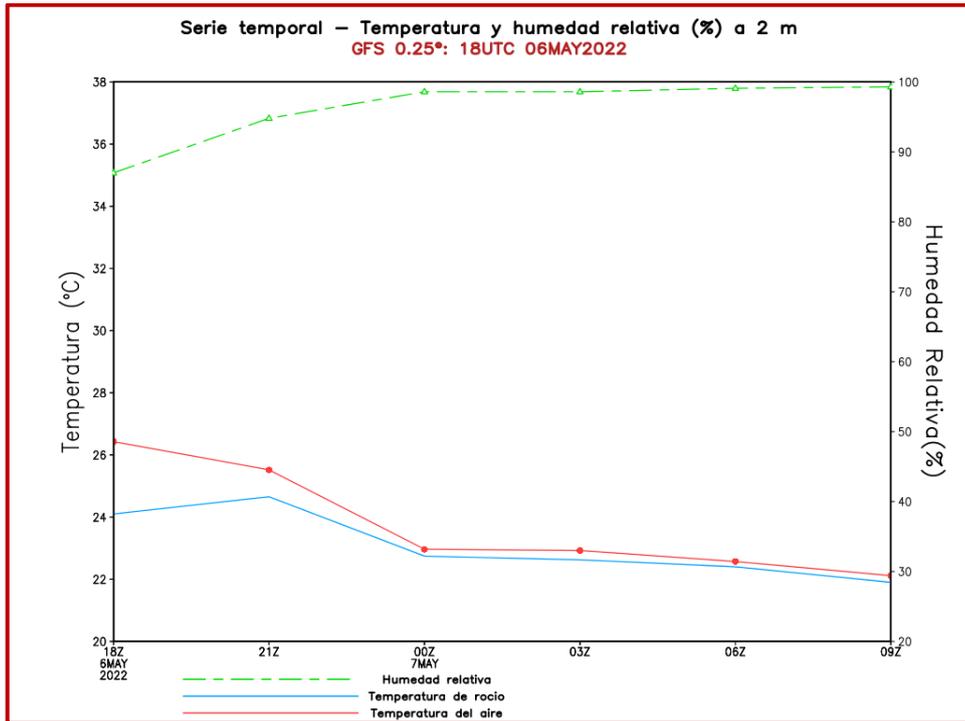


Figura 41. Serie de tiempo evento de niebla 07/05/2022

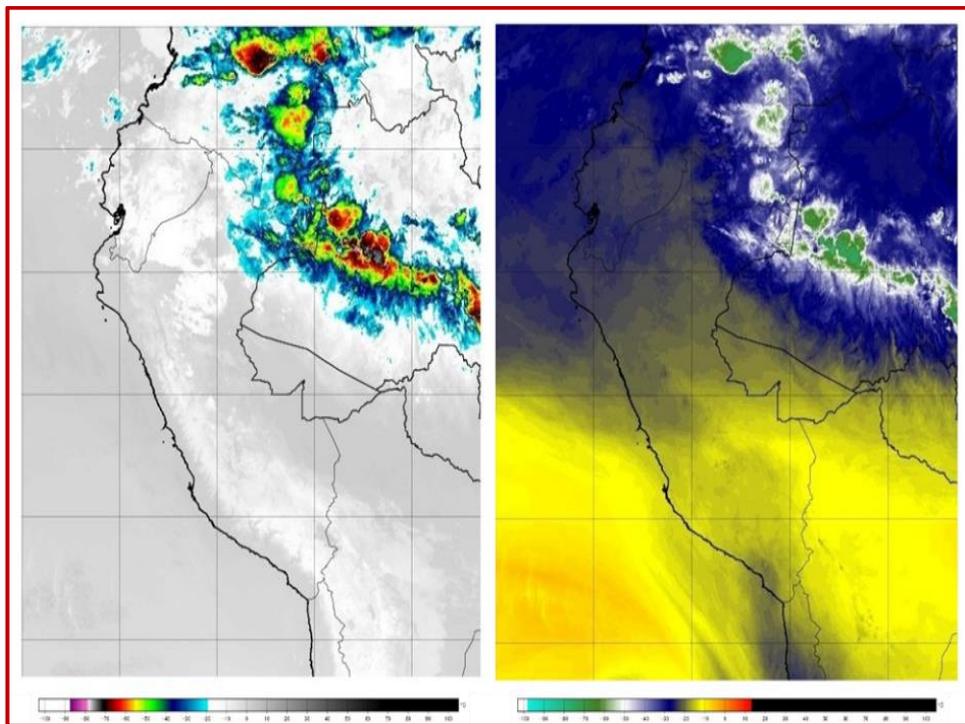


Figura 42. Imágenes de Satélite Goes 16 evento niebla. (a) Canal 16 – 13.30 microns y (b) Canal 09 – 06.90 microns

4.4. Metodología para la elaboración del pronóstico terminal de aeródromo (TAF) y la ocurrencia de tormentas y niebla en el aeropuerto de Iquitos.

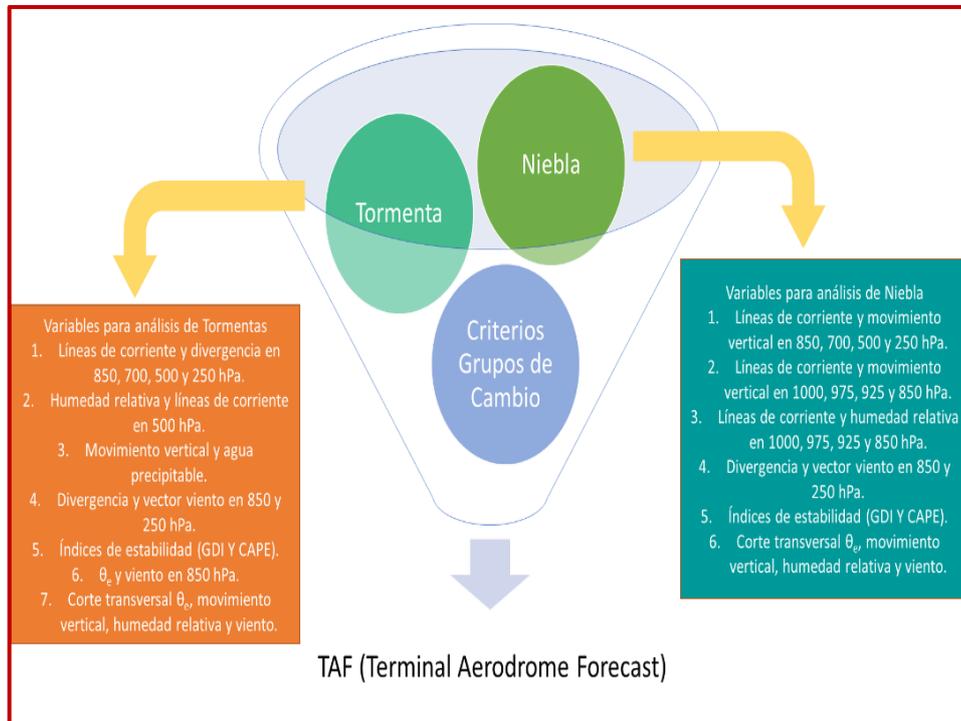


Figura 43. Esquema resumen de las variables meteorológicas para la elaboración del TAF en el aeropuerto de Iquitos

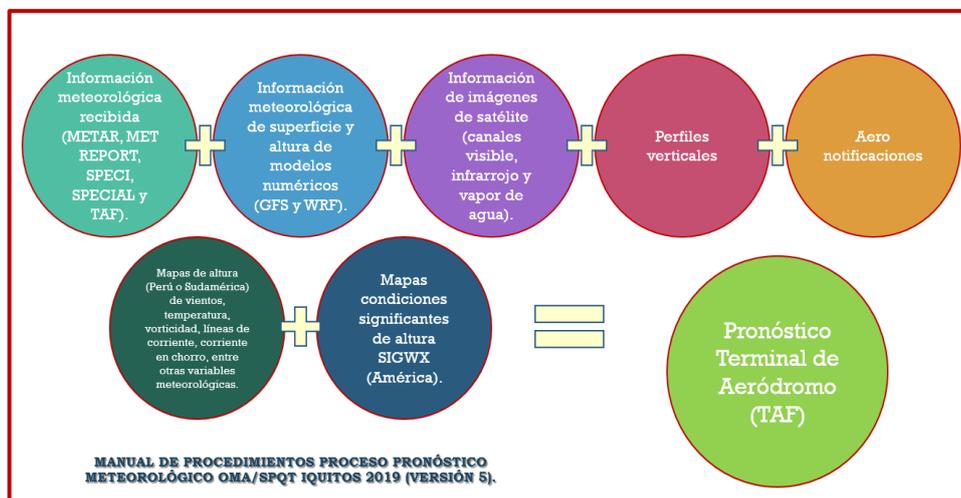


Figura 44. Esquema resumen de la metodología para la elaboración del TAF en el aeropuerto de Iquitos.

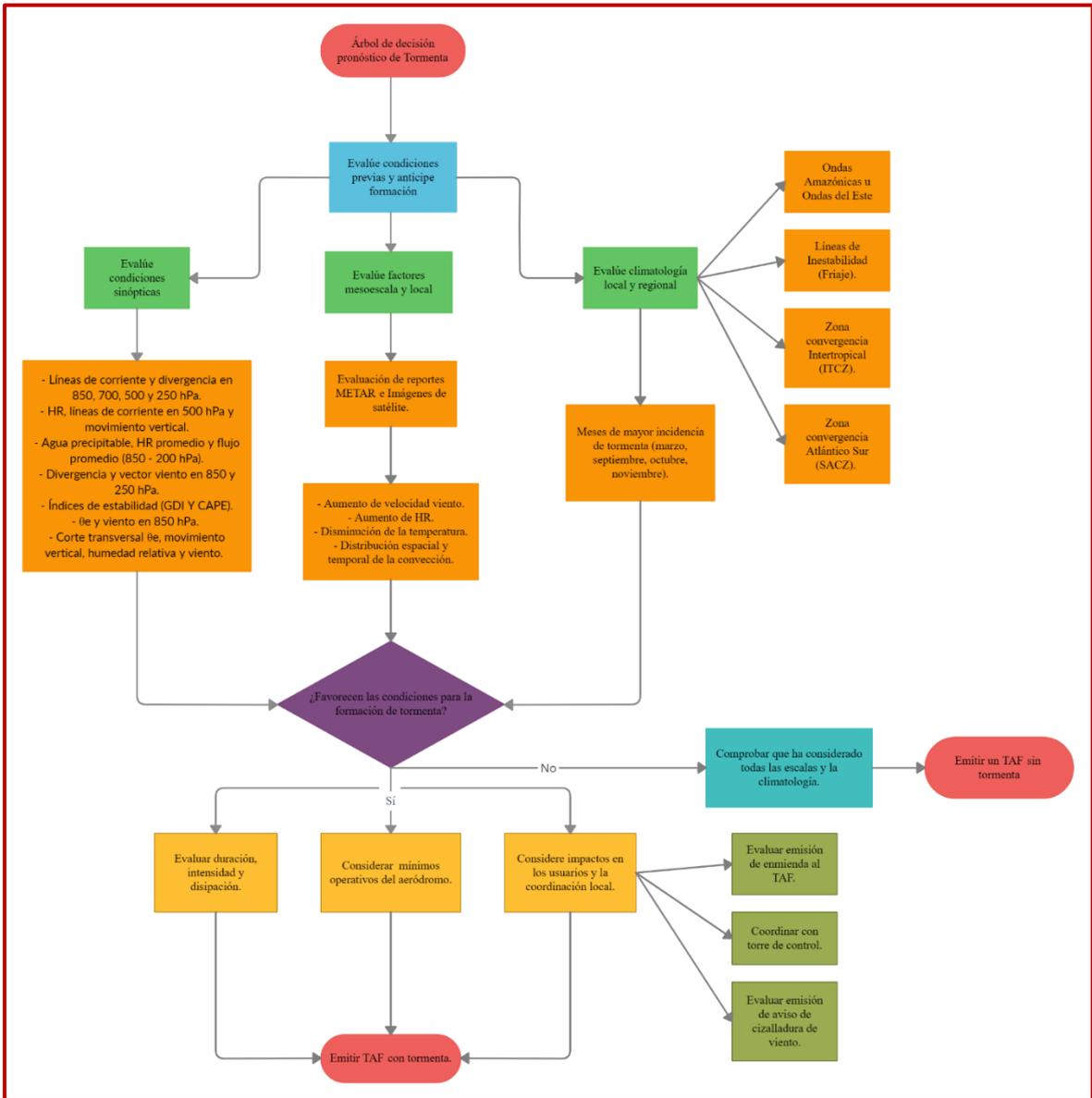


Figura 45. Diagrama de flujo para el pronóstico de tormenta en el aeropuerto de Iquitos

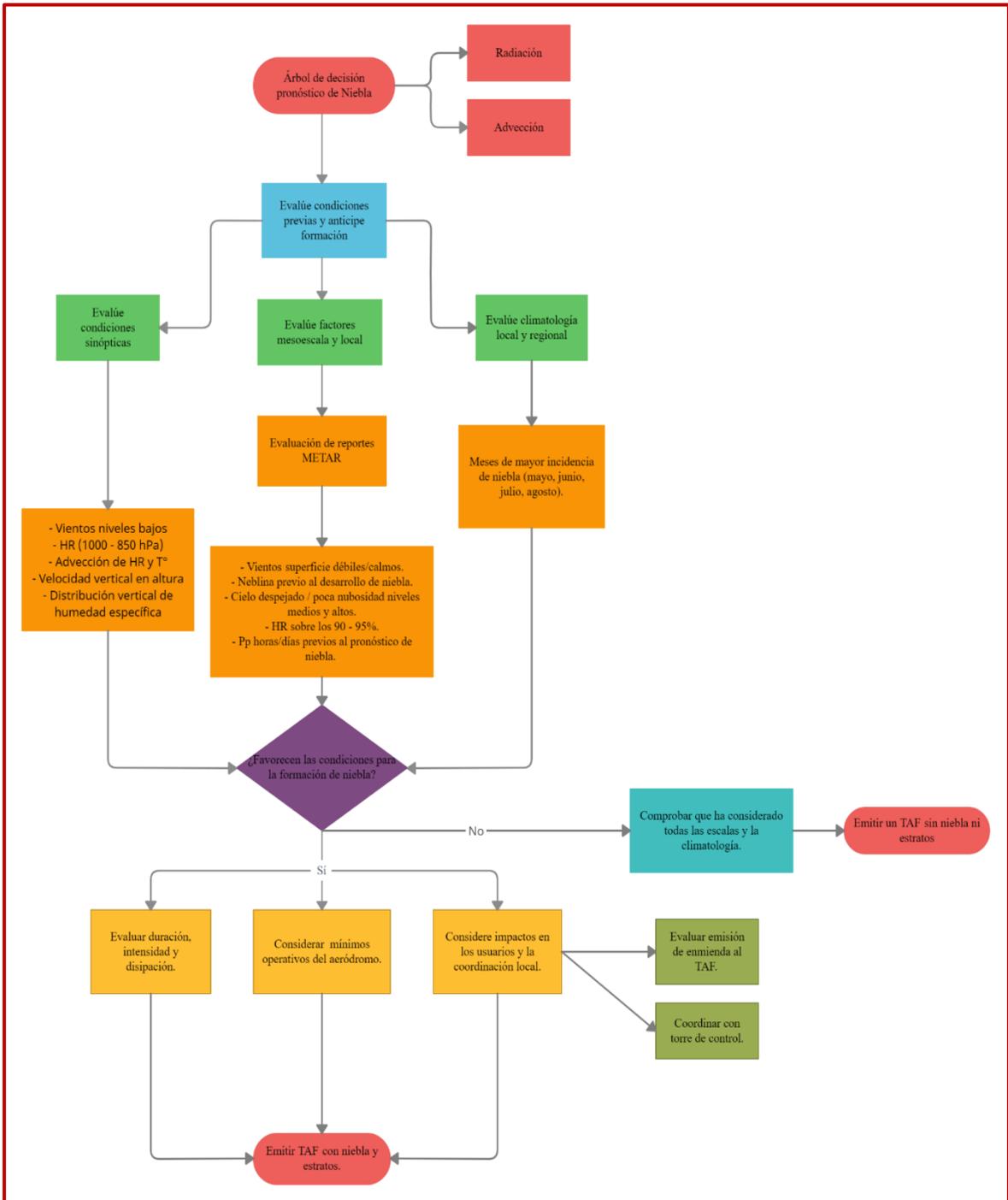


Figura 46. Diagrama de flujo para el pronóstico de niebla en el aeropuerto de Iquitos

V. CONCLUSIONES

A partir de los objetivos planteados y los resultados encontrados en el presente trabajo, se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Por un lado y a partir de las gráficas de frecuencia, se tiene que los eventos de tormenta se desarrollan con mayor frecuencia en el aeropuerto de Iquitos durante los meses de marzo, septiembre, octubre y noviembre. Por otro lado, los eventos de niebla se desarrollan con mayor frecuencia en el aeropuerto de Iquitos durante los meses de mayo, junio, julio y agosto.
- A partir de los casos analizados, el viento, la temperatura del aire, temperatura de rocío y la humedad relativa, son las variables meteorológicas que tienen una mayor asociación con los fenómenos de tormenta y niebla en el aeropuerto de Iquitos.
- Entre las condiciones atmosféricas que favorecen la ocurrencia de tormentas en el aeropuerto de Iquitos tenemos la convergencia de humedad en bajos niveles y en altura la presencia de vientos divergentes provenientes del este. Además, el contenido de agua precipitable con valores superiores a los 55 mm y valores de humedad relativa promedio en las capas de 850 – 200 hPa superiores a 85% constituyen elementos fundamentales para la formación de tormentas en la región Amazónica. Por otro lado, entre las condiciones atmosféricas que favorecen el desarrollo de niebla en el aeropuerto de Iquitos subsidencia en la capa de 600 – 400 hPa, valores de humedad relativa superiores a 95% en niveles bajos, vientos calmos o provenientes del cuadrante sur – suroeste y cielo despejado.
- A partir de la metodología del pronóstico terminal de aeródromo (TAF) con énfasis en la ocurrencia de tormenta y niebla en el aeropuerto de Iquitos, se concluye que las variables meteorológicas que contribuyen al pronóstico de tormentas son las siguientes: convergencia de humedad en bajos niveles, humedad relativa promedio en 850 – 250 hPa, agua precipitable, líneas de corriente en bajos y altos niveles, movimiento vertical, divergencia en bajo y altos niveles y GDI. Por otro lado, entre las variables meteorológicas para el pronóstico de niebla tenemos flujo de viento y humedad relativa en niveles bajos, movimiento vertical, además de vientos calmos o provenientes del cuadrante sur – suroeste y cielo despejado.

VI. RECOMENDACIONES

Entre las recomendaciones que se pueden hacer para mejorar el presente trabajo se tiene las siguientes:

- Luego de haber definido una metodología para la elaboración del TAF haciendo énfasis en los fenómenos de tormentas y niebla, se sugiere continuar con la implementación y uso de nuevas herramientas como el detector de rayos incorporado en el nuevo sistema AWOS, el EGDI y el TWIN, y evaluar su utilidad y precisión en el pronóstico operativo.
- Establecer un proceso para la verificación de los productos generados y mensualmente evaluar el grado de precisión del pronóstico por medio de la comparación con los reportes METAR y a través de un aplicativo desarrollado para ese fin.
- Con la ayuda de un modelo de escala regional, reducir la resolución espacial y temporal de las variables meteorológicas con la finalidad de hacer un mejor seguimiento de la evolución y desarrollo del fenómeno y ver la pertinencia de que estos puedan ser utilizados en un futuro para la realización de pronósticos a baja altura (GAMET).
- Programar reuniones con frecuencia trimestral entre el personal operativo de la OMA Iquitos, con la finalidad de homogenizar y/o uniformizar procedimientos y conocimientos en la realización del pronóstico de terminal de aeródromo (TAF) en el aeropuerto de Iquitos.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbas, I., Ojo, K. & Igbu, P. (2012). The impacts of extreme weather and climate events for aviation. *Ecology & Management*, 12 - 20. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/273631125_THE_IMPACTS_OF_EXTREME_WEATHER_AND_CLIMATE_EVENTS_ON_AVIATION
- American Geophysical Union. (2020). *Clima Amazônico: Aspectos Principais*. Geophysical Monograph Series, 149 – 162.
- Anselmo, E. & Morales, C. (2014). Seasonal and Diurnal Cycle of the Thunderstorms observed in South America. *Semantic Scholar*. Recuperado de: https://www.nssl.noaa.gov/users/mansell/icae2014/preprints/Anselmo_18.pdf
- Boers, N., Bookhagen, B., Marengo, J., Marwan, N. & Kurths, J. (2015). Propagation of Strong Rainfall Events from Southeastern South America to Central Andes. *Journal of Climate*, 7641 – 7658.
- Diariocorreo.pe. (06 de Junio de 2013). Neblina impide llegada de aviones a Iquitos. *Diariocorreo.pe*. Recuperado de: <https://diariocorreo.pe/peru/neblina-impide-llegada-de-aviones-a-iquitos-94986/?ref=dcr>
- Do Nascimento Ribeiro, W., Santos, J., Gomes, M., Cardoso, R., Paulino, E. & Almeida, A. (2014). Lightning and Precipitation produced by severe weather systems over Belem, Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 41-59. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/272476626_Lightning_and_precipitation_produced_by_severe_weather_systems_over_Belem_Brazil
- Donn, W. (1978). *Meteorología*. Editorial Reverte.
- Fultz, A. & Walker, S. (2016). Fatal weather-related general aviation accidents in the United States. *Physical Geography*. Doi: <https://doi.org/10.1080/02723646.2016.1211854>
- Garreaud, R. & Aceituno, P. (s.f.). Atmospheric Circulation and Climate Variability. Chapter 3 in *The Physical Geography of South America*. Oxford University Press, 45 - 59.

- Holton, J. & Hakim, G. (2013). *An Introduction to Dynamic Meteorology*. United States. Academic Press.
- Marengo, J. (1998). Climatología de la Zona de Iquitos, Perú. *Geoecología y Desarrollo Amazónico: estudio integrado en la zona de Iquitos, Perú*, 35 – 57.
- Nobre, C., Obregón, G., Marengo, J., Fu, R. & Poveda, G. (2009). Characteristics of Amazonian Climate: Main Features. Obtenido de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2009GM000903>
- OMM N° 782. (2020). *Informes y Pronósticos de Aeródromo: Manual para la utilización de claves*. Organización Meteorológica Mundial.
- Paccini Peña, L. (2016). *Patrones de Circulación Atmosférica Intraestacionales de Macroescala en Bajos niveles asociados a lluvias en la Cuenca Amazónica*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina. Obtenido de <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/963>
- Quispe Gutiérrez, N. (2005). *Condiciones Sinópticas de la Incursión de una Masa de Aire Frío en Sudamérica y su Impacto en los Cultivos de la Selva Caso específico: verano de 1996 e invierno de 2000*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Quispe Vega, K. (2017). *Patrones sinópticos de una DANA asociados a la ocurrencia de nevadas en la sierra central y sur del Perú*. Universidad Nacional Agraria La Molina. Obtenido de <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3632>
- Rodrigues Alcântara, C. (2011). *Linha de instabilidade da Amazônia: estudo de caso e importância das características do perfil do vento na sua formação e desenvolvimento*. *Ciência e Natura UFSM*, 197 – 226.
- Romatchke, U. & Houze, R. (2010). Extreme Summer Convection in South America. *Journal of Climate*, 3761 – 3791.
- RPP. (2016). *Intensa lluvia deja sin luz a aeropuerto de Iquitos y afecta vuelos*. RPP. Obtenido de <https://rpp.pe/peru/loreto/intensa-lluvia-deja-sin-luz-a-aeropuerto-de-iquitos-y-afecta-vuelos-noticia-1004824?ref=rpp>
- Sierra, I. (2018). *Análisis de tormentas eléctricas en el área de influencia del Aeropuerto Internacional Eldorado con fines de pronóstico*. Universidad Nacional de Colombia.

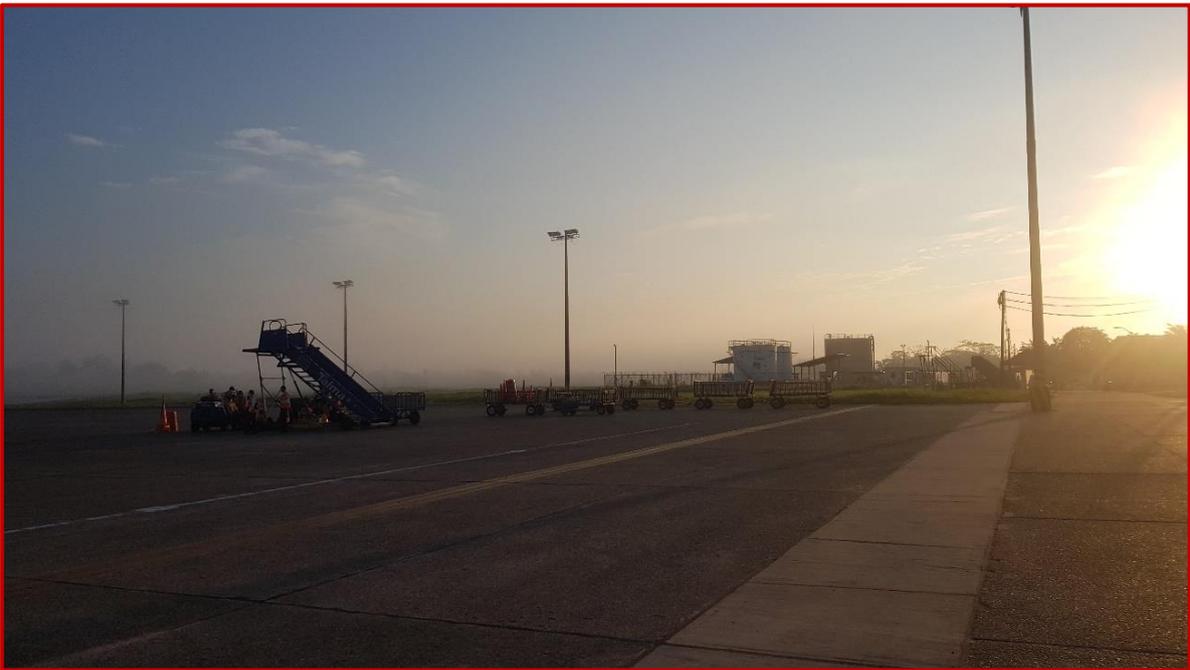
Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/68940?show=full>

- Silva, V. & Kousky, V. (2012). The South American Monsoon System: Climatology and Variability. *Modern Climatology*, 123 - 152.
- Singh, J., Gairola, A. & Das, S. (2015). Numerical Simulation of a Severe Thunderstorm over Delhi using WRF Model. *International Journal of Scientific and Research Publications*.
- Westermayer, A., Groenemeijer, P., Pistotnik, G., Sausen, R., & Faust, E. (2016). Identification of favorable environments for thunderstorms in reanalysis data. *Meteorologische Zeitschrift*, 59 – 70.
- Zipser, E., Cecil, D., Liu, C., Nesbitt, S. & Yorty, D. (2006). Where are the most intense Thunderstorms on Earth? *American Meteorological Society*, 1057 – 1071.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Evento de niebla en el aeropuerto de Iquitos.





Anexo 2: Evento de tormenta en el aeropuerto de Iquitos

