

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“PROPUESTA DE MANUAL DE PROCEDIMIENTO
PARA PRONÓSTICO DE TURBULENCIA DE AIRE CLARO
Y CIZALLADURA DE VIENTO DEL AERÓDROMO DE CUSCO”**

Trabajo de Suficiencia Profesional para Optar el Título de:

INGENIERO METEORÓLOGO

ALDO PIERO ALESSI ALDAVE





Lima – Perú

2022

Document Information

Analyzed document	TSP_ALDOALESSI_05082022.docx (D142707567)
Submitted	2022-08-07 03:03:00
Submitted by	alexis ibañez
Submitter email	alexisibanez@lamolina.edu.pe
Similarity	4%
Analysis address	alexisibanez.unalm@analysis.arkund.com

Sources included in the report

W	URL: https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/documents/20151/403786/201906_clima_infor... Fetched: 2021-12-07 22:44:37		1
W	URL: https://www3.uji.es/~mateu/t1-alumnos.pdf Fetched: 2019-09-26 09:15:29		4
W	URL: https://es.weatherspark.com/y/1705/Clima-promedio-en-Los-%C3%81ngeles-California-Estados-Unido... Fetched: 2019-10-04 15:57:00		2
W	URL: https://aerolatinnews.com/destacado/detectara-sistema-de-iata-turbulencia-en-aire-claro/ Fetched: 2022-08-07 03:03:00		1

Entire Document

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE CIENCIAS

Inicio ¿Existen cambios notorios de la intensidad y velocidad del viento? Sí Evaluar el comportamiento del viento de superficie
Calcular los valores de CAT y WS ¿Estimo CAT y WS según el índice y Diagrama Termodinámico? Sí Analizar los patrones sinópticos
de ocurrencia de CAT ¿Identifico patrones de CAT y MWT según las salidas del WRF? Sí Elaborar el aviso WS No Convectivo
pronosticado Fin No Fin No Fin No Continuar con el cálculo de los valores de CAT y WS

“MANUAL DE PROCEDIMIENTO PARA PRONÓSTICO DE TURBULENCIA DE AIRE CLARO Y CIZALLADURA DE VIENTO ASOCIADO EN EL AERÓDROMO DE CUSCO”

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO METEORÓLOGO

EJECUTOR: ALDO PIERO ALESSI ALDAVE

ASESOR: DR. ALEXIS NICOLÁS IBÁÑEZ BLANCAS

LA MOLINA – PERÚ 2022 TÍTULO

“MANUAL DE PROCEDIMIENTO PARA PRONÓSTICO DE TURBULENCIA DE AIRE CLARO (CAT) Y CIZALLADURA DE VIENTO ASOCIADO EN EL AERÓDROMO DE CUSCO”

DEDICATORIA

A mi madre Sonia por apoyarme incondicionalmente en la redacción de mi trabajo de investigación. A mi padre Bruno por estar a disposición de ayudarme al desarrollo de mi trabajo de investigación. A mi tía Gladis por incentivar a culminar mi trabajo de suficiencia profesional. A Dios, por ser mi guía y el que sigue mis pasos.

AGRADECIMIENTO

Al gran apoyo profesional de mi amigo Carlos Ruíz, gracias a sus valiosas contribuciones en el área de Modelamiento Numérico que fueron indispensables para la elaboración de Resultados. Así como, en la revisión profesional del trabajo de suficiencia profesional presentado. Agradecer al Lic. Nicolás Ribaven, Meteorólogo del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina, por ser de inspiración como profesional por sus investigaciones y estudios de casos de eventos de Turbulencia de Aire Claro. Durante mi visita a Argentina en el CONGREGMET XIII, tuve la oportunidad de charlar y compartir ideas y proyectos relacionados a la Meteorología Aeronáutica.

Agradecer el gran apoyo del Ing. Jorge Bautista, el Ing. Julio Quezada, la Ing. Lily Nieto y el Ing. Wilmer Pulache de CORPAC.

Quienes me brindaron la información requerida de manera oportuna para poder usarlo en el desarrollo de la Tesis. A los miembros del jurado calificador por sus sugerencias y tiempo para la revisión de la Tesis.

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“PROPUESTA DE MANUAL DE PROCEDIMIENTO
PARA PRONÓSTICO DE TURBULENCIA DE AIRE CLARO
Y CIZALLADURA DE VIENTO DEL AERÓDROMO DE CUSCO”**

Trabajo de Suficiencia Profesional para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO METEORÓLOGO

Presentada por:

ALDO PIERO ALESSI ALDAVE

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Mg. Sc. Eusebio Idelmo Cisneros Tarmeño
Presidente

Mg. Sc. Weidi Flores Villanueva
Miembro

Mg. Sc. Julio Alfonso Arakaki Kiyan
Miembro

Dr. Alexis Nicolás Ibáñez Blancas
Asesor

DEDICATORIA

A mi madre Sonia por apoyarme incondicionalmente en la redacción de mi trabajo de investigación.

A mi padre Bruno por estar a disposición de ayudarme al desarrollo de mi trabajo de investigación.

A mi tía Gladis por incentivar me a culminar mi trabajo de suficiencia profesional.

A Dios, por ser mi guía y el que sigue mis pasos.

AGRADECIMIENTOS

Al gran apoyo profesional de mi amigo Carlos Ruíz, gracias a sus valiosas contribuciones en el área de Modelamiento Numérico que fueron indispensables para la elaboración de Resultados. Así como, en la revisión profesional del trabajo de suficiencia profesional (TSP) presentado.

Agradecer al Lic. Nicolás Ribaven, Meteorólogo del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina, por ser de inspiración como profesional por sus investigaciones y estudios de casos de eventos de CAT. Durante mi visita a Argentina en el CONGREGMET XIII, tuve la oportunidad de charlar y compartir ideas y proyectos relacionados a la Meteorología Aeronáutica.

Agradecer el gran apoyo del Ing. Jorge Bautista, el Ing. Julio Quezada, la Ing. Lily Nieto y el Ing. Wilmer Pulache de CORPAC. Quienes me brindaron la información requerida de manera oportuna para poder usarlo en el desarrollo del TSP.

A los miembros del jurado calificador por sus sugerencias y tiempo para la revisión del TSP.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	vii
ABSTRACT	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. PROBLEMÁTICA	1
1.2. OBJETIVOS.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Viento	3
2.2. Corriente en Chorro.....	4
2.3. Líneas de Corriente a 500 hPa	4
2.4. Turbulencia.....	5
2.4.1 Turbulencia Mecánica	5
2.5. La cizalladura del viento o Wind Shear (WS)	9
2.6. Diferencias entre Avisos de Cizalladura de Viento (WS) y Avisos SIGMET	10
2.7. Índices de turbulencia.....	11
2.7.1. Número de Richardson.....	11
2.7.2. Índice de Ellrod.....	12
2.8. Modelos de Circulación General	13
2.9. Sistema de Recolección de Datos AMDAR	14
III. DESARROLLO DEL TRABAJO	16
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
4.1. Comportamiento de los Vientos en Superficie durante la ocurrencia de WS	18
4.1.1. Variación Horaria del Viento en Superficie del AWOS II - 09 junio 2018.....	19
4.1.2. Rosa de Viento en Superficie del AWOS II – 09 de junio del 2018	20

4.1.3. Distribución de Frecuencia de Viento en Superficie del AWOS II - 09 de junio del 2018.....	21
4.2. Cálculo de los valores de CAT y WS, utilizando salidas del WRF.....	22
4.2.1. Estimación de la CAT, usando los índices de turbulencia	22
4.2.2. Estimación del WS usando las salidas de Cortante Vertical de Viento y el Diagrama Skew-T.....	24
4.3. Análisis Sinóptico de posible ocurrencia de CAT, utilizando los Mapas de Superficie	27
4.3.1. Análisis Sinóptico de probable ocurrencia de CAT, utilizando los mapas de superficie y el Modelo Numérico WRF	27
4.4. Sistema del procedimiento para pronostico CAT y WS asociado	34
V. CONCLUSIONES.....	38
VI. RECOMENDACIONES	40
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41
VIII. ANEXOS.....	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación entre Avisos WS y Avisos SIGMET WS	10
Tabla 2. Clasificación Atmosférica según Ri	12
Tabla 3. Clasificación de Intensidades del Índice de Ellrod:	13
Tabla 4. Datos de Viento Media Horario de la Estación AWOS II – 09 de junio del 2018.	18
Tabla 5. Climatología de Vientos Mensuales	20
Tabla 6. Número de Reportes WS registrados por mes y año en la OMA SPZO	46
Tabla 7. Número de Reportes WS registrados por trimestre y anual en la OMA SPZO	47
Tabla 8. Registro de Ocurrencias WS CORPAC.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diferentes perfiles de la velocidad del viento según el emplazamiento.	3
Figura 2. CAT y Centro de Bajas en niveles altos.....	6
Figura 3. CAT con línea de corte en la Baja de Niveles Altos.....	7
Figura 4. CAT y Vientos Difluentes	7
Figura 5. Áreas probables de turbulencia en la corriente en chorro;.....	8
Figura 6. CAT con Jet Confluente	9
Figura 7. Cizalladura de Vientos, (FAA, 2008)	10
Figura 8. Sistema de Recolección de Datos AMDAR.....	15
Figura 9. Variación Horaria de la Velocidad del Viento – 09 de junio del 2018.....	19
Figura 10. Variación Horaria de la Dirección del Viento – 09 de junio del 2018.....	19
Figura 11. Rosa de Vientos en Superficie del AWOS II – 09 de junio del 2018.....	20
Figura 12. Distribución de Vientos en Superficie del AWOS II 09 de junio del 2018.....	21
Figura 13. Número de Richardson horario para el Espesor Geopotencial 300/200 hPa en el Dominio 3 (Provincias de Cusco) - 09 de junio 2018 (18-23 Z).....	22
Figura 14. Índice de Ellrod horario para el Espesor Geopotencial 300/200 hPa en el Dominio 3 (Provincias de Cusco) - 09 de junio 2018 (18-23 Z).....	23
Figura 15. Cortante Vertical de Viento 200-250 hPa horario en el Dominio 3 (Provincias de Cusco) - 09 de junio 2018 (18-23 Z).....	24
Figura 16. Cortante Vertical de Viento 600-550 hPa horario en el Dominio 3 (Provincias de Cusco) - 09 de junio 2018 (18-23 Z).....	25
Figura 17. Diagrama Skew-T del Modelo WRF para la Estación de Cusco (09 de junio 2018) a las 18 Z (Dominio 2 – Región de Cusco).....	26
Figura 18. Mapas Sinópticos de Superficie a nivel de Sudamérica. 09 de junio del 2018 – 18 Z. Modelo GFS.....	28
Figura 19. Mapas Sinópticos de Superficie a nivel de Sudamérica. 10 de junio del 2018 – 0 Z. Modelo GFS.....	29

Figura 20. Corriente en Chorro (200 hPa). (a) nivel de Sudamérica. 09 de junio del 2018 – 18 Z (b) 10 de junio del 2018 – 0 z	30
Figura 21. Líneas de Corriente en 200 hPa (a) 20Z, (b) 21 Z y (c) 22 Z (Provincias de Cusco).....	31
Figura 22. Líneas de Corriente en 500 hPa. (a) 20 Z (b) 21 Z y (c) 22 Z (Provincias de Cusco).....	32
Figura 23. Isotacas y Advección Térmica a 200 hPa horario en el Dominio 3 (Provincias de Cusco) - 09 de junio 2018 (18-23 Z)	33
Figura 24. Flujo de procedimiento metodológico.....	34
Figura 25. Diagrama del flujo: Árbol de decisiones para la emisión de avisos de WS no convectivo pronosticado	35
Figura 26. Gráfica de Barras de N° de Reportes WS por mes en la OMA SPZO (2016-2019).....	46
Figura 27. Gráfica de Torta (%) de Reportes WS por mes en la OMA SPZO (2016-2019).....	47
Figura 28. Gráfica de Barras de N.º de Reportes WS por estación en la OMA SPZO (2016-2019).....	48
Figura 29. Gráfica de Torta (%) de Reportes WS por mes en la OMA SPZO (2016-2019).	48
Figura 30. Presión Reducida a Nivel del Mar - Espesor Geopotencial 200/500 hPa en el Dominio 3 (Provincias de Cusco) - 09 de junio 2018 (18-23z)	52
Figura 31. Desplazamiento de Avión.....	53

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Caso de Estudio de Turbulencia en Aire Claro en Argentina	45
Anexo 2. Estadísticas de los Eventos WS del Aeropuerto de Cusco.....	46
Anexo 3. Registro de Ocurrencias de WS en el mes de junio del 2018 –SPZO	49
Anexo 4. METARs para los días 09 de junio 12 Z – 10 de junio 00Z del 2018	50
Anexo 5. Presión Reducida a Nivel del Mar - Espesor Geopotencial 200/500 hPa en el Dominio 3 (Provincias de Cusco) - 09 de junio 2018 (18-23z)	52
Anexo 6. Noticias a nivel mundial – Iniciativa IATA para Sistema de Detección de CAT	53

RESUMEN

La cizalladura de viento por sus siglas en inglés WS, constituye uno de los principales fenómenos adversos para la aeronavegación, afectando las fases de vuelo más críticas (despegue y aterrizaje). En tal sentido, se elaboró un manual de procedimiento para pronóstico de Turbulencia de Aire Claro por sus siglas en inglés CAT y WS asociado en el aeródromo de Cusco, por lo cual se realizó un estudio de caso el día 09 de junio del 2018 en Cusco-Perú. Recopilándose información METARs, datos meteorológicos del Automated Weather Observation System II (AWOS II) y observaciones extraordinarias de aeronaves, también se realizaron simulaciones del modelo Weather Regional Forecast (WRF) a 12 horas (12 a 23 Z) para realizar un análisis sinóptico de WS y CAT, mediante el cálculo de valores estimados de WS y CAT y la identificación de patrones de ocurrencia de CAT. Para el análisis sinóptico de WS y CAT, se observó la ocurrencia de WS vertical de 8 nudos (kt) en la aproximación de la aeronave (600-550 hPa); y valores 17 y 10 kt en la componente vertical y horizontal de WS, respectivamente, en niveles superiores (200 hPa) usando las salidas de Cortante de Viento Vertical. Así mismo, la probable ocurrencia de CAT con valores estimados de entre 6 a 8 del índice de Ellrod. Según los resultados la génesis de la CAT se debe principalmente a los jets confluentes con patrones de viento difluentes en niveles superiores (200 hPa) acompañada de vientos muy intensos en el nivel de 500 hPa. Por último, el procedimiento enunciado se sistematizó usando un flujograma con la finalidad de brindar al pronosticador de la Oficina Meteorológica de Aeródromo Cusco (OMA SPZO), herramientas y criterios de decisión para la emisión anticipada de avisos WS No Convectivos pronosticados para el aeropuerto de Cusco.

Palabras clave: WS, CAT, Análisis Sinóptico, Cortante de Viento Vertical, Jet Confluyente, Índice de Ellrod.

ABSTRACT

Wind shear (WS) is one of the main adverse phenomena for air navigation, improving the most critical phases of flight (takeoff and landing). In such, a procedure manual for forecasting Clear Air Turbulence (CAT) was prepared and associated WS at the Cusco aerodrome, for which a case study was carried out on June 9, 2018 in Cuzco-Peru. Collecting METAR information, meteorological data from the Automated Weather Observation System II (AWOS II) and extraordinary aircraft observations, simulations of the Weather Regional Forecast (WRF) model were also carried out at 12 hours (12 to 23 Z) to perform a synoptic analysis of WS and CAT, by calculating estimated value of WS and CAT and identifying patterns of CAT occurrences. For the synoptic analysis of WS and CAT, the occurrences of vertical WS of 8 knots (kt) were observed on the approach of the aircraft (600-550 hPa); and values of 17 and 10 kt in the vertical and horizontal components of WS, respectively, at higher levels (200 hPa). using the Vertical Wind Shear outputs. Likewise, the probable occurrence of CAT with estimated values between 6 and 8 of the Ellrod index. According to the results, the genesis of CAT is mainly due to confluent jets with diffluent wind patterns at higher levels (200 hPa) accompanied by very intense winds at the 500 hPa level. Finally, the stated procedure was systematized using a flowchart in order to provide the forecaster of the Cusco Aerodrome Meteorological Office (OMA SPZO), tools and decision criteria for the early issuance of Non-Convective WS warnings forecast for the Cusco airport.

Keywords: WS, CAT, MWT, forecast, Synoptic Analysis, Vertical Wind Shear, Confluent Jet, Ellrod Index.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. PROBLEMÁTICA

La circunstancia meteorológica de gran importancia en el desarrollo de la aviación es el viento, sus cambios de velocidad afectan la aeronave en el vuelo debido al flujo de aire alrededor de las alas (De Armas et al, 2019), siendo la WS uno de los peligros más críticos de la aviación (Mazon et al, 2018) y una de las causas fundamental de la turbulencia debido a los cambios de la componente vertical del viento (González, 2005) Por ello, el servicio de emisión de Avisos de Alerta de Cizalladura de Viento (AACV) se considera imprescindible y debe coordinarse entre las áreas de Comunicaciones y Meteorología (COM-MET) para su reporte y difusión a los servicios de tránsito aéreo, tripulación de vuelo y operadores aéreos. La Norma Técnica (NTC 003-2013) sobre Reporte de Cizalladura del Viento a poca altura establece los procedimientos de elaboración y difusión de los avisos de WS a poca altura que pueden afectar la seguridad de las operaciones aéreas. Si bien menciona los fenómenos asociados a WS, no hace mención de los tipos de WS ni de algún documento complementario que sirva de guía o referencia al pronosticador para su labor diaria.

Actualmente no se cuenta con un gran número de AACV elaborados a partir de pronósticos anticipados que permitan prevenir la ocurrencia de WS, generalmente estos avisos son realizados para eventos convectivos, las cuales están asociados a una Tormenta Eléctrica (TS).

Así también, sofisticados equipos como los perfiladores de viento y radar DOPPLER, que resultan ser muy costosos para su adquisición, no llegan a pronosticar la ocurrencia de WS no convectivo.

El presente trabajo de suficiencia profesional (TSP) pretende proponer herramientas para el análisis sinóptico de eventos de WSNC en el Aeródromo de Cusco asociados a Turbulencia de Aire Claro (TAC por sus siglas en inglés) y Ondas de Montaña. Para lo cual se hará

uso de datos y herramientas con las que se cuenta en CORPAC S.A. Por lo que se recomienda su implementación en la Oficina Meteorológica de Aeródromo (OMA) y aeródromos con similares condiciones a las presentadas.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Elaborar la propuesta de manual de procedimiento para pronóstico de turbulencia de aire claro y cizalladura de viento del Aeródromo de Cusco.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Evaluar el comportamiento del viento de superficie durante las horas de ocurrencia de Cizalladura de Viento.
- Calcular los valores de Turbulencia de Aire Claro y Cizalladura de Viento.
- Analizar los patrones sinópticos de ocurrencia de Turbulencia de Aire Claro.
- Sistematizar el procedimiento para pronóstico de Turbulencia de Aire Claro y Cizalladura de Viento.
- Elaborar el manual de procedimiento para pronóstico de cizalladura de viento no convectiva asociado a CAT en el aeródromo de Cusco.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

A continuación, se darán a conocer algunos conceptos básicos de la investigación como los vientos, perfiles de vientos, corriente chorro, líneas de corriente a 500 hPa y turbulencia (Mercer & Jimenez, 1999), con el fin de entender el WS y los patrones sinópticos en CAT en la esfera de aviación, lo cual afecta la actuación de las aeronaves, con consecuencias negativas sobre la seguridad de los vuelos.

2.1. Viento

Para puntualizar en palabras sencillas Rodríguez et. al (2015), indica que es el “movimiento del aire desde una zona a otra que dirección y velocidad debido a la diferencia de presiones de mayor a menor presión”. Así mismo sus cambios de velocidad y su medición son muy importante para los pilotos (Dobrovolski, 2009).

También es importante conocer que los perfiles de vientos no son constantes con la altura, debido al rozamiento con la superficie de la Tierra, hasta una distancia límite donde la velocidad no es afectada. El gradiente de velocidad con respecto a la altura depende de la rugosidad del terreno o los posibles obstáculos cercanos, la estación del año o incluso la hora del día, siguiendo una ley exponencial (Racero, 2012) La Figura 1 muestra cómo el comportamiento de dicha ley exponencial en función de las características típicas de distintos emplazamientos.

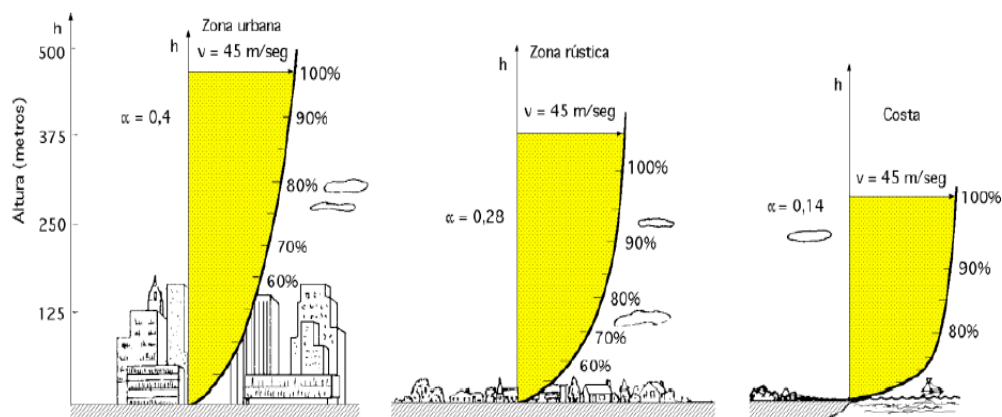


Figura 1. Diferentes perfiles de la velocidad del viento según el emplazamiento.
FUENTE: (Racero, 2012)

2.2. Corriente en Chorro

Según OMM (2003), la corriente en chorro se define como una fuerte y estrecha corriente de aire concentrada a lo largo de un eje casi horizontal en la alta troposfera o en la estratosfera, caracterizada por una fuerte cizalladura vertical y horizontal del viento. Presentando uno o dos máximos de velocidad, estas discurren, normalmente, a lo largo de varios miles de kilómetros, en una franja de varios centenares de kilómetros de anchura y con un espesor de varios kilómetros.

Según Viñas (2021), la corriente en chorro se manifiesta con claridad en las topografías próximas a la tropopausa (300 hPa, 200 hPa) y se representan con una flecha de trazo grueso que coincide con el centro del eje del chorro, en las cartas meteorológicas de cotas medias y altas, las corrientes en chorro son representadas por vientos con velocidades de más de 80 nudos, si bien técnicamente podemos hablar de una de estas corrientes si la velocidad en el eje es igual o superior a 65 nudos.

Due (1954), indica que las corrientes en chorro (Jet Stream) son flujos de aire en altura que circulan a gran velocidad alrededor del planeta, de oeste a este, aprovechando las discontinuidades entre las células convectivas.

Existen cuatro de estos grandes chorros que circundan el planeta, dos en cada hemisferio:

- La corriente en chorro polar circula en torno a los 60° de latitud y es la responsable de la dinámica general atmosférica en las latitudes medias.
- La corriente en chorro subtropical circula en torno a los 30° y tiene menor importancia meteorológica.

2.3. Líneas de Corriente a 500 hPa

Rodríguez (2005), explica que las Líneas de Corriente a 500 hPa (o también llamado Tercer piso por ubicarse entre los 5000-5920 m) son fundamentales para el pronóstico del tiempo a 24 y 48 horas. Se ha comprobado que el peso de atmósfera que queda por encima de ella, resulta casi idéntico al que queda desde esa presión hasta el suelo. Por lo tanto, brinda una noción de las condiciones de la atmósfera media, situando las cuñas y vaguadas; se determinan las futuras áreas de buen tiempo, las zonas de probables lluvias, mal tiempo y formación de bajas en superficie.

2.4. Turbulencia

En términos aeronáuticos es la sensación percibida en la aeronave caracterizada por una caída abrupta de la performance de una aeronave en un flujo turbulento. Esta percepción requiere de remolinos turbulentos del tamaño de la aeronave (Ludlam, 1967) producto de la cascada de energía que proviene de las escalas mayores.

La turbulencia, para nuestro estudio, se puede dividir en tres tipos según su formación: Turbulencia Térmica o Convectiva, Turbulencia Frontal y Turbulencia Mecánica. Para fines de la presente investigación nos centramos en la descripción de la Turbulencia Mecánica.

2.4.1 Turbulencia Mecánica

La turbulencia mecánica es causada por el WS horizontal y vertical y es el resultado de diferencias de gradiente de presión, obstrucciones del terreno, o cizalladura de la zona frontal. Los tres tipos de turbulencias mecánicas discutidas en este módulo son turbulencias de aire claro (CAT), turbulencia de onda de montaña (MWT), y estela turbulencia. Esta investigación se centrará en analizar sólo la turbulencia de aire claro (CAT) y de ondas de montaña.

Turbulencia de Aire Claro (CAT)

Es la turbulencia no asociada a la actividad convectiva. Generalmente relacionado con frentes y jet en niveles altos. Su formación se produce cuando capas de aire adyacentes se mueven a distintas velocidades, en la zona de contacto de ambas capas aparece una fuerte cizalladura que da lugar a una ondulación del flujo. Si dichas ondas se rompen, forman remolinos que viajan en el sentido del viento medio generando la CAT. Por lo que es importante conocer los patrones sinópticos de CAT las cuales pueden ocurrir cerca de corrientes de chorro, sistemas de baja cerrada en altura, fuertes vaguadas, áreas de fuerte advección térmica o un avance de cirrus. Los estudios muestran que la CAT generalmente se forma en asociación de patrones sinópticos específicos. Reconocer el desarrollo y debilitamiento de estos patrones será fundamental para el pronóstico de CAT.

a. El centro de bajas en altura

Los centros de bajas en altura son sistemas de circulación ciclónica cerrada en altura. La CAT moderada se encuentra a menudo en la vecindad de los profundos canales de las bajas

cerradas en altura. En la Figura 2, se describen los ejemplos de desarrollo de la CAT en sus diferentes fases de la baja segregada en altura. La CAT, usualmente, se forma en áreas de confluencia y difluencia de líneas de corriente. Una vez, la baja en altura se convierte en segregada, la CAT disminuirá en la vecindad de la baja.

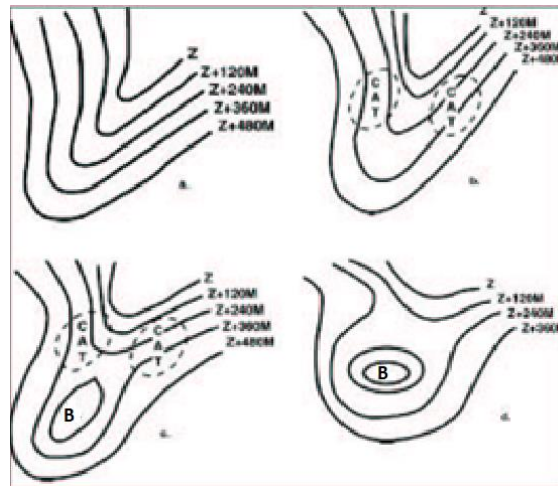


Figura 2. CAT y Centro de Bajas en niveles altos
FUENTE: (Mercer y Jimenez, 1999)

b. Patrones en 500 hPa para formación de CAT

Las salidas numéricas de 500 hPa son muy útiles para pronosticar CAT. Sin embargo, no se debe remitir únicamente a esta data sino usar salidas de todos los niveles. A continuación, se muestran los patrones en 500 hPa que pueden indicar presencia de CAT:

- Vaguadas de onda corta, una cerca de otra (doble vaguada)
- Vaguada térmica bien definida
- Una banda estrecha de vientos intensos con fuerte cizalladura de viento horizontal.
- Sistema de aire frío cerrado que se mueve a través de un patrón de flujo abierto.
- Vientos de 500 hPa mayores a 75 kt en áreas con cambio de viento mayores o iguales a 20°, y gradientes térmicos ajustados.

Vaguadas asociadas con una onda frontal de superficie (a menudo indicada por curvas muy definidas de isotermas alrededor del borde de la lengua cálida).

c. Líneas de corte en vaguadas de niveles superiores

Se presenta una CAT moderada cuando la corriente en chorro es mayor o igual a 50 nudos alrededor de una baja segregada de nivel superior, y se produce un cuello muy estrecho con una línea de corte que separa el flujo predominante alrededor de la baja (shear line). Se

puede pronosticar ocurrencia moderada a severa de CAT si el jet llega a 115 nudos. El potencial de CAT es mayor si el chorro se encuentra rodeado entre dos sistemas anticiclónicos (ver Figura 3).

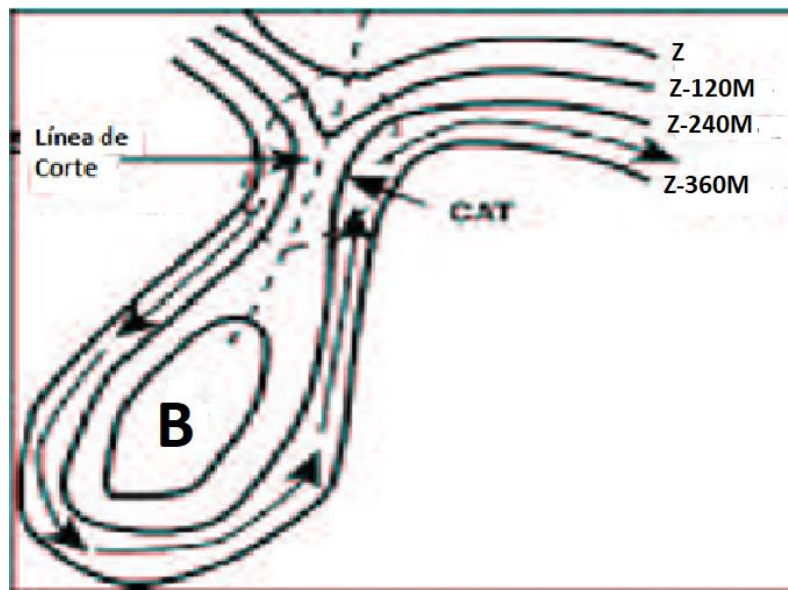


Figura 3. CAT con línea de corte en la Baja de Niveles Altos
FUENTE: (Mercer & Jimenez, 1999)

d. Patrones de viento difluentes

La mayoría de CAT se observan durante la formación de patrones de viento difluente en niveles superiores (generalmente por encima de 500 hPa). Después de que se establece el patrón difluente, la CAT puede debilitarse en la zona difluente. Sin embargo, cuando un frente de superficie está presente (o formando), el potencial para CAT aumenta en las áreas de flujo difluente cerca del sistema de superficie (ver la Figura 4).

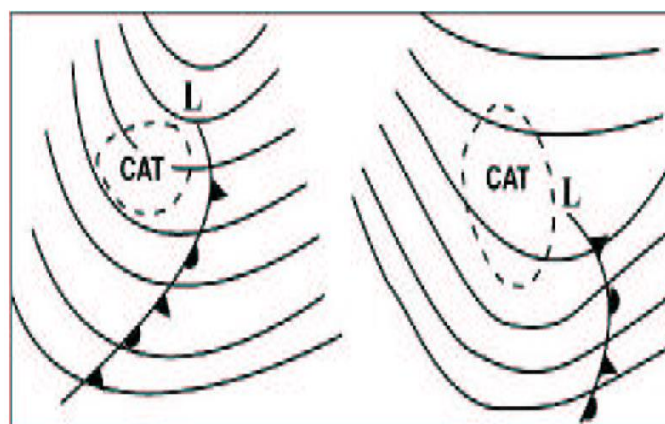


Figura 4. CAT y Vientos Difluentes
FUENTE: (Mercer & Jimenez, 1999)

e. CAT y fuertes vientos superiores

La CAT puede existir en áreas de vientos fuertes cuando las isothermas y las líneas de corriente son casi paralelos y solo existen variaciones menores en la dirección del viento (aproximadamente 20 °C de temperatura por 4° de latitud) con gradientes térmicos excepcionalmente ajustados. La Figura 5 ilustra una situación en los vientos de 500 hPa superaron los 100 nudos en las proximidades de un gradiente térmico muy alto. Además, CAT ocurre, a menudo, a lo largo y por encima de una banda estrecha de fuertes vientos de 500 hPa cuando el viento horizontal. Las cizalladuras de viento horizontal son fuertes a ambos lados de la banda, especialmente si los vientos tienen tendencia geostrofica.

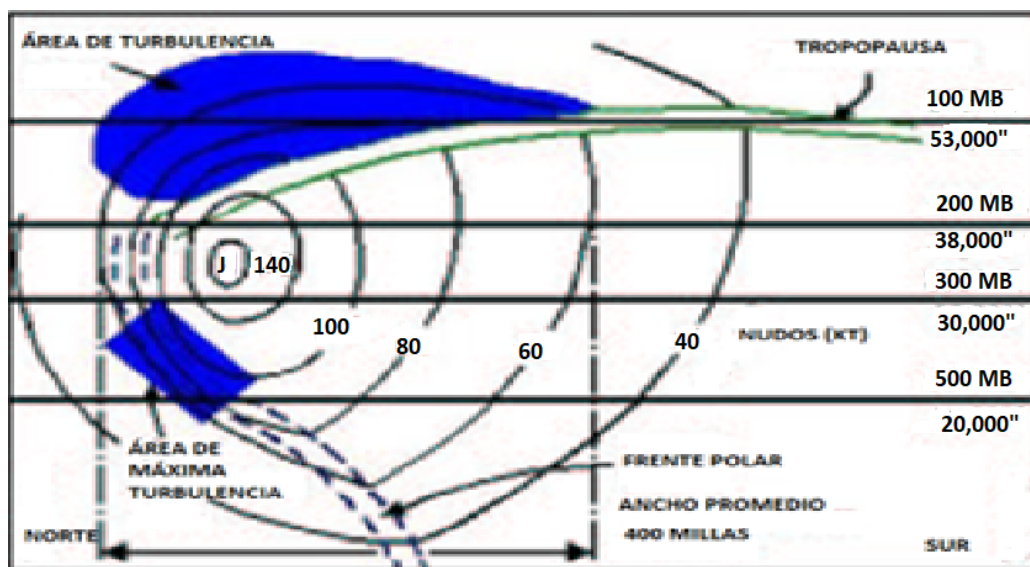


Figura 5. Áreas probables de turbulencia en la corriente en chorro;
FUENTE: (Mercer & Jiménez, 1999)

f. Jet confluyente

Cuando dos núcleos de corriente en chorro (jet stream) convergen dentro de 250 nm, aumenta el potencial de CAT. La Figura 6, muestra el área CAT potencial donde dos chorros se acercan una distancia de 5° latitud. Dado que el chorro hacia el polo generalmente se asocia con temperaturas más frías y es más bajo que el segundo chorro, el chorro hacia el polo a menudo socavará al otro y producirá fuertes cizalladuras verticales del viento. El potencial de CAT termina donde los chorros divergen a una distancia de más de 5° de latitud.



Figura 6. CAT con Jet Confluente
FUENTE: (Mercer & Jiménez, 1999)

g. Uso de la información en altura para pronóstico de CAT

Aquí hay algunas sugerencias para usar productos sinópticos en altitud para identificar las condiciones sinópticas favorables para la CAT, como se describe en otra parte.

- i. Análisis de alturas, temperatura y vorticidad potencial en 500 hPa. Clave sobre áreas de advección térmica, valles de onda corta y componentes de viento horizontal perpendiculares a las crestas de las montañas. También se puede utilizar un gráfico de 500 hPa para aproximar las posiciones de la corriente en chorro y el patrón sinóptico general de la altura del aire.
- ii. Corriente en chorro de 250 hPa. Analizar de cerca para determinar la posición actual y futura del núcleo de la corriente en chorro.
- iii. Análisis de Campos de Altura y Temperatura a 200 hPa. Se debe buscar algunas regiones de fuerte empaquetamiento de isotermas en asociación con un fuerte flujo de viento. Las isotermas de 200 hPa se corresponden estrechamente con el patrón de vorticidad de 500 hPa y claramente desprenden las ondas cortas y los sistemas en desarrollo.

2.5. La cizalladura del viento o Wind Shear (WS)

La definición más corriente es la siguiente: cambio de velocidad o de la dirección del viento en un determinado espacio con duración entre 3 a 40 segundos, inclusive las corrientes ascendentes y descendentes. Asimismo, se puede señalar que el WS es producido por cualquier fenómeno atmosférico o cualquier obstáculo material a la circulación de viento, que realiza un cambio en su velocidad o dirección (Mercer y Jimenez, 1999). Esto puede signifi-

car que una aeronave no pueda volar en su ruta de vuelo planificada (HKO, 2010). Como se conoce que WS es un peligro para la aviación, también es un fenómeno complejo y difícil de predecir, una dificultad particular es que las causas de WS pueden ser diferentes en diferentes lugares. En algunos lugares, la WS es causada por micro ráfagas, y en otros lugares puede deberse a fenómenos meteorológicos de meso escala asociados con los vientos predominantes estacionales y las topografías locales (Perez et. al, 1996; Shun, 2004).

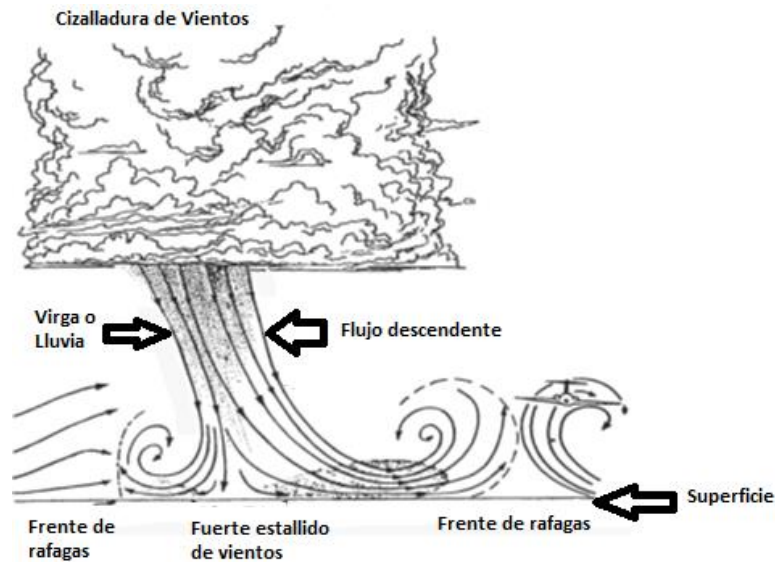


Figura 7. Cizalladura de Vientos, (FAA, 2008)

2.6. Diferencias entre Avisos de Cizalladura de Viento (WS) y Avisos SIGMET

Es importante puntualizar las diferencias entre los avisos de Cizalladura de Viento (WS) que son función del Pronosticador OMA y los avisos SIGMET emitidos por el Pronosticador OVM. En la siguiente tabla, se muestra un cuadro comparativo entre Avisos WS y Avisos SIGMET para poder diferenciarlos claramente.

Tabla 1. Comparación entre Avisos WS y Avisos SIGMET WS

	AVISOS WIND SHEAR	AVISOS SIGMET WS
Definición	Alerta por cambio significativo de la dirección e intensidad del viento	Aviso de fenómeno significativo que puede ocurrir en determinada área
Altitud	Cerca de la Superficie de Aterrizaje	Nivel Crucero
Fase de Vuelo	Fase de Despegue o Aterrizaje	Condiciones en Ruta
Ocurrencia	Aeródromo	Determinada Área de la FIR
Expedido por	Oficina Meteorológica de Aeródromo (OMA)	Oficina de Vigilancia Meteorológica (OVM)
Duración	No mayor a 2 horas	No mayor a 4 horas

2.7. Índices de turbulencia

De lo expuesto anteriormente es muy importante dar un buen pronóstico de (CAT) que puede derivar en un WS en las fases de despegue y aterrizaje, las más críticas para la aeronavegación. Por ello la importancia de definir los siguientes índices para el cálculo de CAT, para la presente investigación utilizaremos el número de Richardson (Ri) y el índice de Ellrod que son los más utilizados tomando como referencia el Documento OMM N° 770: “Métodos de Interpretación de los Resultados de la Predicción Numérica del Tiempo para la Meteorología Aeronáutica”. A continuación, se detallan los índices:

2.7.1. Número de Richardson

El número de Richardson (Ri) y sus componentes es bien conocidos para diagnóstico de turbulencia (Endlich, 1964; Kronebach, 1964; Dutton y Panofsky, 1970); La teoría y las observaciones han demostrado que al menos en algunas situaciones se producen parches de turbulencia en aire despejado por inestabilidades de Kelvin–Helmholtz. Esto ocurre cuando Ri se vuelve pequeño. Por lo tanto, teóricamente, las regiones de pequeños Ri deben ser regiones favorables para turbulencia, dónde se puede obtener el Ri a partir de las siguientes ecuaciones

$$N^2 = \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (1)$$

$$S_v = \left| \frac{\partial V}{\partial z} \right| = \left(\left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|^2 + \left| \frac{\partial v}{\partial z} \right|^2 \right)^{1/2} \quad (2)$$

Según las ecuaciones (1) y (2) se puede determinar Ri

$$Ri = \frac{N^2}{S_v^2} \quad (3)$$

Donde:

θ es la temperatura potencial

θ_e es la temperatura potencial equivalente

g es la aceleración de la gravedad

z es la dirección vertical

V es el vector viento horizontal con componente

Sv es Cizalladura de viento promedio

N es la frecuencia Brunt-Väisälä.

u y v son las direcciones este – oeste y norte – sur respectivamente.

Según los criterios de disponibilidad para la estabilidad atmosférica y características del flujo atmosférico:

Tabla 2. Clasificación Atmosférica según Ri

Condiciones	Criterios	Clasificación atmosférica
1	Ri = 0	Neutra
	Ri < 0	Inestable
	Ri > 0	Estable
2	Ri < -0.03	Convección libre
	Ri > -0.03	Convección Forzada
	Ri > 0.25	Estable
	Ri = 0	Neutra
	0.21 < Ri < 0,25	Kelvin - Helmholtz

FUENTE: (Stull, 1988)

2.7.2. Índice de Ellrod

Los índices de Ellrod (Ellrod & Knapp, 1992) se derivan a partir de simplificaciones de la función frontogénica. Este índice se puede calcular a base del producto de la deformación horizontal y la cizalladura vertical del viento derivado de los vientos pronosticados por modelos numéricos en altura.

Los predictores de deformación están dados por:

$$DSH = \left(\frac{dv}{dx} + \frac{du}{dy} \right) \quad (4)$$

$$DST = \left(\frac{du}{dx} - \frac{dv}{dy} \right) \quad (5)$$

Donde u y v son las componentes de vientos horizontal

DSH es la deformación cortante

DST es la deformación por estiramiento

$$\sqrt{DSH^2 + DST^2} \quad (6)$$

$$CVG = -\left(\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy}\right) \quad (7)$$

$$VWS = (\text{delta}V/\text{delta}Z) \quad (8)$$

El índice resultante se calcula sobre capas específicas y viene dado por:

$$\text{IndicedeEllrod} = VWS * (+CVG) \quad (9)$$

Donde:

DEF es la deformación total

CVG es la convergencia

VWS es la cizalladura vertical del viento

Delta V es la variación de la velocidad del viento

Delta Z es la variación de la altura

Tabla 3. Clasificación de Intensidades del Índice de Ellrod:

Intensidad	Valor
Ligera-Moderada	4
Moderada	8
Moderada - Severa	12

FUENTE: (Ellrod y Knapp, 1992)

2.8. Modelos de Circulación General

(Schmidt, 2006), indica que un modelo de circulación general (GCM) es un modelo numérico de ecuaciones matemáticas que describe la circulación general de una atmósfera planetaria u oceánica. Se basa principalmente en las ecuaciones de Navier-Stokes en una esfera giratoria con parámetros termodinámicos para varias fuentes de energía y sumideros: radiación, calor latente, etc. Todas estas ecuaciones constituyen la base de programas informáticos complejos que se utilizan comúnmente para simular la atmósfera u océano de la tierra.

La atmósfera en GCM está dividida en capas. Aquí mencionamos brevemente que el modelo utilizado en este trabajo, corresponden al modelo Global Forecast System (GFS). Los niveles del modelo, son niveles atmosféricos continuos ya que siguen los contornos de la superficie de la Tierra en la troposfera inferior y media.

Sin embargo, el efecto de la orografía de superficie disminuye con la altitud hasta las capas verticales en la atmósfera superior (es decir, en la estratosfera superior y la mesosfera), cabe mencionar que la resolución de cuadrícula horizontal es de 50 km.

2.9. Sistema de Recolección de Datos AMDAR

El sistema de Recolección de Datos AMDAR busca aprovechar el sistema mundial de observaciones AMDAR (información meteorológica de los sensores de las aeronaves) para diversas aplicaciones en Meteorología. Estos datos meteorológicos obtenidos a bordo constituyen una información meteorológica en altura muy importante en el Sistema Integrado de Observaciones Meteorológicas de la Organización Meteorológica Mundial OMM-WIGOS (WMO World Integrated Global Observing System por sus siglas en inglés)

Este sistema forma parte del Proyecto OMM Observaciones en base a Aeronaves -WMO ABO (Aircraft based Observations por sus siglas en inglés) que busca la implementación de un sistema de observación de aeronaves en los Centros Regionales Mundiales (CRM) y Servicios Meteorológicos Nacionales (SMN) a nivel mundial.

El sistema de Recolección de Datos AMDAR consiste en que los mensajes AMDAR (reportes automáticos hechos por sensores instalados por default a bordo de las aeronaves) puedan ser procesados por la computadora de vuelo para luego ser enviados de manera inmediata vía radio de Alta Frecuencia (HF por sus siglas en inglés High Frequency) y/o satélite utilizando el sistema ACARS. Esta información meteorológica vía ACARS llegaría al SMN para su decodificación y aprovechamiento en diversos productos meteorológicos como se muestra en la siguiente Figura 8:

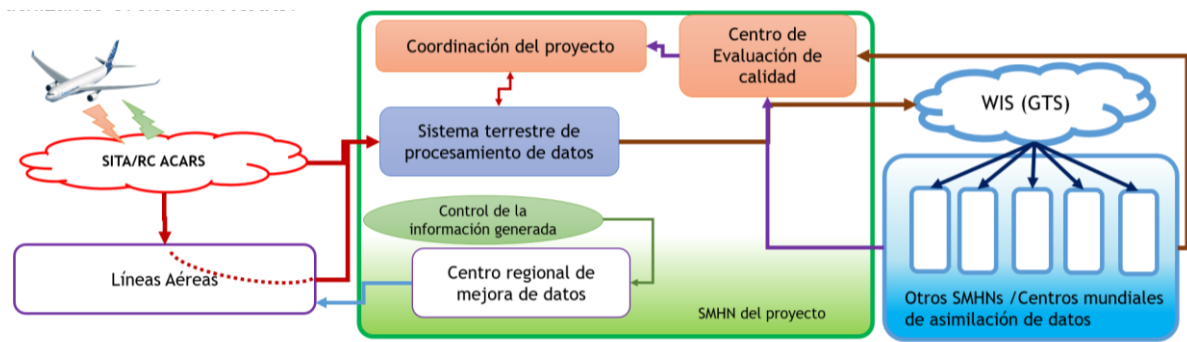


Figura 8. Sistema de Recolección de Datos AMDAR

FUENTE: Curso de Introducción datos meteorológicos a bordo de aeronaves, SMN Argentina

III. DESARROLLO DEL TRABAJO

En el presente trabajo monográfico se realizó un estudio de caso piloto de WS reportada en el Aeropuerto de Cusco con la finalidad de ver la aplicación de la metodología descrita y el uso de salidas gráficas numéricas que permitan la elaboración de avisos de WS no convectivo de manera anticipada. Si bien se hizo una recopilación de los reportes de WS desde el 2016 hasta el 2021, el estudio piloto se hizo para la fecha 09 de junio del 2018 desde las 12 Z hasta las 24 Z. Este trabajo teórico-práctico buscó recopilar información teórica de sinóptica de CAT y turbulencia de montaña, así como casos prácticos de estudios similares con el propósito de elaborar una propuesta metodológica de pronóstico de WS no convectivo, por lo que se tuvo en cuenta los siguientes pasos:

- a. La situación problemática es la carencia de avisos de WS o de avisos de aeródromos pronosticados en el Aeropuerto de Cusco. Únicamente se elaboran estos avisos cuando se tiene el fenómeno meteorológico in situ, reporte de aeronave o el aviso del detector de rayo del AWOS. Esto hace que los avisos sean emitidos de manera reactiva cuando el fenómeno ya se ha generado.

Así mismo, considerando que la WS es uno de los peligros más severos de la navegación aérea, el no contar con un aviso para este tipo de eventos de manera anticipada pone en alerta la seguridad operacional de los vuelos de salida o arribo en el Aeropuerto de Cusco.

Ante este problema, se buscó implementar un procedimiento metodológico para el pronóstico de WS no convectiva asociada a CAT en el Aeropuerto de Cusco.

- b. Gracias a la experiencia de más de 7 años en pronóstico de la ciudad y 5 años de pronóstico en el Aeropuerto de Cusco, se puede conocer la climatología de Cusco, condiciones meteorológicas y fenómenos recurrentes de la zona. Esto sumado a la formación profesional y, en particular, a la indagación realizada sobre la CAT y WS, tanto a nivel teórico-conceptual como sinóptico-práctica, permite proponer un procedimiento metodológico que ayude al pronosticador de la OMA Cusco a emitir estos avisos no convectivo pronosticado para la zona.

- c. CORPAC contará con avisos de WS no convectiva de manera anticipada, la cual permita una planificación y previsión de los vuelos ante una posible ocurrencia estos eventos en el Aeropuerto de Cusco.

Se brindará un servicio de pronóstico de calidad que contribuirá a la seguridad operacional ante la ocurrencia de WS. Lo cual hará que se reduzcan los riesgos de ocurrencia de un posible accidente o incidente grave debido a este evento.

Las compañías aéreas evitarían retrasos, vuelos frustrados y pérdida de combustible debido a la ocurrencia de WS. Esto a su vez beneficiaría a los pasajeros al tener una mejor experiencia de vuelo hacia o desde el Aeropuerto de Cusco.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Comportamiento de los Vientos en Superficie durante la ocurrencia de WS

A partir de la información de la Tabla 4 se seleccionó los datos de Viento Medio Horario procedentes del reporte AWOS II del día 09 de junio del 2018 donde se observan direcciones de viento promedio de SurSurOeste (SSW) a SurOeste (SW) con magnitudes promedio próximos de 2.12-3.79 m/s.

Tabla 4. Datos de Viento Media Horario de la Estación AWOS II – 09 de junio del 2018.

Hora	WIND_F	WIND_D	WIND_F10	WIND_D10	WIND_FX10	WIND_DX10
0:00	1,4	280	1,4	284	2,9	163
1:00	1,0	239	1,1	246	2,5	154
2:00	0,7	166	0,7	184	1,8	210
3:00	0,7	89	0,8	90	1,7	140
4:00	0,5	174	0,5	182	1,2	171
5:00	0,3	97	0,3	73	1,1	109
6:00	0,6	96	0,6	93	1,3	151
7:00	0,8	102	0,8	100	1,5	144
8:00	0,5	97	0,6	94	1,1	130
9:00	0,3	78	0,3	77	0,9	129
10:00	0,6	115	0,5	104	1,5	200
11:00	0,4	108	0,5	104	1,4	181
12:00	0,2	130	0,1	125	0,9	239
13:00	0,9	120	0,9	85	2,3	200
14:00	1,3	186	1,1	144	3,0	229
15:00	3,3	279	3,6	287	7,2	81
16:00	2,5	200	2,5	205	4,9	183
17:00	3,8	232	3,6	207	7,2	280
18:00	4,2	268	4,2	263	8,8	228
19:00	3,3	240	3,2	249	6,5	193
20:00	4,6	281	4,4	276	8,3	113
21:00	2,9	239	3,0	274	5,9	207
22:00	1,8	254	1,7	308	4,1	107
23:00	1,6	247	1,7	247	3,1	323

WIND_F y WIND_D: Velocidad y Dirección de Viento Instantáneo, respectivamente.

WIND_F10 y WIND_D10: Velocidad y Dirección de Viento Promedio en 10 min.

WIND_FX10 y WIND_DX10: Velocidad y Dirección de Viento Máximo en 10 min.

4.1.1. Variación Horaria del Viento en Superficie del AWOS II - 09 junio 2018

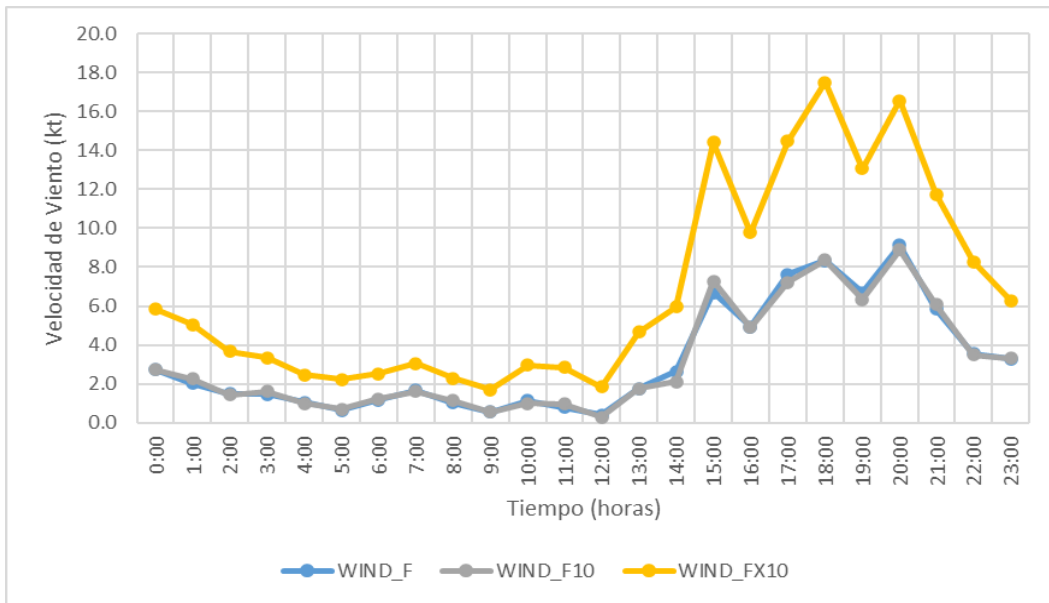


Figura 9. Variación Horaria de la Velocidad del Viento – 09 de junio del 2018

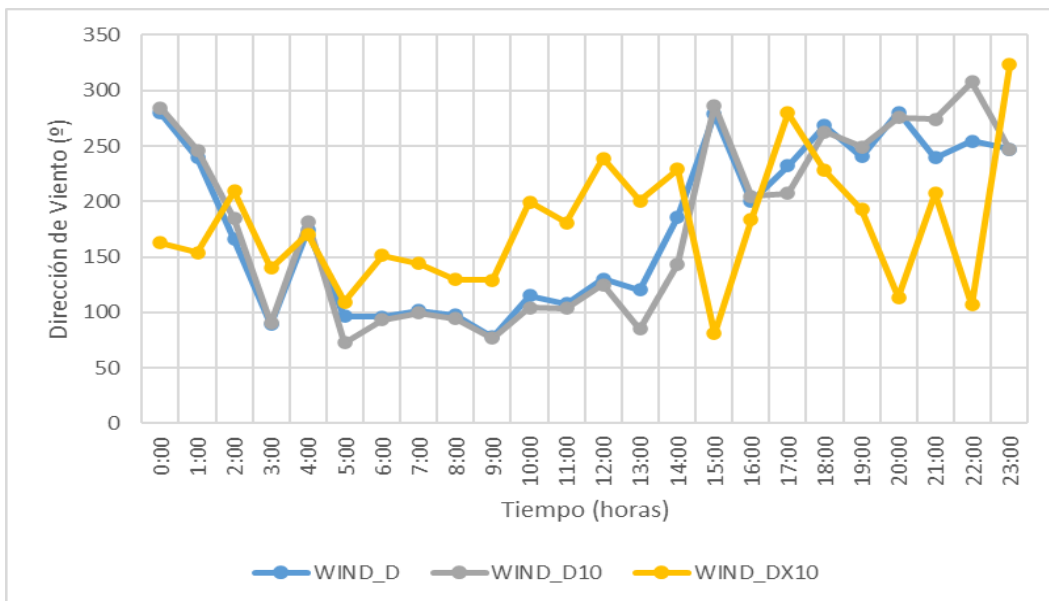


Figura 10. Variación Horaria de la Dirección del Viento – 09 de junio del 2018

Según el registro de ocurrencia para el 09 de junio del 2018 (véase Anexo N°3), el WS se reportó a las 21:15, por lo que se analizará horas previas, durante y horas posteriores al suceso.

En la Figura 9, se puede apreciar 3 picos de mayores intensidades de vientos registrados a las 15:00, 18:00 y 20:00 horas, siendo este último el más significativo, pero no llegando a ser tan relevante para evidenciar un cambio brusco y fuerte en la variación de la intensidad del viento.

Así mismo en la Figura 10, se puede apreciar que el cambio más brusco de variación de la dirección de viento (más de 200°) se evidencia 1 hora después de la ocurrencia del evento WS no siendo útil para identificar alguna variación brusca asociada a dicho evento.

Cabe señalar también que, si comparamos los valores de viento máximo con su climatología para junio 2018 (véase Tabla 5), resulta ser inferior. Descartando así la ocurrencia de alguna anomalía de viento máximo y de ráfagas precursores del WS.

Tabla 5. Climatología de Vientos Mensuales

AÑO	MES	DDD	VV	VIENTO MAX.
2018	JUNIO	W	3,2	270/19
	JULIO	W	2,9	360/15
	AGOSTO	W	3,8	010/18

DDD: Dirección de Viento; VV: Viento Medio

4.1.2. Rosa de Viento en Superficie del AWOS II – 09 de junio del 2018

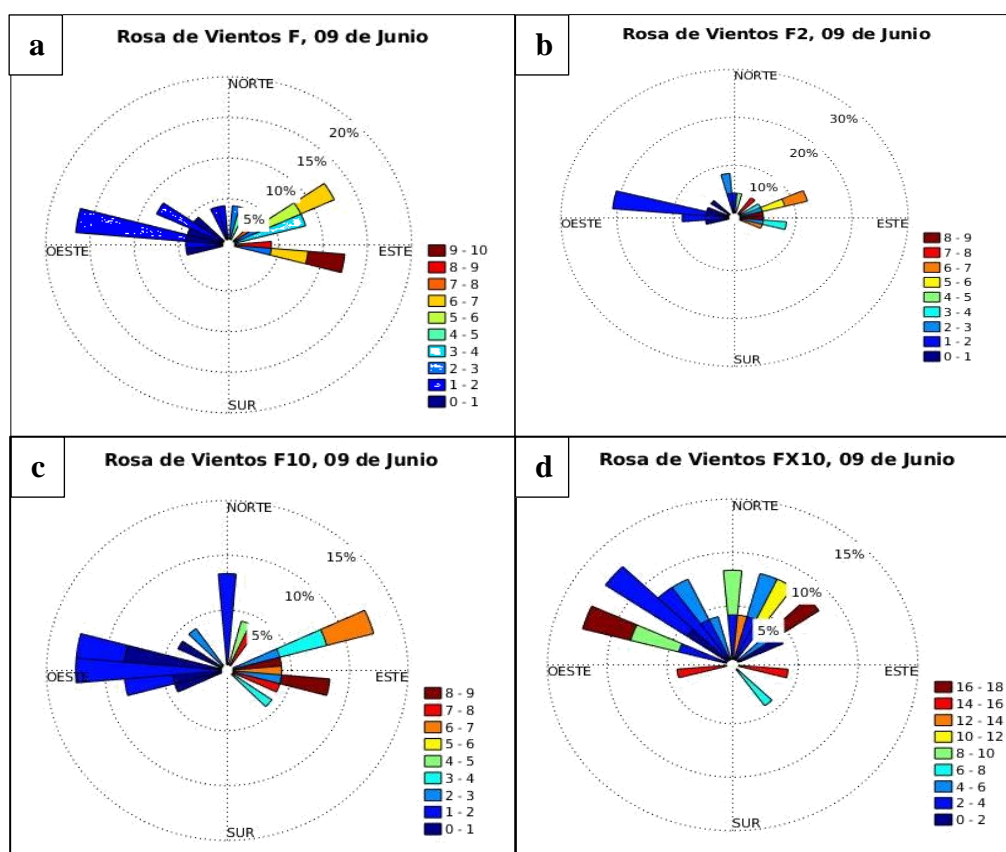


Figura 11. Rosa de Vientos en Superficie del AWOS II – 09 de junio del 2018.

En las figuras 11-a, 11-b y 11-c se observa un viento predominante del Oeste con intensidades menores a 3 kt; en cambio, los vientos de mayores intensidades son del Noreste y Este con intensidades que llegan hasta los 10 kt. Por otro lado, en la Figura 11-d, se mues-

tran vientos máximos predominantes variables de Noroeste a Noreste con intensidades de hasta los 18 kt.

En general, se puede apreciar en la rosa de viento, vientos de menor intensidad del oeste variando a vientos del este de mayor intensidad que podrían generar un WS.

4.1.3. Distribución de Frecuencia de Viento en Superficie del AWOS II - 09 de junio del 2018

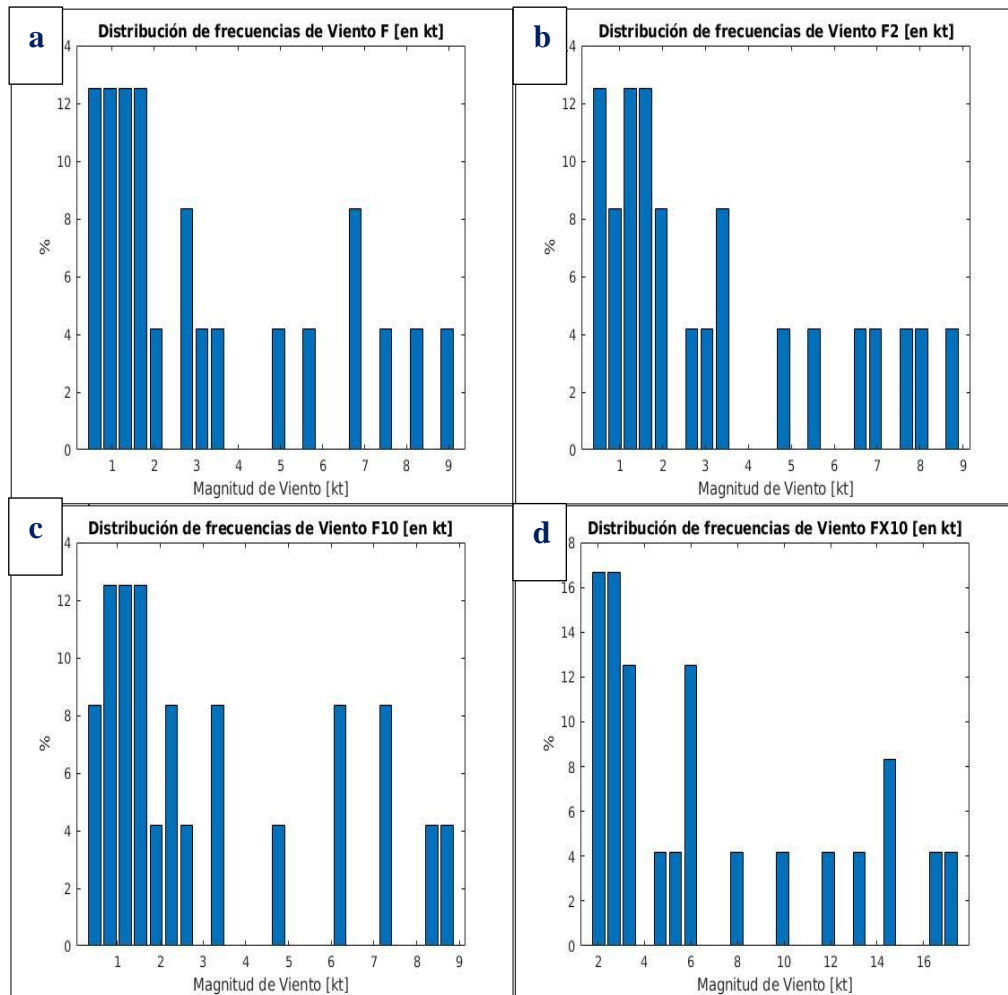


Figura 12. Distribución de Vientos en Superficie del AWOS II – 09 de junio del 2018.

Las figuras 12-a, 12-b y 12-c, muestran una distribución con mayor frecuencia de vientos de 0 a 4 kt y con valores de intensidades de viento próximos a los 9 kt. Para la Figura 12-d se aprecia una mayor frecuencia de vientos máximos de 2 a 6 kt, con vientos que llegan hasta los 18kt.

Según el comportamiento de los vientos se pudo observar intensidades de vientos registrados superiores a 15 kt entre las 15:00, 18:00 y 20:00 horas, observándose cambios bruscos de dirección superior a 200°, observándose una considerable frecuencia de vientos intensos

(8-10% de los casos) que podrían producir ráfagas y también generar la ocurrencia de WS, también se observó que pasando las 20:00 horas se identificó WS pasando las 20:00 horas. Según el Manual Meteorológico Previsor MMP (2001) sugiere que se debe de considerar datos de vientos frecuentemente no son representativas a escala sinóptica. Sin embargo, nos permitiría identificar eventos severos, haciendo imprescindible iniciar un pronóstico, lo cual hace que exista una estrecha relación entre los meteorólogos y la comunidad aeronáutica (OMM, 2003).

4.2. Cálculo de los valores de CAT y WS, utilizando salidas del WRF

4.2.1. Estimación de la CAT, usando los índices de turbulencia

Se utilizó el Número de Richardson (Ri) para una determinación del grado de estabilidad de la atmósfera y medir subjetivamente el grado de turbulencia, y el valor estimado de la CAT por medio del índice de Ellrod. Cabe mencionar que, existen más índices de turbulencia que se pueden utilizar para discrepar, pero se eligieron esos 2 índices por su alto grado de precisión.

Número de Richardson - 09 de junio del 2018

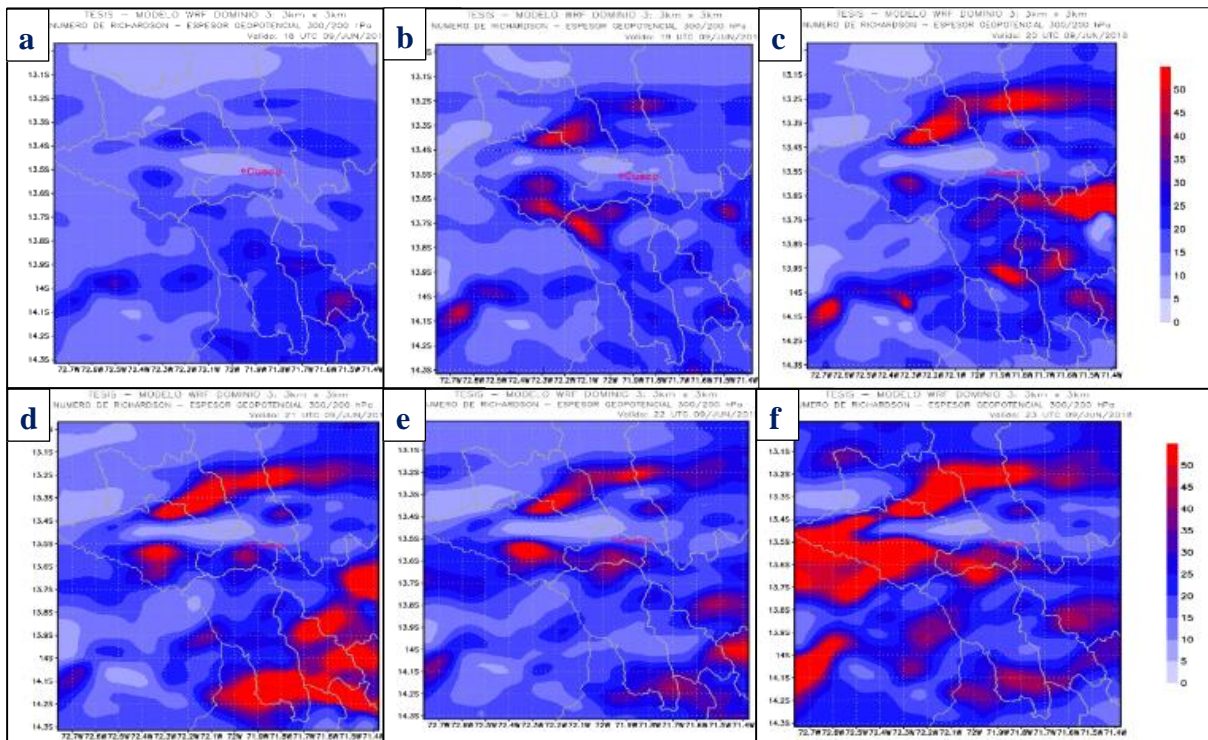


Figura 13. Número de Richardson horario para el Espesor Geopotencial 300/200 hPa en el Dominio 3 (Provincias de Cusco) - 09 de junio 2018 (18-23 Z)

En la Figura 13, podemos apreciar una evolución del Número de Richardson (Ri) durante las horas previas, de ocurrencia y posteriores del evento. Los valores del Ri van desde 10 a más de 30, que es un valor de alta estabilidad atmosférica, flujo laminar y una cizalladura débil, según las tablas 1 y 2 presentadas previamente. Llegando a registrar valores de más de 30 durante la hora de ocurrencia (21 Z) del WS en la estación de Cusco (Figura 13-d).

Estas características de una muy fuerte estabilidad atmosférica están relacionado a condiciones de convección nula y cielo despejado, muy propicias para la formación de CAT. Por lo que se podría relacionar la ocurrencia de WS en niveles bajos a la CAT (Davison, 2017; Kaplan et. al, 2006; Arruda et. al, 2007)

Índice de Ellrod - 09 de junio del 2018

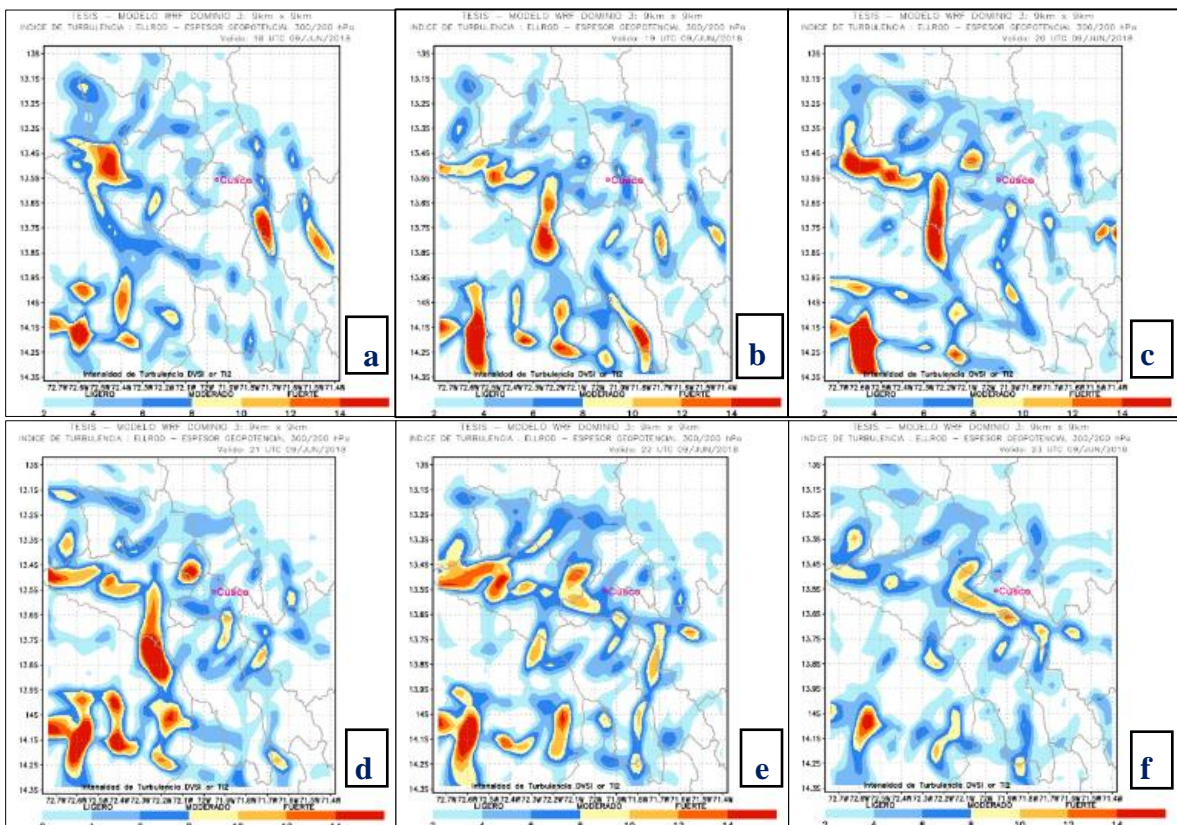


Figura 14. Índice de Ellrod horario para el Espesor Geopotencial 300/200 hPa en el Dominio 3 (Provincias de Cusco) - 09 de junio 2018 (18-23 Z)

En la Figura 14, podemos apreciar la evolución horaria del índice de Ellrod, utilizado directamente para estimar la CAT, con valores que van desde 0 hasta 8 en la estación de Cusco. Para que sea considerado un fenómeno significativo la intensidad debe ser moderada o fuerte. Si observamos justo en la hora de ocurrencia de WS y 1 hora después (21 y 22 Z) los valores del Índice de Ellrod son de 6 y 8, respectivamente que corresponden a una estimación de CAT de intensidad moderada (figuras 14-d y 14-e). Por lo antes expuesto se

puede decir que la ocurrencia del WS en niveles bajos está asociada a la CAT. Al estimar la CAT en el área de estudio, según los índices de turbulencia se obtuvo valores de índice de Ellrod de 6-8 considerándose de intensidad moderada indicando que la ocurrencia del WS en niveles bajos está asociada a CAT. Rivaben et. al (2018) indica que la existencia de condiciones turbulentas puede ser severas a escala de una aeronave si las ondas son de intensidad moderadas a fuertes como los valores obtenidos.

4.2.2. Estimación del WS usando las salidas de Cortante Vertical de Viento y el Diagrama Skew-T

Estimación de la WS usando las salidas de Cortante Vertical de Viento

Para esta sección, se emplearon las salidas de la Cortante Vertical de Viento para estimar un valor de WS en altura (como componente de la posible formación de CAT), determinando a su vez el valor y la hora de ocurrencia.

a) Cortante Vertical de Viento en Altura (200-250 hPa) – 09 de junio del 2018

A continuación, se analizarán las salidas gráficas de la Cortante Vertical de Viento en Altura (200-250 hPa) para identificar y determinar la posible componente de WS de la CAT en cada uno de los casos.

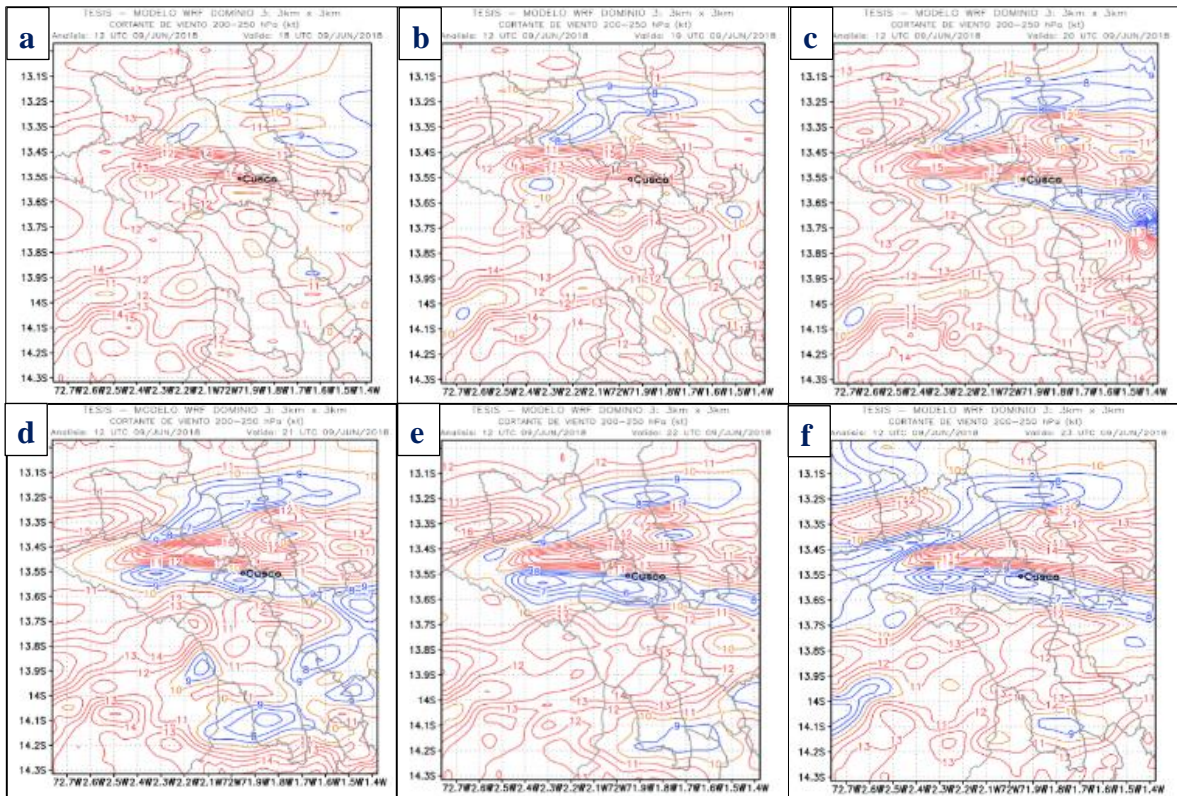


Figura 15. Cortante Vertical de Viento 200-250 hPa horario en el Dominio 3 (Provincias de Cusco) - 09 de junio 2018 (18-23 Z).

En la Figura 15, se muestra la evolución de la Cortante Vertical de Viento en altura horario durante el desarrollo del WS en superficie con valores de 12 a 7 kt en la estación de Cusco. Cabe resaltar que se muestran valores muy altos en la cortante vertical de viento presentando fuerte variación horizontal con valores desde 7 kt a más de 17 kt.

Por lo antes expuesto, podemos observar un fuerte componente de WS tanto en la vertical como en la horizontal de la CAT (Davison, 2017). Siendo esta última más fuerte en la hora previa, durante y posterior al evento de WS (20-23 Z) que estaría asociado a la CAT.

b) Cortante Vertical de Viento en niveles bajos (600-550 hPa) – 09 de junio del 2018

En las siguientes salidas gráficas de Cortante Vertical de Viento a niveles bajos (600-550 hPa) analizaremos la componente horizontal y vertical de WS para contrastar con la ocurrencia de WS, según el reporte.

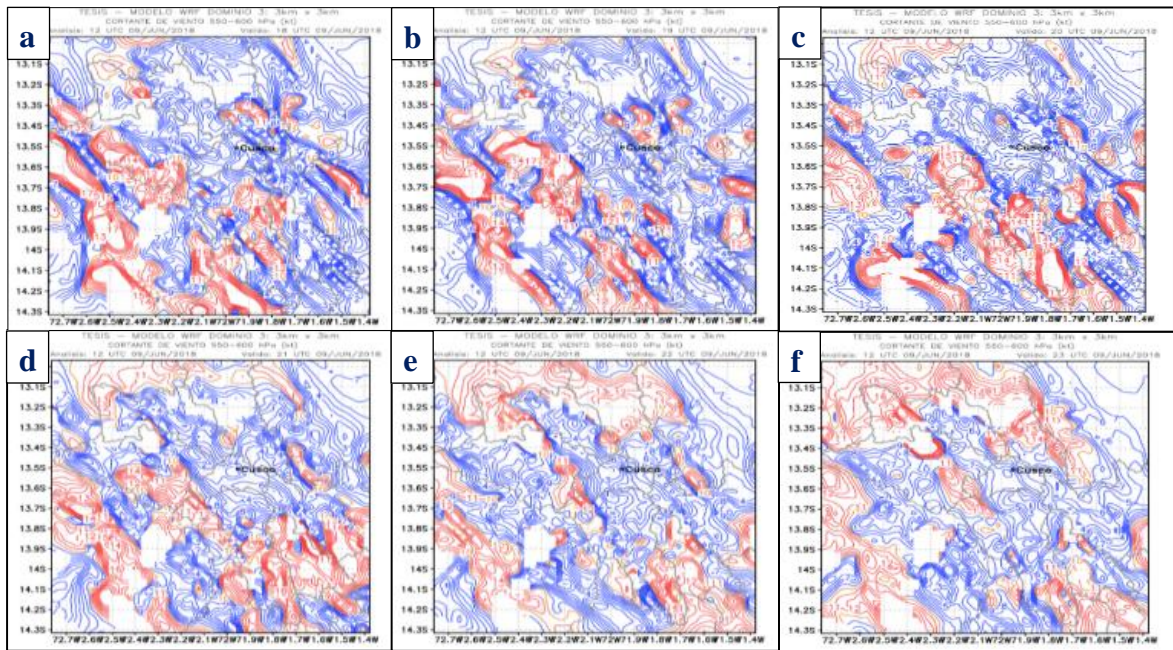


Figura 16. Cortante Vertical de Viento 600-550 hPa horario en el Dominio 3 (Provincias de Cusco) - 09 de junio 2018 (18-23 Z).

En la Figura16, podemos observar la variación horaria de las salidas de Cortante Vertical de Viento de niveles bajos (600-550 hPa) durante la ocurrencia de WS, con valores estables de 4 a 8 kt en la proximidad de la estación de Cusco. Para las horas previas a la ocurrencia de WS (18 y 19 Z) se observa una fuerte componente horizontal de WS (isotacas de viento apiladas). Sin embargo, durante la ocurrencia y horas posteriores se aprecia una débil componente horizontal de WS (isotacas de viento más dispersas). Además, no se

consideró la componente vertical de WS para el análisis por ser valores no significativos (menores a 10 kt) en la proximidad y en la estación de Cusco.

c) Estimación del WS usando el Diagrama Skew-T usando las salidas del modelo WRF (09 de junio del 2018)

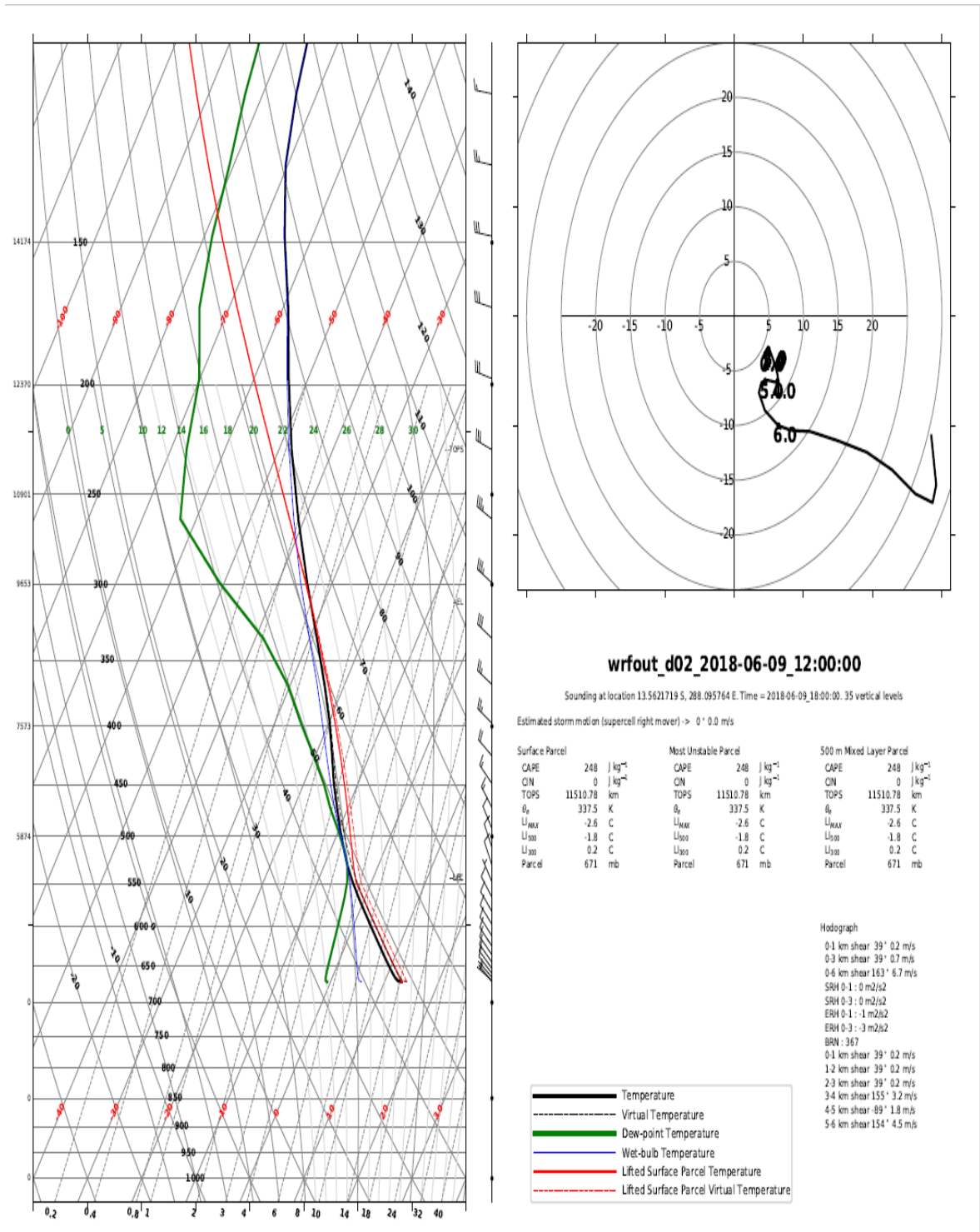


Figura 17. Diagrama Skew-T del Modelo WRF para la Estación de Cusco (09 de junio 2018) a las 18 Z (Dominio 2 – Región de Cusco)

Utilizando las salidas del dominio 2 del modelo WRF se realizó el análisis determinístico del Diagrama Skew-T a las 18 Z de los perfiles viento determinando la posible ocurrencia de WS asociado a la CAT. Así también se hará el análisis de las hodógrafas respectivos para la determinación de WS.

En la Figura 17, se muestra una atmósfera estable en las capas altas de la tropósfera (condiciones favorables para la formación de CAT), observando la configuración de las líneas de temperatura y temperatura del rocío.

Así mismo, en los perfiles de viento y las salidas y análisis de la hodógrafas no se puede apreciar la ocurrencia de una WS vertical que sea determinante (viento vertical menor a 10 kt en las capas de estudio). Sin embargo, si se puede apreciar un cambio en la dirección de viento en niveles bajos (llegando a cambiar en más de 100°) como se visualiza en la descripción de las hodógrafas.

Para lo antes mencionado, hay que tomar en cuenta que la hora de análisis del gráfico es las 18 Z, que corresponderían a 3 horas previas al evento de WS. Para poder hacer una determinación del WS se requieren diagramas Skew-T en horas a-sinópticas donde ocurre la WS (Kaplan et. al, 2006)

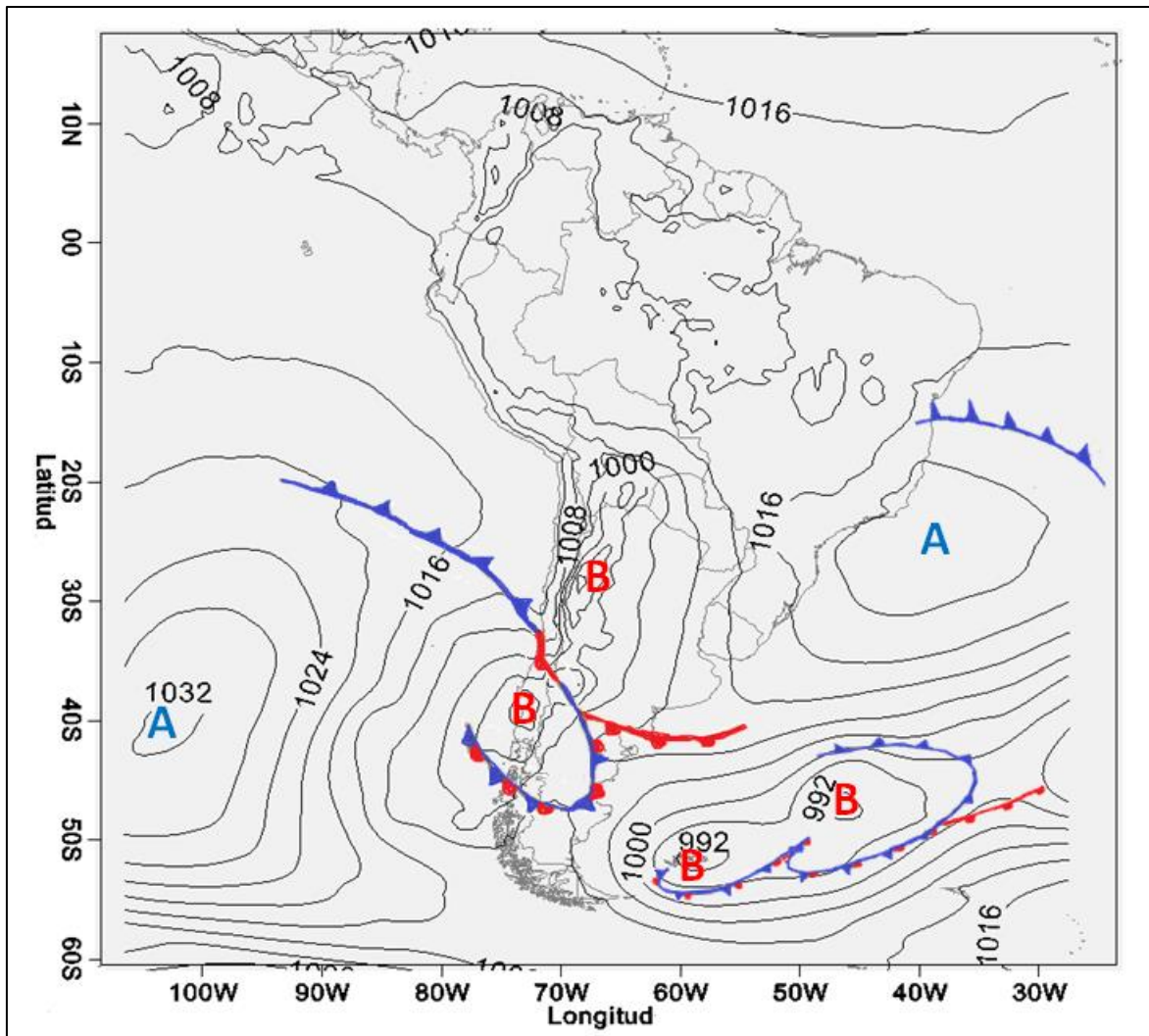
4.3. Análisis Sinóptico de posible ocurrencia de CAT, utilizando los Mapas de Superficie

Previamente a realizar un análisis más detallado de la sinóptica de ocurrencia de CAT asociado a los eventos de WS, es necesario haber determinado la probable ocurrencia de CAT en la sección anterior. Por lo que se descarta el análisis de los patrones sinópticos de CAT asociado al evento WS del 09 de julio del 2018.

4.3.1. Análisis Sinóptico de probable ocurrencia de CAT, utilizando los mapas de superficie y el Modelo Numérico WRF

Para esta sección, se analizaron los mapas sinópticos de superficie y las salidas gráficas del modelo WRF para cada una de las variables descritas en la metodología.

4.3.1.1. Análisis de los Mapas Sinópticos de Superficie y Corriente en Chorro (200 hPa) a



nivel de Sudamérica – 09 de junio del 2018

Figura 18. Mapas Sinópticos de Superficie a nivel de Sudamérica. 09 de junio del 2018 – 18 Z. Modelo GFS

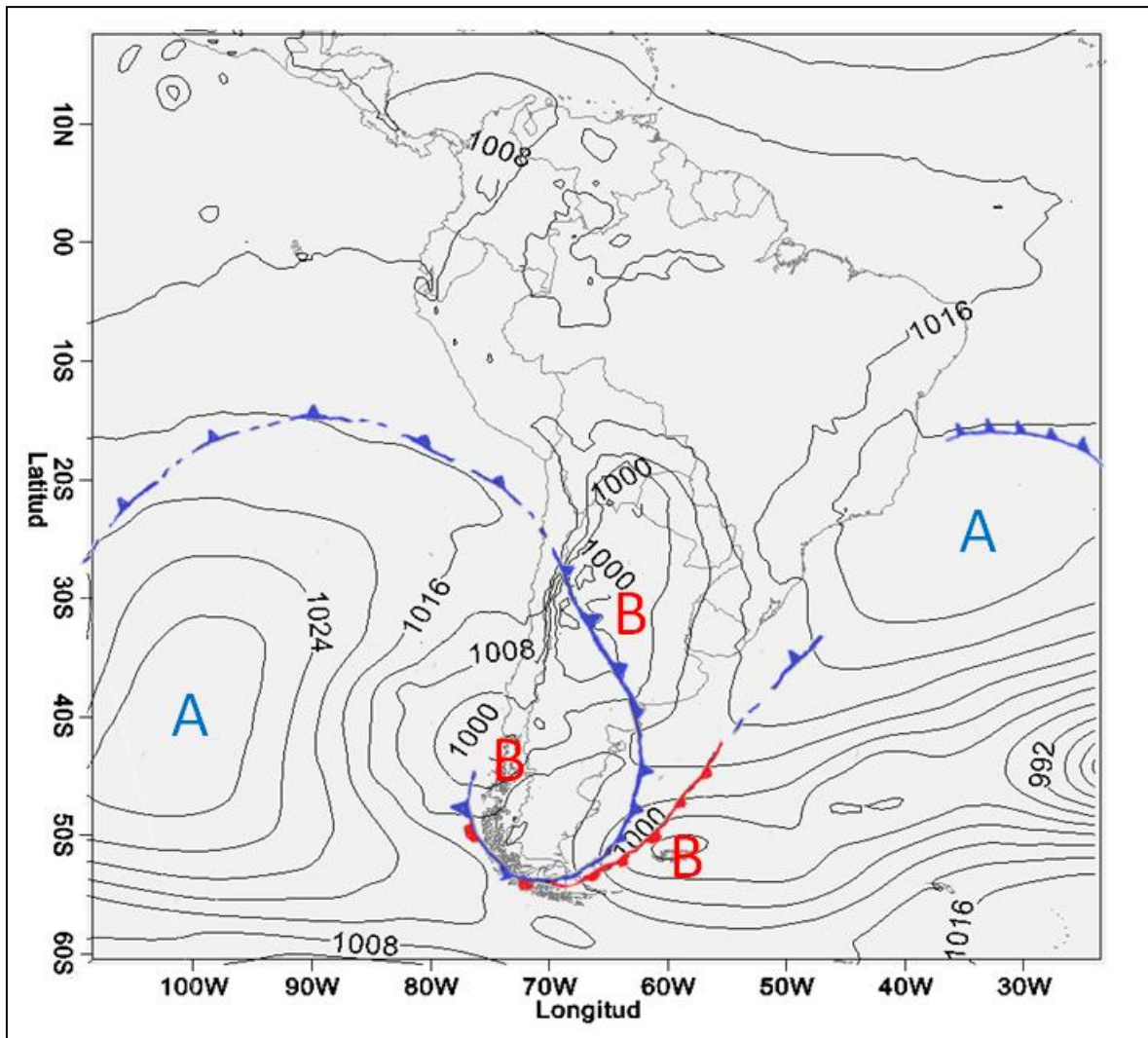


Figura 19. Mapas Sinópticos de Superficie a nivel de Sudamérica. 10 de junio del 2018 – 0 Z. Modelo GFS

Mediante la Figura 16, se describirán la evolución de los patrones sinópticos de Sudamérica a nivel de Superficie durante el desarrollo del WS asociado a la CAT.

Para la Figura 18, vemos que en la sierra sur del Perú está dominado por un sistema de baja presión producto del frente ocluido al sur de Argentina que puede traer condiciones de inestabilidad atmosférica y posible formación de sistemas convectivos de ingresar el sistema de baja presión. El Anticiclón del Pacífico Sur (APS) se ve debilitado por el frente frío y más retirado hacia el Océano Pacífico.

Por otro lado, si revisamos la Figura 19, observamos que el frente ocluido prácticamente ha desaparecido, solo se puede visualizar el frente frío. A su vez el APS está más fortalecido, y tiene una incursión hacia las costas litorales del sur del Perú. Esto trae consigo condiciones más estables de la atmósfera propicias para la formación de la CAT (Arruda et. al, 2007).

a. Corriente en Chorro (200 hPa) en el dominio sudamericano – 09 de junio del 2018

En la Figura 20, se muestra la evolución de la corriente en chorro (200 hPa) a nivel de Sudamérica dentro las horas de ocurrencia del WS, donde se puede apreciar claramente la presencia del jet subtropical y el jet polar muy cercanos.

Para el análisis más claro se ha encerrado en un círculo las áreas de confluencia de jet, que según la revisión literatura (véase apartado 2.4.1.) correspondería al área de potencial CAT y se han codificado con A1, A2 y A3.

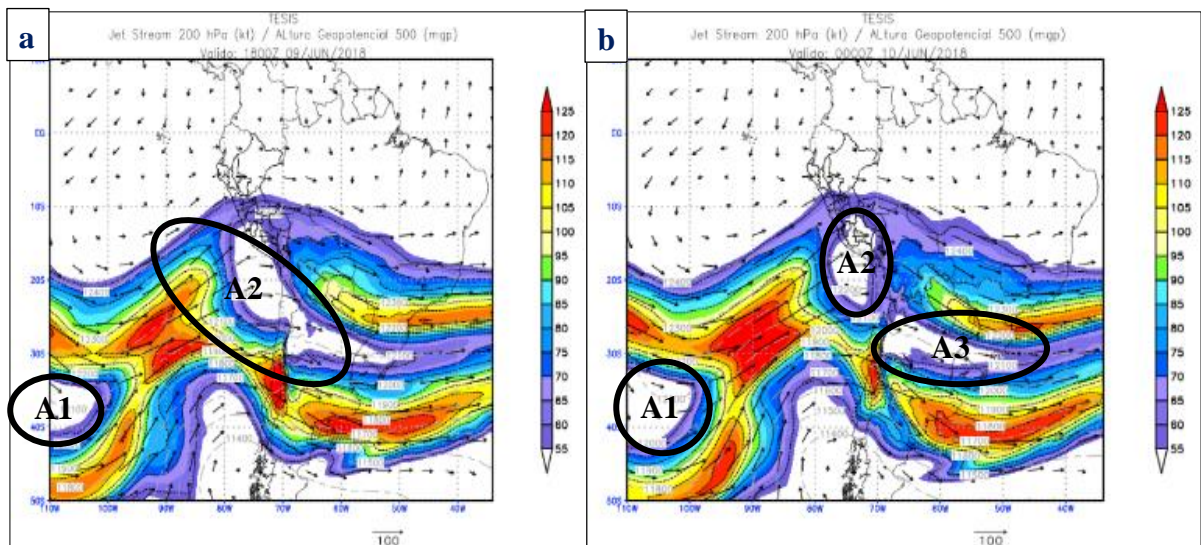


Figura 20. Corriente en Chorro (200 hPa). (a) nivel de Sudamérica. 09 de junio del 2018 – 18 Z (b) 10 de junio del 2018 – 0 z

Así podemos observar el A-2 en la Figura 20-a correspondiente a las 18z muestra un área de confluencia cerca de Cusco, y en la Figura 20-b vemos que esta área de confluencia (A-2) se posiciona justo en la región de Cusco. Lo que mostraría que durante la hora de ocurrencia del WS, la región de Cusco estaría dentro del área potencial de ocurrencia de CAT. A su vez Arruda et. al (2007), menciona que está área potencial de CAT podría producir fuertes cizalladuras verticales de viento.

Por lo que se podría afirmar que la WS del 09 de junio del 2018 estaría asociada a la CAT que muestra un patrón sinóptico de Jet Confluentes.

4.3.1.2. Análisis de los Patrones de Circulación de Vientos en niveles medios y altos – Provincias de Cusco

En esta sección, se emplearon las salidas gráficas de líneas de corriente en 200 y 500 hPa para el análisis de los patrones de circulación de viento en niveles medios y altos, respectivamente. Las salidas gráficas a estudiar estarán en el dominio 3 correspondientes a las provincias de Cusco

a. Líneas de Corriente 200 hPa – 09 de junio del 2018

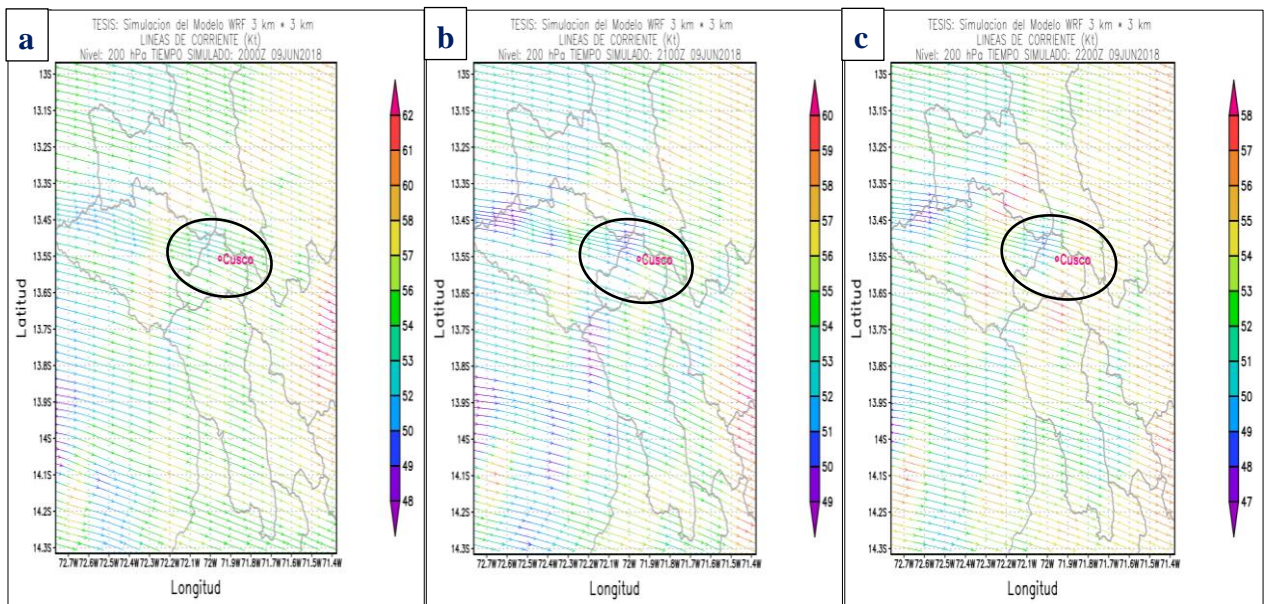


Figura 21. Líneas de Corriente en 200 hPa (a) 20Z, (b) 21 Z y (c) 22 Z (Provincias de Cusco)

En la Figura 21 se pueden apreciar el desarrollo de las líneas de corriente en 200 hPa durante la ocurrencia del WS, donde se destaca una difluencia de vientos por velocidad que se hace más intensa a las 21 Z (hora de ocurrencia del WS) aumentando de 48 kt inicial a más de 58 kt en el recorrido (en el área seleccionada - Figura 21b). Así mismo las líneas de corriente se hacen más espaciadas a las 21 y 22 Z.

Estos patrones de vientos del Oeste (asociados a aire seco) difluentes en niveles superiores son una de las características para la formación de CAT, según se describe en la revisión de literatura. Por lo tanto, se podría decir que el evento de WS está asociado a la ocurrencia de CAT. (Hopkins, 1977; Mercer & Jimenez, 1999)

b. Líneas de Corriente 500 hPa – 09 de junio del 2018

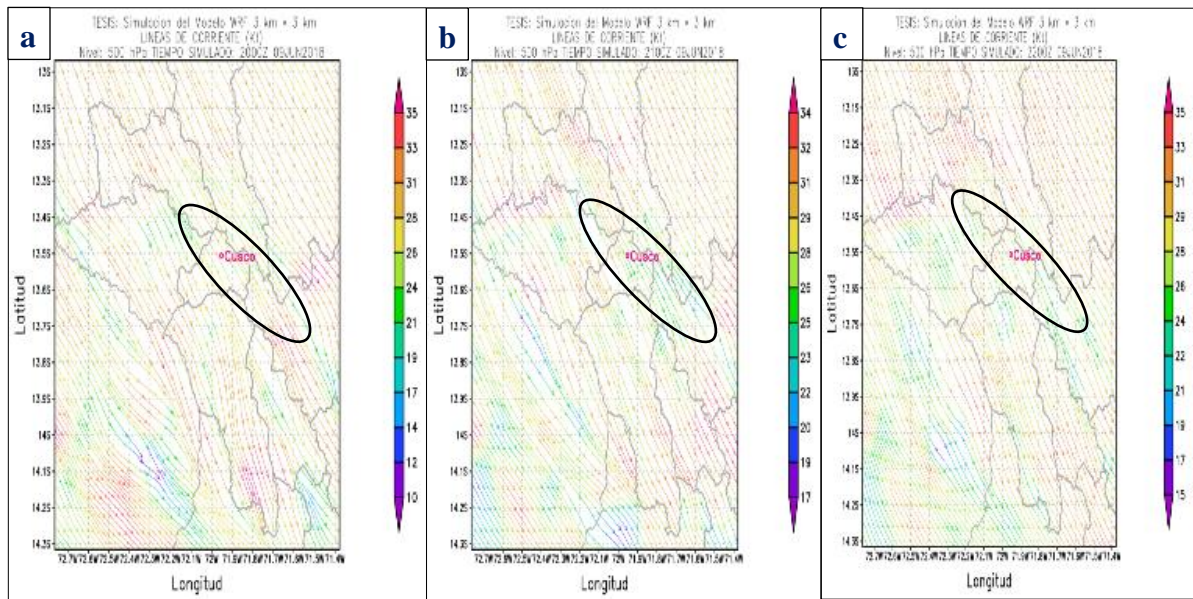


Figura 22. Líneas de Corriente en 500 hPa. (a) 20 Z (b) 21 Z y (c) 22 Z (Provincias de Cusco)

En la Figura 22 se puede apreciar el desarrollo de las líneas de corriente en 500 hPa durante la ocurrencia del WS, con vientos prevaecientes del Noroeste. Observamos que para la hora de ocurrencia del WS (Figura 22a) hay una banda estrecha de vientos intensos con una fuerte WS horizontal (ocasionada por variación en la intensidad de viento de menor a mayor por la estación de Cusco).

Esta configuración de banda estrecha de vientos intensos con una fuerte WS horizontal, corresponde a uno de los patrones en 500 hPa de formación de CAT descritos en la revisión de literatura (véase apartado 2.4.1.). Por lo tanto, se podría decir que el evento de WS está asociado a la ocurrencia de CAT.

4.3.1.2. Análisis de los Vientos ocasionados por Variaciones Térmicas en niveles altos – Provincias de Cusco

En este apartado haremos un estudio de los vientos en niveles altos ocasionados por una posible advección térmica de aire frío o cálido que puede producir condiciones de turbulencia y un fuerte WS horizontal. Para lo cual analizaremos las salidas graficas de Isotacas y Advección Térmica en 200 hPa.

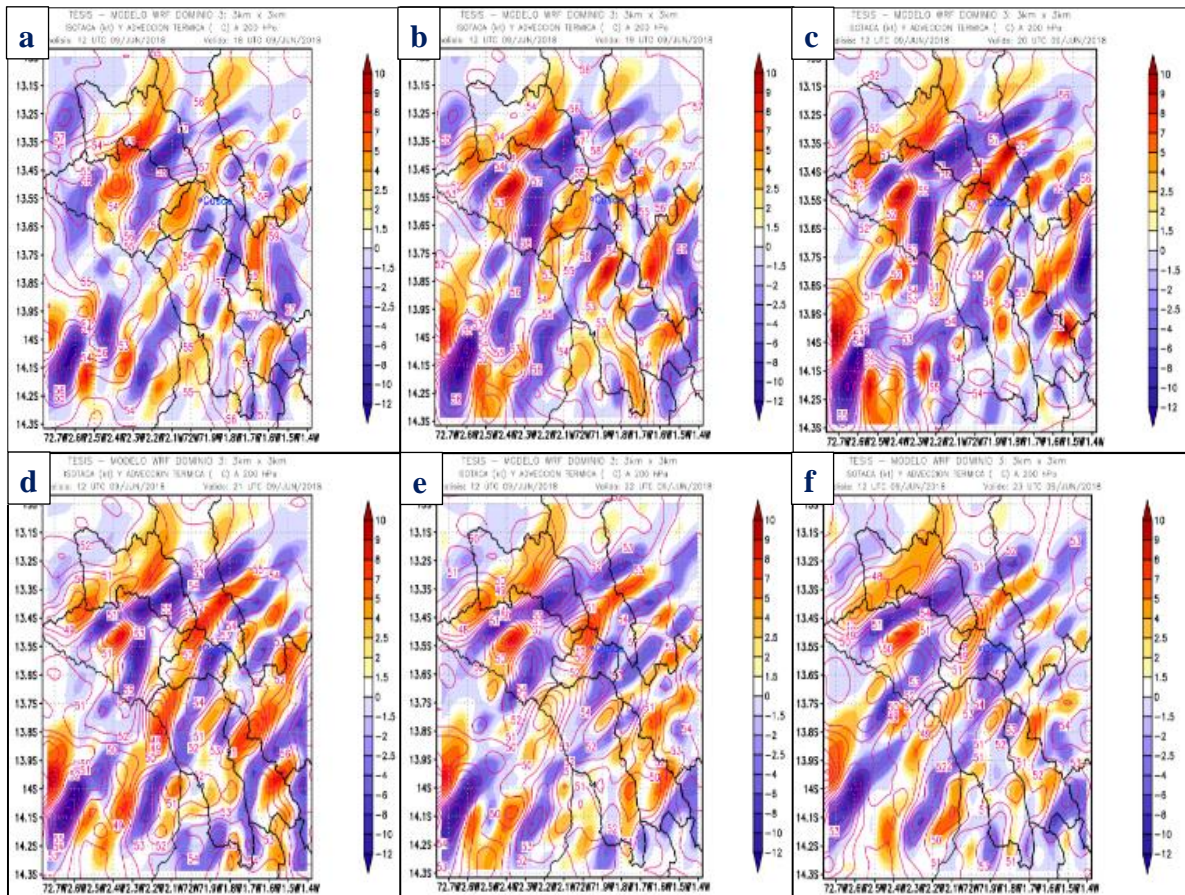


Figura 23. Isotacas y Advección Térmica a 200 hPa horario en el Dominio 3 (Provincias de Cusco) - 09 de junio 2018 (18-23 Z)

En la Figura 23, podemos apreciar la variación horaria de las isotacas y advección térmica a 200 hPa durante el período de ocurrencia de WS, donde se visualiza una advección de aire cálido hacia el oeste de la estación de Cusco y advección de aire frío hacia el este de la estación de Cusco y líneas de isotacas que van desde menos de 50 kt hasta más de 60 kt.

Se evidencia que para la hora previa y durante la ocurrencia de WS se hace más intenso la advección térmica de aire cálido y frío, acompañado con isotacas de viento más intensas con una considerable WS horizontal (figuras 23-c y 23-d) con valores que van desde 47 a 55 kt.

Por lo que se podría determinarse que se dieron condiciones de fuerte advección térmica acompañada con una considerable WS horizontal en 200 hPa, que son propicios para la ocurrencia de CAT durante la ocurrencia del WS en niveles bajos (Davison, 2017)

4.4. Sistema del procedimiento para pronóstico CAT y WS asociado

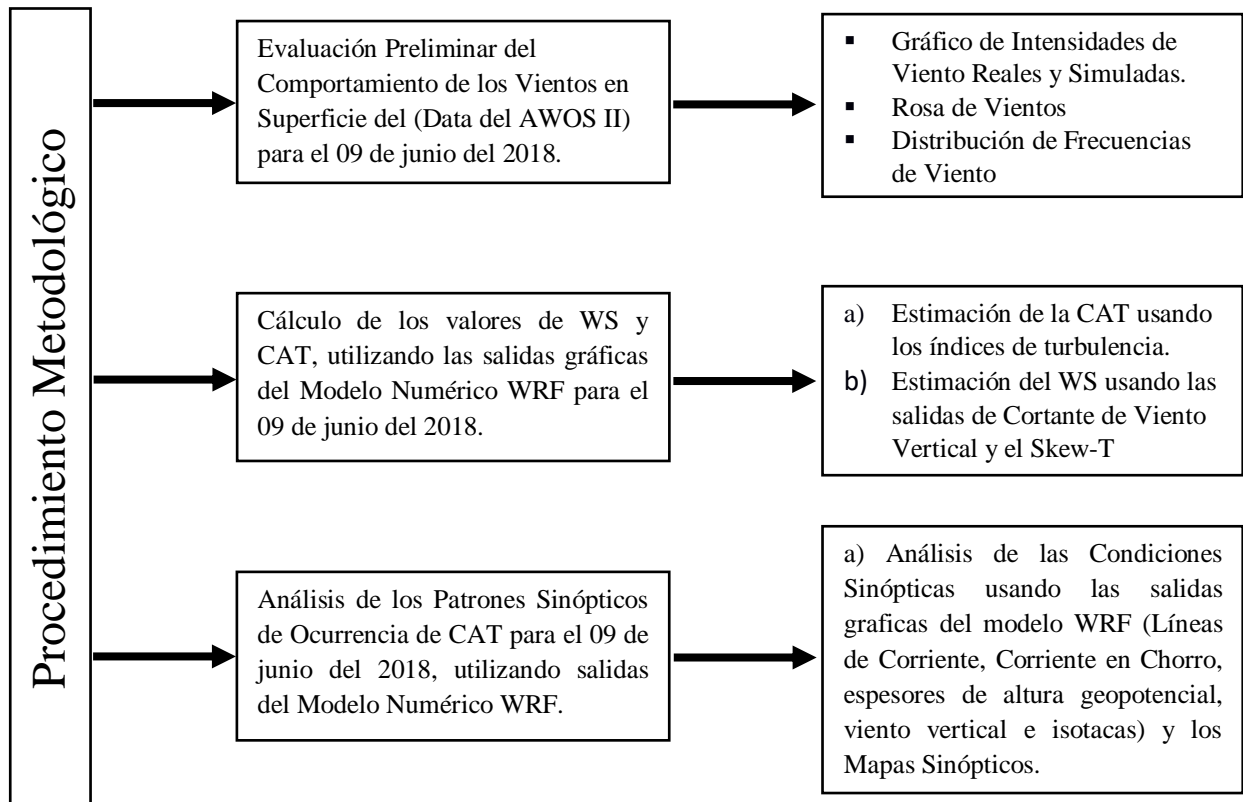


Figura 24. Flujo de procedimiento metodológico

La Figura 24 muestra el procedimiento metodológico para el estudio de caso aplicado el día 09 de junio del 2018, en el cual se detallan los procedimientos y análisis de los resultados para cada uno de los procesos.

En la Figura 25 se presenta el Diagrama de Flujo del Árbol de Decisiones para la emisión de un aviso de WS No Convectivo para la OMA SPZO.

Cabe señalar que tanto los criterios de decisión de emisión de avisos de WS no convectivo como las salidas gráficas constituyen guías de juicios de valor y herramientas que pueden ser aplicadas por el Pronosticador de la OMA SPZO. Este proceso puede ajustarse a criterio de cada pronosticador según crea conveniente.

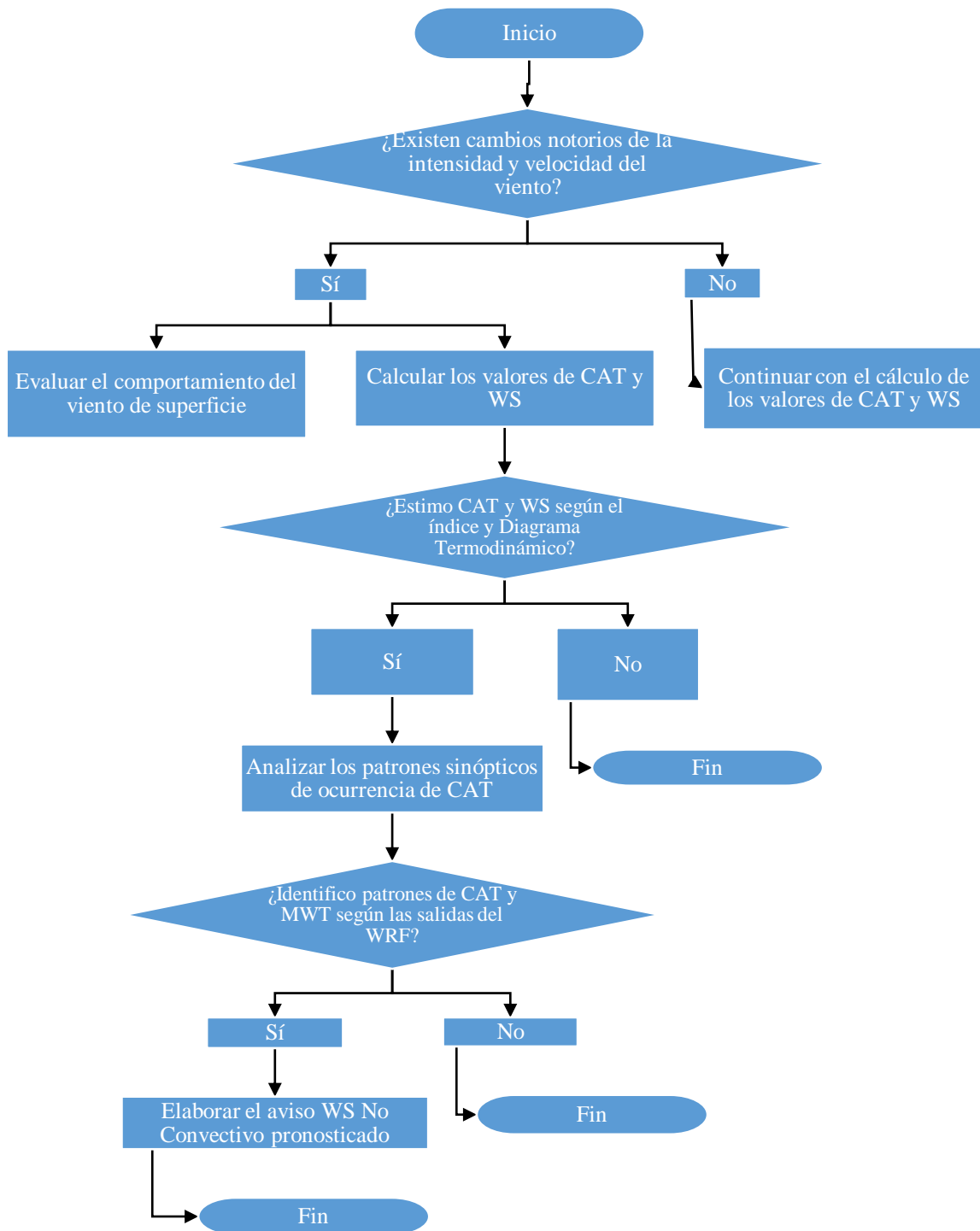


Figura 25. Diagrama del flujo: Árbol de decisiones para la emisión de avisos de WS no convectivo pronosticado

4.5. Propuesta de Manual de Procedimiento para Pronóstico de Cizalladura de Viento asociada a Turbulencia de Aire Claro OMA/SPZO

Según el Manual de Pronóstico meteorológico OMA/SPZO (Apartado 5.5. b.7); una de las funciones del Pronosticador Meteorólogo es la de emitir avisos de cizalladura de viento de la EMA asociada a la OMA, basados en pronósticos de cizalladuras de viento.

En ese sentido, se diseñó una propuesta de descripción de las actividades del Proceso de Pronóstico de Cizalladura de Viento asociado a Turbulencia de Aire Claro en base a las herramientas presentadas en el estudio de caso y a los criterios antes expuestos en el Árbol de Decisiones para emisión de avisos de WS No Convectivo pronosticado:

4.5.1. Datos de entrada y salida

Entradas

- a) Información meteorológica recibida (METAR, MET REPORT, SPECI y SPECIAL) del aeródromo de Cusco disponible en la PC de comunicaciones fijas aeronáuticas.
- b) Información meteorológica de superficie, altura y de modelos numérico meso escalar (WRF) y Global (GFS) de predicción para pronóstico de cizalladura de viento y fenómenos asociados: Número de Richardson e índices de turbulencia de aire claro, análisis de líneas de corrientes (200 hPa – 300 hPa – 500 hPa – 600 hPa), corriente en chorro, Cortante Vertical de Viento, Isotacas y Advección Térmica de Viento.
- c) Mapa meteorológico sinóptico real de superficie ploteado del hemisferio sur con información de isobaras, vientos, temperaturas, superficies frontales y nubosidad de 00, 06, 12 y 18 Z.
- d) Información de Perfiles Verticales como el Diagrama Termodinámico;
- e) Aeronotificaciones;
- f) SIGMET WS de Turbulencia de Aire Claro Moderada o Fuerte en ruta;

Salida

- a) Avisos y Alertas de Cizalladura de Viento No Convectivo

4.5.2. Procedimiento Para Pronóstico de Cizalladura No Convectiva

- a) El Pronosticador Meteorólogo en cumplimiento de sus funciones de vigilancia continua de las condiciones meteorológicas en el aeródromo de Cusco observa cambios significativos de la intensidad y/o variación del viento.
- b) Ante esta situación, el Pronosticador Meteorólogo procede a hacer una evaluación del comportamiento del viento en superficie utilizando los reportes meteorológicos aeronáuticos; y revisará los índices de turbulencia y CAT para estimar la posible ocurrencia de CAT empleando las salidas del modelo WRF.
- c) De obtener índices de turbulencia y CAT que estaría asociado a la ocurrencia de cizalladura de viento en superficie, se realizará un análisis sinóptico de los patrones de ocurrencia de CAT por medio de las salidas gráficas del WRF y los mapas sinópticos de superficie.
- d) Después de haberse identificado los patrones sinópticos que indican claramente la ocurrencia de CAT relacionado con los cambios significativos del viento en superficie, el Pronosticador Meteorólogo emitirá un aviso de cizalladura de viento pronosticado.
- e) Por último, el pronosticador Meteorólogo hará difusión del aviso de cizalladura de viento a la EMA y el Servicio de Tránsito Aéreo (ATS). Este aviso de cizalladura de viento deberá ser validado según los reportes de aeronaves para confirmar su pertinencia. En caso contrario, el aviso de cizalladura podrá ser cancelado.

V. CONCLUSIONES

- Por medio del análisis sinóptico de WS y CAT, se observó la posible ocurrencia de WS vertical en los niveles de aproximación de la aeronave usando las salidas de Cortante de Viento Vertical.
- Así mismo, la probable ocurrencia de CAT de intensidad moderada y una considerable WS tanto en la componente vertical y horizontal.
- **Evaluación del comportamiento del viento de superficie durante las horas de ocurrencia de Cizalladura de Viento.**
 - Respecto a la Variación Horaria de Viento se pudo observar que si bien se mostraron picos de intensidades de viento mayores no fue determinante para el análisis del WS para el 09 de junio del 2018.
 - Los gráficos de Rosa de Vientos y Distribución de Frecuencia de Vientos, si bien muestran un comportamiento del viento durante la ocurrencia del WS, no es determinante para un pronóstico ni monitoreo de la WS.
- **Cálculo de los valores de Turbulencia de Aire Claro y Cizalladura de Viento.**
 - Respecto al cálculo del Número de Richardson en niveles altos (200 hPa) para determinar las condiciones generales de la atmósfera, se evidenció condiciones de una fuerte estabilidad atmosférica propicia para la ocurrencia de CAT.
 - Estimando el índice de Ellrod se pudo comprobar la probable ocurrencia de CAT de intensidad moderada para el evento de WS del 09 de junio del 2018.
 - Los diagramas Skew-T si bien son de mucha utilidad para determinar la WS (análisis hodografas y perfil de vientos) in situ en la hora de ocurrencia, no fue de mucha relevancia analizarlos en horas sinópticas.

- **Análisis de los patrones sinópticos de ocurrencia de Turbulencia de Aire Claro.**
 - A nivel de Sudamérica, usando los mapas sinópticos en superficie y la Corriente en Chorro en altura, se evidenció condiciones de fuerte estabilidad atmosférica al incursionar el APS en la Región Sur del Perú y el patrón sinóptico de jet confluyente, principal factor para la formación de CAT en el evento WS del día 09 de junio del 2018.
 - A nivel Regional, si analizamos las salidas de líneas de corriente en 200 y 500 hPa, se pudieron encontrar patrones de vientos difluentes en niveles superiores y banda estrecha de vientos intensos con fuerte WS horizontal, respectivamente. Los cuales contribuirían a la ocurrencia de CAT.
 - Así mismo, las salidas de advección térmica en altura mostrarían una fuerte advección térmica de aire frío y cálido propicias para la ocurrencia de CAT.
- **Sistematización del procedimiento para pronóstico de Turbulencia de Aire Claro y Cizalladura de Viento.**
 - El Diagrama del flujo: “Árbol de decisiones para la emisión de avisos de WS no convectivo pronosticado” brinda al pronosticador OMA SPZO un criterio práctico de decisión para aplicar el flujo de procedimiento en la emisión de Avisos WS No convectivos para el aeropuerto de Cusco.
- **Elaboración del manual de procedimiento para pronóstico de cizalladura de viento no convectiva asociado a CAT en el aeródromo de Cusco.**
 - El documento antes expuesto constituye una propuesta de herramientas y pasos a seguir para la elaboración de un aviso y alerta de WS en el aeródromo de Cusco. Tanto el “Árbol de decisiones para la emisión de avisos de WS no convectivo pronosticado” como la “Propuesta de Manual de procedimiento para pronóstico de WSNC asociado a CAT” deben ser evaluados y analizados por los Pronosticadores Meteorólogos OMA/SPZO para su incorporación en un Manual de Procedimientos para Emisión de Avisos de Cizalladura de Viento, e implementados en la práctica diaria.

VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar más investigaciones de análisis sinóptico de CAT y WS para poder establecer técnicas y herramientas específicas de pronóstico. Inclusive faltaría mucho por investigar respecto a los casos de turbulencia convectiva que ocurren en el Aeropuerto de Cusco, como también en otros aeropuertos.
- Se requieren de datos meteorológicos del AWOS II con un adecuado control de calidad para describir el comportamiento de viento. Así también, contar con imágenes satelitales de mayor nitidez que serían de gran utilidad para un pronóstico de CAT.
- Sería necesario contar con diagramas Skew-T en horas sinópticas que contribuyan a poder pronosticar con mayor precisión los eventos de WS que ocurren en el Aeropuerto de Cusco. Para lo cual se sugiere la implementación del Proyecto AMDAR (Información meteorológica automática que se obtiene por los sensores instalados en las aeronaves con diversas aplicaciones para pronóstico meteorológico) en Perú.
- Se recomienda el uso del modelo WRF, con una mayor resolución espacial y parametrizaciones físicas acorde a la Región Cusco que contribuirían a la mejora del Análisis Sinóptico de CAT y WS en el Aeropuerto de Cusco.
- Se recomienda la aplicación de criterios y herramientas prácticas para la emisión de Avisos WS en el aeropuerto de Cusco, siguiendo el modelo descrito u otros similares.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angevine, W.M., White, A.B., & Avery, S.K. (1994). Boundary layer depth and entrainment zone characterisation with a boundary-layer profiler. *Bound. Layer Meteor.*, 68, 375 -385.
- Arruda Lyra, A., Sin Chan, C., & Pereyra Dereczynski, C. (2007). Indicadores de turbulencia a partir de previsoos do modelo regional Eta. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.22, n.2, 161-182.
- Arya, S.P., & Sundararajan, A. (1976). An assessment of proposed similitary theories for the atmospheric boundary layer. *Bound.-Layer Meteor.*, 10, 149 - 166.
- Davison, M. (2017). Turbulencia Pronóstico y Diagnóstico. Aircraft Turbulence. Recuperado de <https://www.wpc.ncep.noaa.gov/international/tmontpebody.html>
- De armas, A.M., Cremata, L., & Pérez, I. (2019). Caracterización de la dirección y fuerza del viento en el Aeropuerto Internacional "Abel Santamaria" en el periodo 2011-2015. *Revista Cubana de Meteorología*, v. 25(n. 1), p. 2.
- Dobrovolski, V.A. (2009). General Characteristics And Meteorology Of Wind. En E. E. Shpilrain, *Renewable Energy Sources Charged with Energy from the Sun and Originated from Earth-Moon Interaction* (pág. p. 16). Singapore: Encyclopedia of Life Support Systems.
- Due Rojo, A. (1954).El "Jet Stream" o río aéreo estratosférico. *Revista de Geofísica, Serie B*, Año VIII, vol. XIII, nº 64, p. 117-122.
- Dutton, J., & Panofsky, H. (1970). Clear air turbulence: A mystery may be unfolding. *Science*, 167, 937-944.
- Ellrod, G.P., & Knapp, D.I. (1992). An objective clear-air turbulence forecasting technique: Verification and operational use. *Weather and Forecasting*, 7(1), 150-165.
- Endlich, T. (1964). The mesoscale structure of some regions of clear-air turbulence. *J. Appl. Meteor*, 3, 261-276.

- Federal Aviation Administration (FAA). (2008). Wind Shear. Recuperado de:
<https://www.faa.gov/files/gslac/library/documents/2011/aug/56407/faa%20p-8740-40%20windshear%5Bhi-res%5D%20branded.pdf>
- Franziska, S., Yong, W., & Abdoulaye, H. (2019). Guías generales para la predicción inmediata. World Meteorological Organization, Vol 68 (2).
- HKO. (2010). Windshear and turbulence in Hong Kong-information for pilots. Hong Kong Observatory. Hong Kong: Hong Kong Special Administrative Region Government.
- Hopkins, R.H. (1977). Forecasting techniques of Clear-Air Turbulence including that associated with mountain waves. Suiza: World Meteorological Organization.
- Jacobson, M. Z. (2005). Fundamentals of Atmospheric Modeling, 2, Cambridge University Press, Cambridge. UK
- Kaplan, M.L., Charney, J.J., Waight, K.T., Lux, K.M., Cetola, J.D., Huffman, A.W., ... & Lin, Y.L. (2006). Characterizing the severe turbulence environments associated with commercial aviation accidents. A real-time turbulence model (RTTM) designed for the operational prediction of hazardous aviation turbulence environments. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 94(1), 235-270.
- Kronebach, G. W. (1964). An automated procedure for forecasting clear-air turbulence. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 3(2), 119-125.
- Legates, D.R., & McCabe, G.J. (1999). Evaluating the use of "Goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1):233-241.
- Ludlam, R.H. (1967). Characteristics of billow clouds and their relation to clear air turbulence. *Quar. J. Roy. Meteo. Soc*, 93, 419-435.
- Markel, G. (2010). Análisis de la sensibilidad del modelo WRF-ARW a los esquemas de capa límite y superficial.
- Mazon, J., Mason, J., Rojas, J.I., Lozano, M., Pino, D., Prats, X., & Miglietta, M.M. (2018). Influence of meteorological phenomena on worldwide aircraft accidents 1967-2010. *Meteorol. Appl.*, 25(2), 236-245.
- Mercer, G., & Jimenez, M. (1999). Air Force Weather Qualification Training Package. U.S: QTP TW 1W0X1.

- MMP. (2001). Manual Meteorológico Previsor. Dirección General Adjunta de tránsito Aéreo.
- OMM. (2003). Guía de prácticas para oficinas meteorológicas al servicio de la aviación. Ginebra-Suiza.
- Organizacion de Aviación Civil Internacional. (2005). Manual sobre Cizalladura del viento a poca altura. Quebec, Canadá: Primera Edición.
- Perez Munuzuri, V., Souto, M., Casares, J., & Pérez-Villar, V. (1996). Terrain-induced focusing of wind fields in the mesoscale. *Chaos Soliton. Fract.*, 7, 1479-1494.
- Racero Armario, C. (10 de Julio de 2012). Viabilidad de un Parque Eólico con Sistema de Almacenamiento de Energía Mediante el uso de Modelos de Predicción. Sevilla.
- Rivaben, N., Campetella, C., & Godoy, A. (2013). Análisis del entorno sinóptico de un caso de Turbulencia en Aire Claro severa en la cordillera de los andes.
- Rodríguez Jiménez, R.M., Benito Capa, A., & Portela Lozano, A. (2005). Meteorología y Climatología. Madrid, España: FECYT (Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología).
- Schmidt. (2006). Present-day atmospheric simulations using GISS ModelE: Comparison to in situ, satellite and reanalysis data. *J. Climate*, 19, 153 - 192.
- Sharman, R., & Lane, T. (2016). *Aviation Turbulence: Processes, Detection, Prediction* (523 pp.). Switzerland: Springer.
- Sharman, R. D., & Pearson, J. M. (2017). Prediction of energy dissipation rates for aviation turbulence. Part I: Forecasting nonconvective turbulence. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(2), 317-337.
- Shun, C. M. (2004). Wind shear and turbulence alerting at Hong Kong International Airport. *Bulletin of the World Meteorological Organization*, 53(4), 316-320.
- Stull, R. B. (1988). *An introduction to boundary layer meteorology* (Vol. 13). Springer Science & Business Media.
- Viñas, J. (2021). Corrientes en Chorro. Meteo. Recuperado de:
<https://www.divulgameteo.es/fotos/misarticulos/Corrientes-chorro-mundo-c%C3%A1lido.pdf>
- Willmot, C. J., Robeson, S. M., & Matsuura, K. (2012). A refined index of model performance. *International Journal of Climatology*, 32(13):2088-2094.

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Caso de Estudio de Turbulencia en Aire Claro en Argentina

**ANALISIS DEL ENTORNO SINÓPTICO DE UN CASO DE TURBULENCIA EN
AIRE CLARO SEVERA EN LA CORDILLERA DE LOS ANDES**

Nicolás RIVABEN 1,2, Claudia M. CAMPETELLA 1,3, Alejandro A GODOY 1,2

rivaben@smn.gov.ar

1Servicio Meteorológico Nacional (Ministerio de Defensa)

2Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de La Plata (UNLP)

3Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (FCEyN, UBA)

RESUMEN

El objetivo del trabajo es analizar los procesos de escala sinóptica que condujeron a un episodio de turbulencia (CAT) severa ocurrida en un vuelo Ezeiza – Pudahuel el 02 de agosto de 2012, sobre un punto de notificación aeronáutica conocida como “UMKAL”, sobre la frontera transandina. Mediante el análisis de imágenes satelitales y campos meteorológicos, se encontraron patrones de ondas de gravedad corriente debajo de una baja segregada, relacionadas con la turbulencia severa reportada.

ABSTRACT

The aim of this article is analyze the synoptic scale processes associated to a severe air clear turbulence event occurred in a flight Ezeiza - Pudahuel on 2 August 2012, near UMKAL notification point. Gravity waves patterns downstream a cut off low were related with the severe turbulence reported.

Palabras clave: turbulencia en aire claro, meteorología aeronáutica

Anexo 2. Estadísticas de los Eventos WS del Aeropuerto de Cusco

En el siguiente apartado, se recopilaron y procesaron los registros de WS desde el 2016 hasta el 2019 para realizar una estadística básica de los reportes, como se muestra a continuación:

Tabla 6. Número de Reportes WS registrados por mes y año en la OMA SPZO

NUMERO DE REPORTES DE WIND SHEAR REGISTRADOS POR MES EN LA OMA SPZO													
Año/mes	EN	FE	MA	AB	MA	JU	JU	AG	SE	OC	NO	DI	TOTA
s	E	B	R	R	Y	N	L	O	T	T	V	C	L
2016							3	4	3	2	3	2	17
2017	0	3	1	0	1	2	0	1	3	1	1	1	14
2018	1	1	0	0	1	1	2	3	1	0	1	2	13
2019	0	5	1	0	0	0	1	4	1	3	0	0	15
Total	1	9	2	0	2	3	6	12	8	6	5	5	59
Total (%)	1.7	15.3	3.4	0.0	3.4	5.1	10.2	20.3	13.6	10.2	8.5	8.5	100

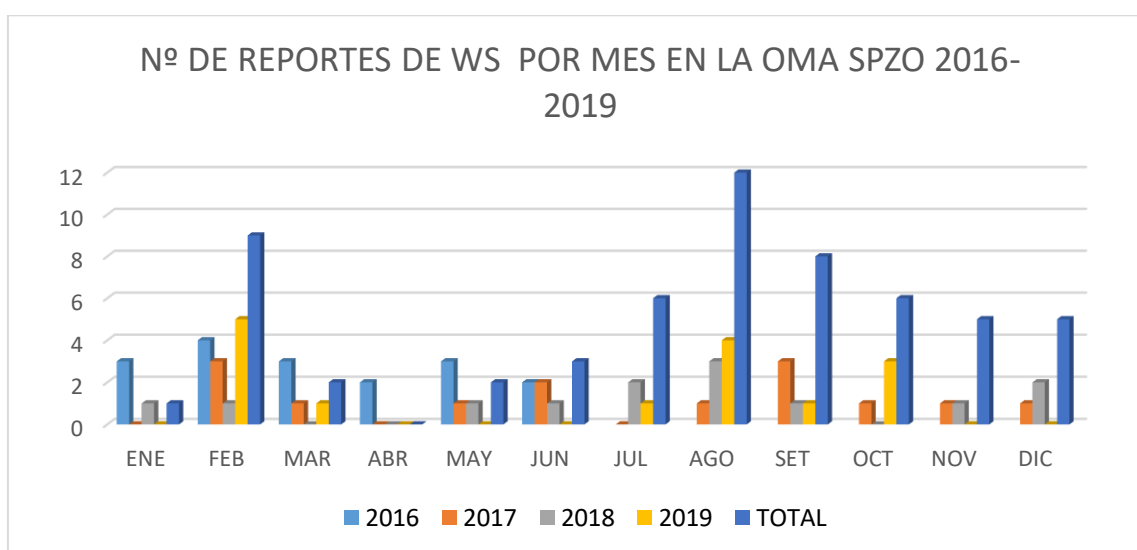


Figura 26. Gráfica de Barras de N° de Reportes WS por mes en la OMA SPZO (2016-2019)

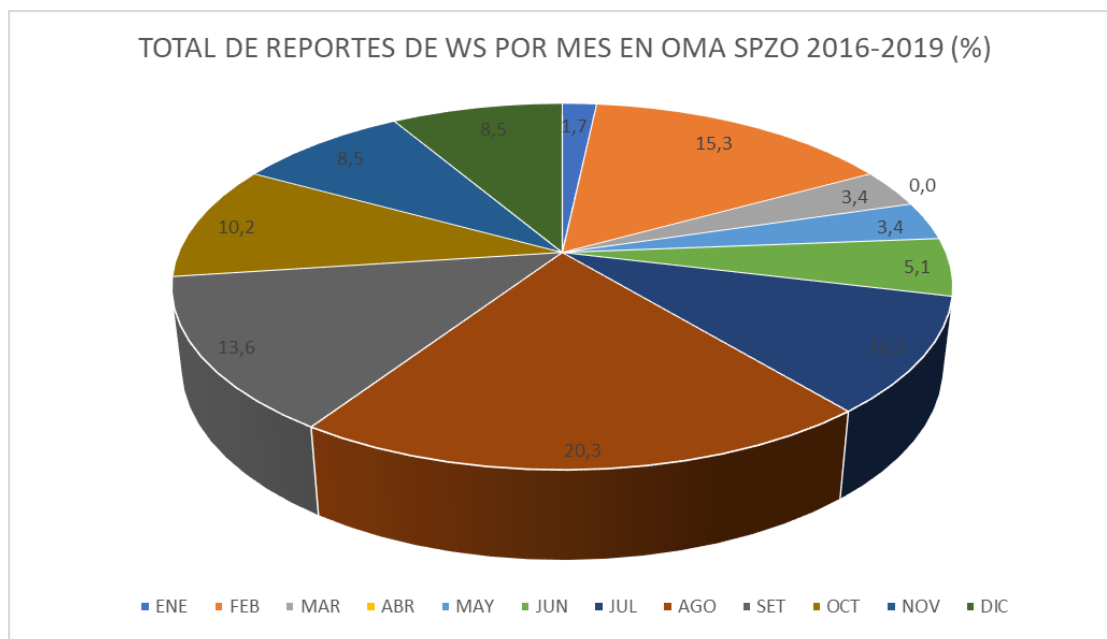


Figura 27. Gráfica de Torta (%) de Reportes WS por mes en la OMA SPZO (2016-2019)

En las figuras 25 y 26, podemos apreciar que la mayor cantidad de reportes se dan desde agosto hasta diciembre, incluido el mes de febrero. Se destaca el mes de agosto con la mayor cantidad de casos reportando 12 casos desde 2016 hasta 2019, que representarían más del 20% de los casos reportados en el año.

Tabla 7. Número de Reportes WS registrados por trimestre y anual en la OMA SPZO

NUMERO DE REPORTES DE WIND SHEAR POR ESTACION EN LA OMA SPZO					
Año \ Estación	DEF	MAM	JJA	SON	TOTAL
2016			7	8	15
2017	5	2	3	5	15
2018	3	1	6	2	12
2019	7	1	5	4	17
TOTAL	15	4	21	19	59
TOTAL (%)	25,4	6,8	35,6	32,2	100,0

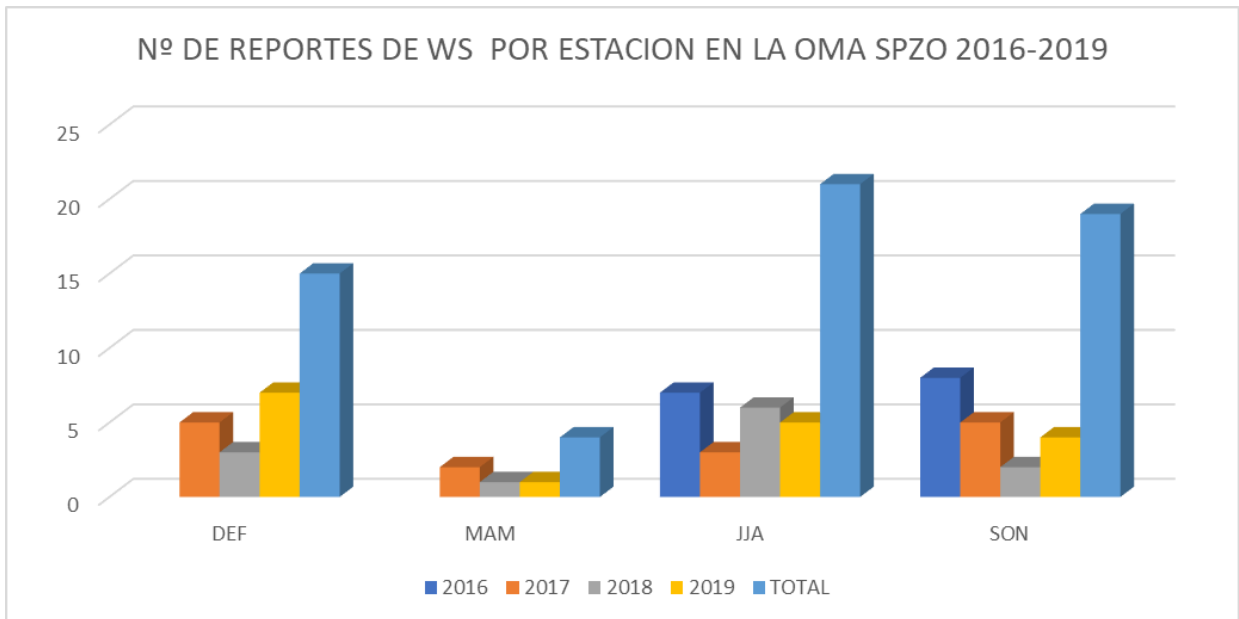


Figura 28. Gráfica de Barras de N.º de Reportes WS por estación en la OMA SPZO (2016-2019)

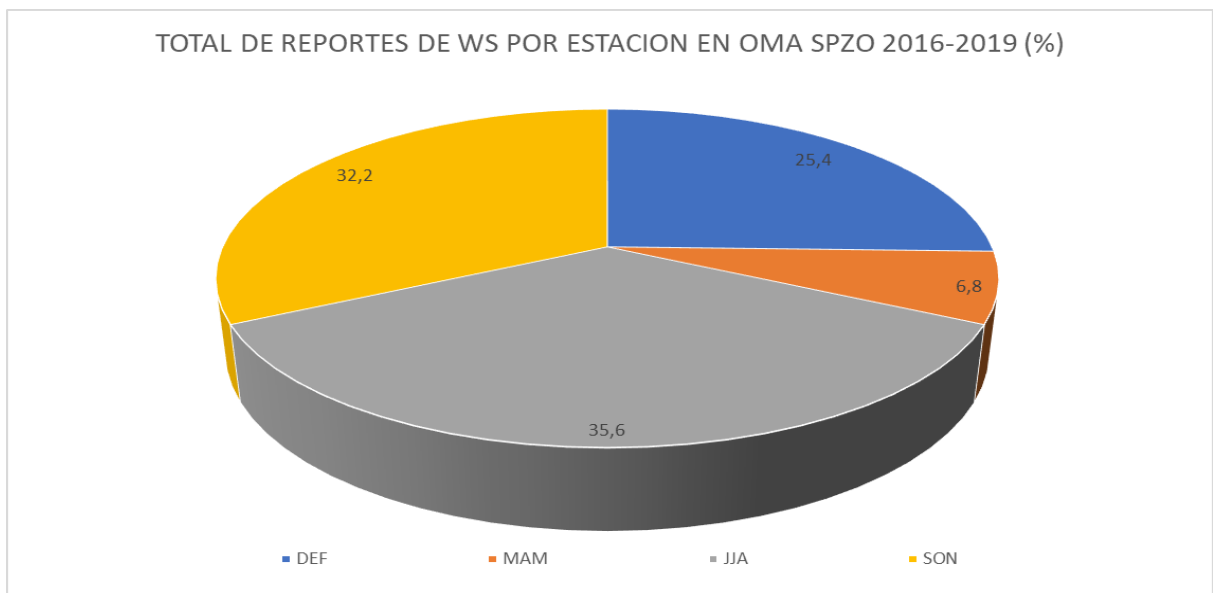


Figura 29. Gráfica de Torta (%) de Reportes WS por mes en la OMA SPZO (2016-2019).

En las figuras 27 y 28, podemos apreciar que la mayor cantidad de reportes WS se dan en los meses de invierno (junio, julio y agosto), seguido por los meses de otoño (setiembre, octubre y noviembre) y los meses de verano (diciembre, enero y febrero). Solo en las estaciones de invierno y primavera se reportan cerca del 70% de los casos de WS anuales en el aeropuerto de Cusco.

Anexo 3. Registro de Ocurrencias de WS en el mes de junio del 2018 –SPZO

Tabla 8. Registro de Ocurrencias WS CORPAC

CORPAC S.A.					AERÓDROMO: CUSCO						
AREA DE METEOROLOGIA AERONAUTICA					REGISTRO DE FENOMENO "CORTANTE DE VIENTO"						
					DIA: 01 AL 30		MES: JUNIO		2018		
DIA	IDENTIFIC.	TIPO DE	POS AERONAVE		HORA DE	NOTIFICACION DEL PILOTO	VARIACION DE VIENTO		HORA DE REPORTE DE WS		ALTITUD DE LA
	DE LA	LA	FASE DE VUELO		OCURRENCIA		(AERONAVE Y SUPERFICIE)		ELABORADO POR OMA		VARIACION
	AERONAVE	AERONAVE	A ó D	Nº Pista	(GMT o Z)		AERONAVE	ESTACIÓN	INICIO	FIN	EN PIES (FT)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
9	LPE2043	A319	A	RWY28	21:05	Ida al aire en Final Rwy28	320/30KT	320/7KT	21:15	22:00	11000

A: Aterrizaje; **D:** Despegue

Elevación Rwy28: 10,702 ft; Elevación Rwy10: 10,866 ft

Anexo 4. METARs para los días 09 de junio 12 Z – 10 de junio 00Z del 2018

METAR SPZO 091200Z 27002KT 9999 SCT040 SCT070 04/M00 Q1035 NOSIG RMK
TN02.1 BIRD HAZARD RWY 28 PP000=

SPECI SPZO 091215Z 00000KT 8000 -RA VCSH SCT010 SCT040 OVC070 07/04
Q1035 RMK BR BIRD HAZARD RWY 28=

METAR SPZO 091230Z 00000KT 9999 SCT040 SCT070 07/M00 Q1035 NOSIG RMK
HZ QUAD NE BIRD HAZARD RWY 28=

METAR SPZO 091300Z 00000KT 9999 FEW025 SCT040 09/00 Q1036 NOSIG RMK
HZ QUAD NE BIRD HAZARD RWY 28 PP000=

METAR SPZO 091330Z 06003KT 350V120 9999 FEW025 SCT040 11/M00 Q1036
NOSIG RMK HZ QUAD NE BIRD HAZARD RWY 28=

METAR SPZO 091400Z 05003KT 330V120 9999 SCT040 SCT060 12/M01 Q1035
NOSIG RMK BIRD HAZARD RWY 28 PP000=

METAR SPZO 091430Z 00000KT 9999 SCT040 BKN060 12/M02 Q1035 NOSIG RMK
BIRD HAZARD RWY 28=

METAR SPZO 091500Z 26004KT 240V320 9999 SCT043 BKN060 12/M01 Q1036
NOSIG RMK BIRD HAZARD RWY 28 PP000=

METAR SPZO 091530Z 29013KT 9999 SCT043 BKN080 12/00 Q1036 NOSIG RMK
RA QUAD N BIRD HAZARD RWY 28=

METAR SPZO 091600Z 27008KT 210V310 9999 FEW036 SCT043 BKN080 14/M00
Q1035 NOSIG RMK VIS 9000 QUAD E RA BIRD HAZARD RWY 28 PP000=

METAR SPZO 091630Z 26007KT 230V310 9999 FEW040 SCT043 BKN080 13/M00
Q1035 NOSIG RMK RA QUAD N BIRD HAZARD RWY 28=

METAR SPZO 091700Z VRB02KT 9999 FEW030 SCT043 BKN080 15/01 Q1034
NOSIG RMK VIS 9000 QUAD E BIRD HAZARD RWY 28 PP000=

METAR SPZO 091730Z 26009KT 180V330 9999 FEW030 SCT043 BKN080 14/00
Q1033 NOSIG RMK BIRD HAZARD RWY 28=

METAR SPZO 091800Z 27010KT 230V310 9999 FEW030 SCT043 BKN080 14/M00
Q1033 NOSIG RMK RA QUAD N BIRD HAZARD RWY 28 PP000=

METAR SPZO 091830Z 26009KT 180V330 9999 FEW030 SCT043 BKN080 14/00
Q1033 NOSIG RMK BIRD HAZARD RWY 28=

SPECI SPZO 091840Z VRB04KT 9999 VCSH FEW036TCU SCT043 BKN080 15/00
Q1032 NOSIG RMK TCU QUAD S BIRD HAZARD RWY 28=
METAR SPZO 091900Z 27015KT 9999 SCT043 BKN080 14/02 Q1032 NOSIG RMK
TCU QUAD S BIRD HAZARD RWY 28 PP000=
METAR SPZO 091930Z 25009KT 200V310 9999 SCT043 BKN080 15/00 Q1031 NOS-
IG RMK TCU QUAD SW BIRD HAZARD RWY 28=
METAR SPZO 092000Z 27019KT 9999 SCT043TCU BKN080 15/M00 Q1031 NOSIG
RMK TCU QUAD SE BIRD HAZARD RWY 28 PP000=
METAR SPZO 092030Z 28017KT 9999 VCSH SCT043TCU BKN080 14/01 Q1032
NOSIG RMK TCU QUAD E BIRD HAZARD RWY 28=
METAR SPZO 092100Z 29012KT 250V360 9999 SCT043 BKN080 13/02 Q1032 NOS-
IG RMK RA TCU QUAD N BIRD HAZARD RWY 28 PP000=
SPECI SPZO 092115Z 30009KT 270V040 9999 VCSH FEW040TCU SCT043 BKN080
13/01 Q1032 WS R28 NOSIG RMK VIS 9000 QUAD E RA TCU QUAD E BIRD HAZ-
ARD RWY 28=
METAR SPZO 092130Z VRB07KT 9999 VCSH FEW040TCU SCT043 BKN080 11/02
Q1032 WS R28 NOSIG RMK VIS 9000 QUAD E TCU QUAD E BIRD HAZARD RWY
28=
METAR SPZO 092200Z 36007KT 300V050 9999 VCSH FEW040TCU SCT043
BKN080 11/02 Q1032 NOSIG RMK TCU QUAD S TX16.2 BIRD HAZARD RWY 28
PP000=
METAR SPZO 092230Z 33006KT 300V010 9999 FEW040TCU SCT043 BKN080 11/02
Q1032 NOSIG RMK TCU QUAD E BIRD HAZARD RWY 28=
METAR SPZO 092300Z 33003KT 290V020 9999 FEW040TCU SCT043 BKN080 10/02
Q1033 NOSIG RMK TCU QUAD E BIRD HAZARD RWY 28 PP000=
METAR SPZO 092330Z 00000KT 9999 FEW050 SCT080 09/02 Q1033 NOSIG RMK
BIRD HAZARD RWY 28=
METAR SPZO 100000Z 31003KT 9999 -RA FEW040TCU SCT050 BKN080 10/02
Q1033 NOSIG RMK BIRD HAZARD RWY 28 PPTRZ=

Anexo 5. Presión Reducida a Nivel del Mar - Espesor Geopotencial 200/500 hPa en el Dominio 3 (Provincias de Cusco) - 09 de junio 2018 (18-23z)

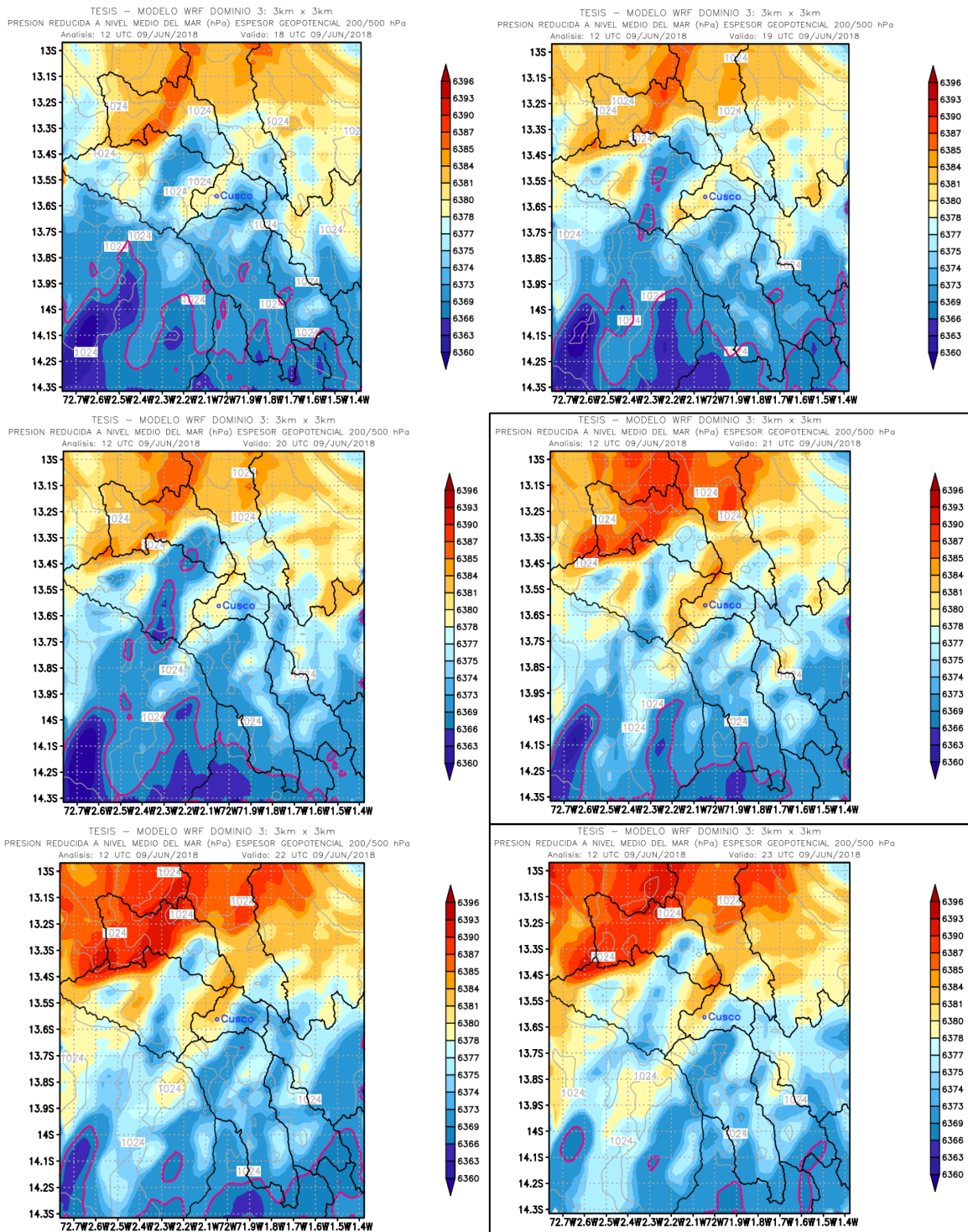


Figura 30. Presión Reducida a Nivel del Mar - Espesor Geopotencial 200/500 hPa en el Dominio 3 (Provincias de Cusco) - 09 de junio 2018 (18-23z)

Anexo 6. Noticias a nivel mundial – Iniciativa IATA para Sistema de Detección de CAT

AEROLÍNEAS

Detectará sistema de IATA Turbulencia en Aire Claro

19, diciembre, 2017



Figura 31. Desplazamiento de Avión

Por primera vez en la historia de la aviación, la Asociación de Transporte Aéreo Internacional (IATA), trabaja ya en la instauración de un sistema a nivel mundial que permite detectar la turbulencia en aire claro (CAT), un fenómeno que actualmente es 99 por ciento impredecible.

Se trata de una plataforma tecnológica, planeada para lanzarse en 2019, que trabaja con información de los mismos aviones que tienen la capacidad de medir la turbulencia y de transmitir en tiempo real esa información para que las tripulaciones sean alertadas por los servicios de tránsito aéreo en el lugar exacto donde se sintió.

Cuando un avión pasa por ahí (zona de CAT) y siente la turbulencia, en cuestión de segundos se transmite esa información a los centros de control para que la aeronave que viene cuarenta o cincuenta millas atrás pueda saber qué hace 3 minutos un avión reportó CAT, y eso es invaluable”, declaró Gilberto López Meyer, vicepresidente de seguridad de IATA. Según lo que explicó el directivo, los aviones vuelan más o menos a 6 o 7 millas náuticas por hora (velocidad de crucero), si una turbulencia es detectada a 50 millas, eso significa que el siguiente avión estará en la zona donde detectaron la turbulencia en 10 u 11 minutos, una capacidad de reacción muy rápida comparado con lo que ahora existe.

Una aerolínea de aproximadamente 100 aviones (como lo sería Aeroméxico) enfrenta entre 30 y 50 eventos de turbulencia al año que genera algún tipo de lesión: una persona que se le cayó la jarra de café o un sobrecargo que se golpeó la cabeza, o un pasajero que estaba saliendo del baño y se cae. “Es una herramienta invaluable, basada en información objetiva, medible y en tiempo real, que nadie podría tener más que la IATA”, agregó López Meyer.

Según Francisco Mc Gregor, piloto comercial (26 mil horas de vuelo) y especialista en investigación de accidentes, “pocas cosas, o casi ninguna, pueden ayudar a detectar una turbulencia tan especial y peligrosa como lo es la CAT cuando se vuela en cielo despejado y sin trazas de nubes alrededor”.

FUENTE: <https://aerolatinnews.com/destacado/detectara-sistema-de-iata-turbulencia-en-aire-claro/>