



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

METEOROLOGÍA AERONÁUTICA. ESTUDIO DE LOS
FENÓMENOS ATMOSFÉRICOS Y PRODUCTOS DE USO
AERONÁUTICO.

Autor

Luis María Mestre Buleo

Director/es

Director académico: Jesús Javier del Valle Melendo

Director militar: Juan Ramón Rodríguez Jiménez

Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar

2021-2022

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a Don Ignacio Quintana Trenor, a mi director académico y profesor Don Javier del Valle Melendo, a mi director militar Capitán Don Juan Ramón Rodríguez Jiménez y a Carolina Ortega Benedicto su desinteresada ayuda y apoyo a lo largo de la redacción de esta memoria.

RESUMEN

Desde tiempo inmemorial el ser humano ha observado el cielo para conocer su estado y así determinar que 'tiempo' hace y predecir los fenómenos que se darán. De este interés nace la meteorología, aquella ciencia encargada del estudio del estado de la atmósfera y de los procesos que en ella ocurren.

Esta técnica ha acompañado al ser humano desde los inicios de la ciencia y ha evolucionado con él y con el estado de la tecnología. Por ello, cuando el ser humano desarrolló los medios que empleaban el aire como fluido por el que viajar y observó que estos eran altamente influenciados por el estado de la atmósfera, la meteorología se hizo un todo con la aviación. Nació así, la meteorología aeronáutica.

El estudio que sigue se enmarca en esta técnica, y en él se lleva a cabo un análisis en profundidad acerca de los principales procesos atmosféricos que se dan en la troposfera y su afectación sobre los principales factores meteorológicos, como se desarrollan y de qué manera afectan al vuelo de las aeronaves, justificando así, su incidencia sobre los incidentes y accidentes que tienen lugar en este sector. Todo ello con el objetivo de elaborar una guía que permita a pilotos, tripulaciones y organismos pertinentes ser capaces de realizar un planeamiento adecuado de las operaciones, detectar y reaccionar ante la presencia de distinta fenomenología en vuelo. Para ello, en el estudio que sigue se tratan también los productos meteorológicos redactados por distintos organismos asociados a AEMET, su finalidad e importancia sobre la actividad aeronáutica diaria.

Ante tal objeto, se identifica entre los principales procesos meteorológicos que inciden sobre la actividad aeronáutica la turbulencia severa; la afectación sobre la visibilidad, debido a nieblas y precipitaciones, y el engelamiento y daños producidos sobre el fuselaje por el granizo y la formación de hielo debido al vuelo en altas cotas. Además, la intensidad de los fenómenos, la posible concurrencia con otro tipo de fenomenología, las condiciones de la aeronave que opera y la fase de vuelo de vuelo en la que se encuentra son también factor clave a la hora de determinar cómo las aeronaves se verán afectadas.

La relevancia de este estudio se justifica en las conclusiones de diferentes publicaciones que destacan que en torno a un 80% de accidentes e incidentes aéreos encuentran factores meteorológicos como elementos relacionados con sus causas, y un 15% de ellos se deben únicamente a condicionantes meteorológicos y ambientales.

Para acometer esta guía sobre fenomenología y su afectación en el sector aeronáutico, se ha empleado mayormente la revisión bibliográfica de publicaciones relacionadas con el ámbito meteorológico y climático, así como de publicaciones de naturaleza aeronáutica de distintos orígenes, entre los que destacan el Ejército de Aire y el Ejército de Tierra. Además, el estudio se apoya en diferentes entrevistas realizadas a personal especializado en la materia, ya que se trata de meteorólogos ubicados en las Oficinas Meteorológicas de ciertas bases aéreas.

ABSTRACT

Since ancient times, human beings have observed the sky to know its state and thus determine what the weather is like and to predict the phenomena that will occur. From this interest meteorology was born, the science in charge of studying the state of the atmosphere and the processes that occur in it.

This technique has accompanied the human being since the beginnings of science and has evolved with him and with the state of technology. Therefore, when human beings developed the first aircraft and observed they were highly influenced by the state of the atmosphere, meteorology became a whole with aviation. As a result, aeronautical meteorology was born.

The following study is framed in this technique, and it is carried out in it an exhaustive analysis of the main atmospheric processes that occur in the troposphere and its effect on the main meteorological factors, how they develop and how they affect the flight of aircraft, justifying thereby its impact on the incidents and accidents that take place in this area. All this with the aim of developing a guide that allows pilots, crews and appropriate agencies to be able to perform an adequate planning of operations, detect and react to the presence of different phenomena in flight. For this purpose, the following study also describes the meteorological products published by different organizations associated to AEMET, their purpose and importance on the daily aeronautical activity.

In this regard, the main meteorological processes that affect aeronautical activity include severe turbulence, the effect on visibility due to fog and precipitation, and icing and damage to the fuselage caused by hail and ice formation due to flight at high altitudes. In addition, the intensity of the phenomena, the possible concurrence with other types of phenomena, the conditions of the operating aircraft and the flight phase are also key factors in determining how an aircraft will be affected.

The relevance of this study is justified in the findings of different publications that highlight that around 80% of air accidents and incidents find meteorological factors as elements related to their causes, and 15% of them are due only to meteorological and environmental conditions.

In order to undertake this guide of phenomenology and its effect on the aeronautical sector, a bibliographic review of publications related to meteorology and climate has been used, as well as aeronautical publications of different origins, such as Air Force and Army among others. In addition, the study is supported by different interviews with specialized personnel in the field, since they are meteorologists located in the Meteorological Offices of certain air bases.



INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA	4
2.1. OBJETIVOS Y ALCANCE	4
2.2. METODOLOGÍA	4
3. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO (ESTADO DEL ARTE)	5
4. DESARROLLO: ANÁLISIS Y RESULTADOS	6
4.1. IMPACTO DE LOS FENÓMENOS METEOROLÓGICOS	6
4.2. FENÓMENOS ATMOSFÉRICOS RELEVANTES PARA LA ACTIVIDAD AERONAUTICA.....	6
4.2.1. Viento, vientos locales, turbulencia y turbulencia en aire claro	6
4.2.2. Englamamiento	24
4.2.3. Cizalladura del viento	27
4.2.4. Visibilidad.....	29
4.2.5. Tormentas.....	33
4.3. PRODUCTOS DE USO AERONÁUTICO.....	35
5. CONCLUSIONES	39
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
ANEXOS	43



INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de isobaras.....	8
Figura 2: Influencia del rozamiento sobre el viento geostrófico	10
Figura 3: Movimiento de aire en anticilones y borrascas en HN	11
Figura 4: Esquema de la brisa marina y terral	13
Figura 5: Esquema de las ondas de montaña y efectos asociados	19
Figura 6: Representación esquemática de nubes.....	21



INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Nubes y efectos asociados 45



LUIS MARÍA MESTRE BULEO

ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS

- AFIS: Servicio de información de vuelo de aeródromo
- AIC: Circulares de información aeronáutica
- AIP: Publicaciones de información aeronáutica
- AIS: Servicio de información aeronáutica
- AMSL: Above Mean Sea Level (Sobre el nivel medio del mar)
- B.A.: Borde de ataque
- BKN: Broken
- ATS: Servicios de tráfico aéreo
- CAT: Clear Air Turbulence (Turbulencia en aire claro)
- CIAIAC: Comisión de Investigación de Accidentes e Incidentes de Aviación Civil
- CITAAM: Comisión para la Investigación Técnica de Accidentes de Aeronaves Militares
- FIR: Flying Information Region (Región de información de vuelo)
- FIS: Servicio de información de vuelo
- FL: Flight level (Nivel de vuelo)
- Ft: Feet (Pies)
- GS: Ground speed (velocidad sobre el suelo)
- HN: Hemisferio Norte
- HS: Hemisferio Sur
- IAS: Indicated air speed (Velocidad indicada)
- IFR: Instrumental Flying Rules (Reglas de vuelo instrumental)
- IMC: Instrumental Meteorological Conditions (Condiciones meteorológicas de vuelo instrumental)
- Kts: Nudos
- METAR: Meteorological Aerodrome Report (Informe meteorológico del aeródromo)
- NOTAM: Notice to air men (Aviso a los aviadores)
- NSC: No Significant Clouds
- NSW: No Significant Weather
- OACI: Organización de Aviación Civil Internacional
- OAT: Outside air temperature (Temperatura del aire exterior)
- OMA: Oficina Meteorológica del Aeródromo
- OMD: Oficina Meteorológica de Defensa
- OMM: Organización Mundial de Meteorología
- OMPA: Oficina Meteorológica Principal Aeronáutica
- OVM: Oficinas de Vigilancia Meteorológica
- OVC: Overcast
- RPAS: Remotely Piloted Aircraft System (Sistemas de Aeronaves Pilotadas Remotamente)
- RVR: Runway Visual Range
- TAC: Turbulencia en aire claro

LUIS MARÍA MESTRE BULEO



TAF: Terminal Aerodrome Forecast (Pronóstico de aeródromo)

UIR: Upper Information Region

VFR: Visual Flying Rules (Reglas de Vuelo Visual)

VHF: Very High Frequency (Muy alta frecuencia)

VMC: Visual Meteorological Conditions (Condiciones meteorológicas de vuelo visual)

W.S.: Wind shear





1. INTRODUCCIÓN

La meteorología es aquella ciencia encargada del estudio de los fenómenos de tiempo presente que tienen lugar en la atmósfera, es decir, los meteoros. Esta, como cualquier individuo que alguna vez haya requerido del transporte aéreo sabrá, es un todo con la aviación, pues la relación entre ambos es tal, y tan relevante, que el desarrollo de la actividad aérea y de la ciencia mencionada ha sido y es paralelo, puesto que el medio por el que este sector desarrolla su actividad es el objeto de estudio de esta técnica. Por ello, no se concibe la ejecución de la actividad aeronáutica sin el estudio de la atmósfera. Pero, ¿Por qué resulta tan vital el conocimiento de este medio para la aeronáutica?

La respuesta a esta pregunta resultaría fácil para cualquier piloto o controlador aéreo. Es vital por que el conocimiento de las condiciones atmosféricas corresponde a la seguridad de vuelo. Es decir, la capacidad de pronosticar fenómenos meteorológicos adversos para la aviación es fundamental para evitar situaciones complicadas a las tripulaciones. Así, un profundo conocimiento de la distribución de los factores determinantes de la atmósfera, como son la temperatura, presión, humedad, densidad... a lo largo del globo a baja, media y alta cota permite elaborar predicciones de viento, establecer zonas con turbulencia, áreas en las que es factible la formación de hielo por englamamiento, identificar regiones con movimiento de aire convectivo por el movimiento de masas de aire... Esto es útil para establecer si se pueden llevar a cabo los planes de vuelo previstos y elaborar rutas óptimas entre distintos puntos que permitan eliminar, al máximo posible, la incidencia derivada de mala meteorología y su efecto añadido sobre otras causas. Lo cual es importante, ya que aunque como “causa única solamente engloba el 15% de los casos de accidentes”(Pelacho Aja, 2018), la afectación negativa de la meteorología está presente y supone una causa añadida en gran número de accidentes e incidentes aéreos. De facto, EASA¹ afirma que :

Más del 80 % de los accidentes de “vuelo controlado contra el terreno” se produjeron cuando el piloto continuó volando en condiciones meteorológicas que empeoraban o cuando no valoró los efectos que tendrían las condiciones que estaba viviendo en ese momento. (Grupo Europeo para la seguridad en la aviación -EGAST-, EASA)

Es por esta misma razón por la que la difusión de la meteorología está inmerso en la gestión del tráfico aéreo como un servicio de tráfico aéreo (ATS), más concretamente, dentro del servicio de información de vuelo (FIS), cuyo cometido es el de “asesorar y proporcionar información útil para la marcha segura y eficaz de los vuelos”(López Pérez, 2020).

Para la generación y gestión de toda esta información, cobra especial importancia un eslabón fundamental de la cadena de servicios ofrecidos en los aeródromos. Se trata de la OMA, es decir, la Oficina Meteorológica del Aeródromo, entre cuyos cometidos se encuentra la preparación de “pronósticos y otras informaciones pertinentes para los vuelos”, el mantenimiento de la “vigilancia meteorológica continua en los aeródromos” y el intercambio de “información meteorológica con otras oficinas meteorológicas”(Ticona Patzi, 2018), entre otros trabajos que desempeñan. Es a partir de esta información obtenida en los distintos aeródromos, junto con la complementada por las Oficinas de Vigilancia Meteorológica (OVM) y las Oficinas Meteorológicas Principales de Aeródromo (OMPA), con la que se elaboran los productos propios de la oficina, como son los TAF, METAR y SPECI, entre

¹ “La Agencia Europea de Seguridad Aérea (EASA, en sus siglas en inglés) es el componente esencial de la estrategia de seguridad aérea de la Unión Europea. La Agencia promueve los niveles más elevados de seguridad y de protección del medio ambiente en la aviación civil en Europa y en el mundo.”(Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana)



otros. Además, estos son continuamente verificados y la información relativa a ellos es objeto de los briefings meteorológicos impartidos a las tripulaciones.

Con todo ello, es menester diferenciar entre meteorología y climatología, pues mientras el primer término se refiere a la observación y estudio de los fenómenos atmosféricos, es decir, el tiempo atmosférico ocurrido en un preciso instante en un lugar determinado; la climatología hace referencia al estudio del clima, es decir, “el promedio temporal del estado de la atmósfera en un lugar determinado durante un largo periodo de tiempo, 30 años según la Organización Meteorológica Mundial (OMM)” (Ignacio y Crespo del Arco, 2021).

Así, la atmósfera, objeto de estudio de sendas ciencias, no es si no aquella capa de gas que protege la Tierra y la vida en ella. La existencia de este escudo protector se debe a la presencia de la gravedad, la cual atrae al conjunto de gases que lo forman.

En cuanto a su estructura cabe distinguir que se divide en capas. La primera de ellas es la troposfera. Es en esta capa más inferior en la que los fenómenos meteorológicos tienen lugar y donde la mayoría de aeronaves operan, por lo que será objeto del estudio que sigue.

La composición de esta consiste principalmente de un 78% de Nitrógeno molecular (N_2), 21% de Oxígeno (O_2) y un porcentaje restante de Argón, CO_2 , Ozono (O_3) y vapor de agua, además de partículas en suspensión.

La troposfera abarca desde la superficie terrestre hasta la tropopausa, la superficie de contacto de esta con la siguiente franja, la estratosfera. Esta supone el límite superior de los fenómenos convectivos y se encuentra a una altitud² de 10-12 km, aproximadamente. Cabe tener en consideración las diferencias de altitud de la tropopausa dependiendo de la latitud. En los polos, esta se halla a una altitud de entre 6 a 8 km, mientras que en el ecuador se localiza entre los 16 y 18 km. Esto se debe sobre todo a la rotación de la tierra y la diferencia en el módulo de la gravedad sobre los polos y el ecuador, debido al achatamiento de los polos (donde es mayor). Además, la tropopausa también es afectada por las condiciones de presión atmosférica ya que, en zonas de bajas presiones, la tropopausa es más baja; mientras que es más alta en zonas de anticiclón. Así mismo, su altitud también se ve afectada por la estación del año, pues en verano es mayor que en invierno.

Así mismo, en la troposfera, los grandes condicionantes de la atmósfera, como son temperatura, presión, humedad y densidad varían verticalmente, con la altura, y horizontalmente. Esto es observable con el gradiente vertical de temperatura (en el caso de la temperatura), el cual es de $-6,5^\circ C/km$, de media, en esta capa, hasta alcanzar la tropopausa, donde existe una temperatura constante que oscila $-60^\circ C$.

El vuelo de la mayoría de aeronaves, es decir, de turbina, se ejecutan en esta capa y la altitud a la que operan afecta enormemente a su rendimiento. Esto es debido a que, como es sabido, la densidad del aire disminuye con la altura, aproximadamente en un ratio de 1 pulgada³ por cada 1000 pies de altitud. En consecuencia, las turbinas al recibir un menor flujo de aire con el que trabajar requieren un mayor consumo para ofrecer la potencia utilizable requerida, por lo que a mayor altitud, mayor límite de potencia. Además, el rendimiento de los perfiles alares disminuye, ya que el flujo de aire incidente en las alas (palas) que proporciona la sustentación decrece, obligando, en caso de los helicópteros, a aumentar el ángulo de paso de las palas o la velocidad (y con ello, la potencia) en los aviones.

Por encima de la troposfera encontramos otras capas como la estratosfera, la mesosfera, la termosfera o ionosfera y la exosfera que, aunque tienen su importancia dentro del ámbito de la

² Cabe remarcar la diferencia entre altitud y altura, pues mientras el primer término se refiere a la distancia vertical de un punto con respecto al nivel del mar, la altura se refiere a la distancia vertical sobre el terreno.

³ 1 pulgada= 33,86 mb



LUIS MARÍA MESTRE BULEO

atmosfera, quedan fuera del estudio, puesto que no son el medio por el que aeronaves de ala rotatoria y ala fija de turbina ejecutan su actividad, ya que para operar en ellos se requeriría propulsores de tipo cohete.

No obstante, el ser humano no ha contado siempre con este conocimiento acerca de la atmósfera, si no que fueron las aportaciones de filósofos, la mejora de la técnica de a lo largo de la historia (de mano de aportaciones como las de Torricelli, Hook o Galileo, entre otros) y el aumento de la experimentación (con los viajes transoceánicos) lo que permitió la recogida de datos de la atmósfera en distintos lugares de la Tierra, y así establecer relaciones de causalidad entre valores atmosféricos y fenómenos climáticos. Se hacía así evidente la evolución en el conocimiento de la meteorología y climatología.

Todo ello, dio lugar en el s. XVI y XVII a la creación de redes de observación y sociedades encargadas de estos, que lograron la creación de determinadas metodologías para ejecutar las observaciones.

Así, avanzando en esta línea, se desarrolla en el siglo XIX la meteorología sinóptica, la cual comprendía la necesidad de crear mapas que representaran los estados de la atmósfera, señalando campos de presión, temperatura e indicando zonas de viento y precipitación.

Con ello, de la mano del telégrafo se desarrollaron los primeros servicios meteorológicos que ofrecían la difusión de las predicciones.

Así, nace, a principios del siglo XX, de la mano del científico noruego Bjerknes, la meteorología moderna. Su actividad consistió en adecuar los procedimientos de la física a la meteorología práctica, enfocando este conocimiento como un problema de valores iniciales (obtenidos por observación) e incógnitas. Sin embargo, el escaso conocimiento de la atmósfera, las pobres observaciones y la precariedad de los medios para ejecutar los cálculos no permitió aumentar sensiblemente el horizonte de predicción. Este inconveniente no sería resuelto hasta la década de 1950, cuando el desarrollo de los ordenadores permitió la automatización de los cálculos necesarios para los modelos numéricos de predicción.

No sería hasta el siglo XX, con las grandes contiendas de este siglo y algunos accidentes que se dieron debido a malas condiciones meteorológicas, cuando los gobiernos encontraron en dichas ciencias una herramienta fundamental para la mejora de los servicios que comenzaban a crecer (como era el sector de la aviación). Fue entonces cuando estas ciencias recibieron apoyo gubernamental por su posible aplicación.

Así pues, durante y tras la Segunda Guerra Mundial, con la Guerra Fría, el desarrollo de sistemas informáticos, de telecomunicaciones y de satélites permitió una mejora en las predicciones y en la aplicación de la meteorología sobre los sistemas de control de tránsito aéreo, entre otros.

El desarrollo de esta ciencia se complementó con el desarrollo de organismos intergubernamentales, como la OMM, lo cual ha permitido a organizaciones meteorológicas de todo el mundo llevar a cabo un control de la fenomenología y el clima a nivel global. Todo ello ha permitido el avance de la ciencia de la meteorología y climatología hasta lo que es hoy en día. (Palomares Calderón de la Barca, 2019)



2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

2.1. OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo general del trabajo es responder a la necesidad de analizar los fenómenos meteorológicos más relevantes para la aviación, así como los efectos que estos traen asociados sobre las prestaciones de las aeronaves y las maniobras que desarrollan, elaborando una guía general de fenomenología, que permita identificar y operar en ella, desde el punto de vista aeronáutico.

Para ello se llevará a cabo los siguientes trabajos:

- Realizar un estudio de los principales fenómenos atmosféricos, analizando sus causas y modos en que estos se desarrollan, tanto a escala sinóptica, como media, local y de microescala.
- Analizar los efectos adversos sobre la aviación de cada uno de los fenómenos estudiados.
- Analizar el contenido e importancia de los productos aeronáuticos y boletines meteorológicos sobre la actividad diaria de las operaciones que involucran medios aéreos.
- Estudiar y comparar los diferentes tipos y maniobras de vuelo a fin de determinar cuáles son las más efectivas a la hora de hacer frente a la distinta fenomenología.

El presente estudio se centra en el estudio de aquellas condiciones climáticas más significativas para la aviación, susceptibles de ocurrir en latitudes medias, como es el caso de la climatología española. Así mismo, al tratar sobre la actividad aeronáutica cabe hacerlo también de los productos aeronáuticos, sin embargo, no es objeto de este trabajo la explicación de cómo realizar las lecturas e interpretaciones de estos.

2.2. METODOLOGÍA

En el estudio que sigue se ha empleado un método de tratamiento y recopilación de información mixto, es decir, una combinación de métodos cualitativos, como son las entrevistas, la revisión documental y el estudio de casos específicos; y de métodos cuantitativos, entre los que destaca la recopilación de datos fruto de mediciones realizadas por las oficinas meteorológica de ciertas Bases Aéreas y organizaciones como la CITAAM y CIAIAC, recogidas con objeto de caracterizar ciertos fenómenos de tiempo presente y analizar causas de accidentes, respectivamente.

Primeramente, se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica de publicaciones relacionadas con el ámbito de la meteorología, climatología y ciencias afines. Así mismo, el estudio documental se ha extendido también a publicaciones de derecho aéreo, manuales de procedimientos de aeronaves, publicaciones doctrinales del Ejército del Aire y del Ejército de Tierra en cuanto a vuelo de diferentes aeronaves de ala fija y ala rotatoria, estudios de seguridad de vuelo de distintas organizaciones nacionales e internacionales y documentos que recogen las normas operativas de distintos aeródromos.

Además, se ha llevado a cabo una serie de entrevistas dirigidas a personal destinado en las oficinas meteorológicas aeronáuticas de AEMET(OMA) de diferentes bases aéreas, por lo que se trata de personal experto en la materia. Estas fueron concebidas con el objetivo de esclarecer que factores son verdaderamente limitantes para las operaciones aéreas.



3. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO (ESTADO DEL ARTE)

Como ya se ha comentado, la meteorología es una ciencia ampliamente estudiada y conocida, a la par de útil para la aviación y demás sectores relacionados con el transporte y medios aeromóviles. En España, la principal agencia encargada del estudio meteorológico y climático es AEMET.

En sus inicios, fue concebido por orden de la reina regente María Cristina como el Instituto Nacional de Meteorología (INM), encargado de la gestión, dirección y planificación de las tareas relacionadas con la meteorología y climatología. Tras numerosas reestructuraciones y cambios de dependencia de los diferentes ministerios desde su creación, el INM daba lugar a AEMET en 2008. Este asumía las numerosas competencias desarrolladas por anteriores agencias y definía su razón de ser como la agencia encargada del “desarrollo, implantación, y prestación de los servicios meteorológicos de competencia del Estado y el apoyo al ejercicio de otras políticas públicas y actividades privadas, contribuyendo a la seguridad de personas y bienes, y al bienestar y desarrollo sostenible de la sociedad española.” (Agencia Estatal de Meteorología)

Así, AEMET, desarrollando su servicio meteorológico aeronáutico desempeña servicios de “observación, vigilancia y predicción necesarios para contribuir a la seguridad, regularidad y eficiencia del tránsito aéreo.” Además, lleva a cabo “la provisión a los usuarios aeronáuticos de la información meteorológica necesaria para el desempeño de sus funciones.” (AEMET, 2019)

Una de las principales vías a través de las cuales AEMET desarrolla su actividad son las Oficinas Meteorológicas de Aeropuerto (OMA) u OMD, en caso de estar ubicadas en aeródromos y bases militares. La función de estas es prestar “servicio de observación de aeródromo a través del personal de observación y equipos instalados en aeródromos”. (AEMET, 2019) Con estas oficinas, AEMET atiende los requerimientos operacionales y participa en la seguridad de los vuelos que en estas instalaciones se realizan, al suministrar el servicio meteorológico pertinente. Para acometer tal objetivo, se publican productos fruto de la observación en superficie, como son los METAR, SPECI, entre otros. Además, AEMET asiste a los usuarios con el resto de documentación meteorológica que requiera, como son pronósticos y los avisos meteorológicos de ruta, como AIRMET y SIGMET.

Para asegurar la calidad y rigurosidad de las mediciones y posteriores productos, AEMET somete los instrumentos a severos controles que permite mantener los instrumentos en el nivel operativo requerido por OACI en su anexo 14.

No obstante, el grueso de las observaciones del tiempo realizadas por AEMET, se ejecutan en altitud, a través de sondeos, radares, satélites meteorológicos y aeronaves.

Para acometer el objetivo de apoyo al sector aeronáutico, la agencia cuenta con 41 OMAs en distintos aeropuertos repartidos a lo largo y ancho de la geografía española y otras 7 oficinas en aeródromos militares.

Además, el servicio proporcionado por esta agencia hacia el sector aeronáutico, abarca otros cometidos como la preparación y difusión de pronósticos a través de TAFs o de mapas significativos, a través de las Oficinas Meteorológicas Principales Aeronáuticas (OMPA), las Oficinas de Vigilancia Meteorológica (OVM) y el Servicio de Aplicaciones Aeronáuticas.



4. DESARROLLO: ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1. IMPACTO DE LOS FENÓMENOS METEOROLÓGICOS

En primer lugar, antes de estudiar los diferentes fenómenos atmosféricos, los efectos sobre la aviación y analizar diferentes datos, cabe analizar la relación entre los diferentes fenómenos y la actividad aeronáutica.

Como ya se ha comentado, meteorología y aeronáutica forman una inseparable dupla, unida por el medio que estudia y en el que operan, respectivamente, es decir, la atmósfera. Pero, ¿Qué relación existe entre los diferentes fenómenos atmosféricos y la propia aviación? Y, ¿Cómo puede esa relación ser modelada para poder tratar tanto a los fenómenos, como la aeronáutica y a la relación entre ellos de una manera que permita su análisis?

La respuesta a estas preguntas se halla en las variables de impacto y el propio impacto. Esto es debido a que un fenómeno meteorológico, al ser una posible fuente de adversidad para la actividad aeronáutica, puede ser entendido como una variable de impacto, cuyo resultado, o sea sé, el impacto propiamente dicho, es la afectación sobre la seguridad de las operaciones, el desarrollo de las supuestas misiones, retrasos, reducción de las prestaciones de motores, inconvenientes sobre las actividades sociales o económicas previstas... Tal y como es explicado por Méndez-Frades y Alcázar Izquierdo en su publicación *Meteorología aeronáutica: un marco de estudio esencial para comprender el impacto del tiempo en la aviación* (2018, p.290), donde se sirven de la analogía de una función matemática para explicar la relación conceptual de ambos términos, las variables de impacto constituirían las variables independientes de la función, mientras que el propio impacto, sería representado por la variable dependiente.

Es por ello, que este mismo concepto es precisamente la razón de ser del estudio, ya que como es bien conocido en el mundo aeronáutico, los fenómenos y condiciones meteorológicas y su impacto sobre los factores meteorológicos (como son visibilidad, techo de nubes...) definen la posibilidad o no de poder ejecutar las operaciones aéreas. Esto es debido a que para operar en un aeródromo deben superarse una serie de limitaciones, conocidas como mínimos de utilización de aeródromo (expresadas en términos de techo de nubes, visibilidad y distancia a las nubes), en función de las cuales se operará siguiendo las reglas de vuelo visual (VMC) o instrumental (IMC).

4.2. FENÓMENOS ATMOSFÉRICOS RELEVANTES PARA LA ACTIVIDAD AERONAUTICA

4.2.1. Viento, vientos locales, turbulencia y turbulencia en aire claro

4.2.1.1. Viento

Aunque generalmente se entiende el viento como el movimiento del aire de una zona hasta otra, en el ámbito meteorológico este término hace referencia al movimiento horizontal del aire, y tal y como define Acaso Liria y Casals Marcén este hace referencia al "movimiento del aire en relación a la superficie terrestre. Caso de no haber especificación contraria, se considera solamente la componenete horizontal del conjunto de la corriente aérea."(1986, p. 383) No obstante, para el desarrollo de la aviación, tanto movimientos horizontales como verticales de aire serán relevantes. Por ello, a continuación, se detallará la explicación de diversos tipos de movimiento de aire debidos a distintos factores.



Los factores que caracterizan el viento suelen ser su dirección, intensidad y la posible presencia de rachas, es decir, aquellos cambios bruscos transitorios con relación al valor medio de las características que lo definen.

Movimiento horizontal de aire

El movimiento horizontal del aire tiene especial relevancia sobre las aeronaves debido a la gran incidencia que tiene sobre el vuelo y la gran variedad de causas que pueden dar lugar a que ocurra. De hecho, ciertos informes de agencias europeas como Eurocontrol⁴, señalan al viento como aquella variable meteorológica⁵ que más afectación tiene en el desarrollo de la actividad aérea, pues de entre los accidentes que presentan en los informes causas meteorológicas como su detonante, el viento se encuentra en casi la mitad de ellos.

Su afectación en las aeronaves afecta en las diferentes fases del vuelo, como son la fase de crucero y especialmente, el procedimiento de despegue y aproximación para el aterrizaje. En el vuelo de crucero, es necesario conocer los flujos de aire para poder determinar las zonas de viento en cara y viento en cola, es decir, aquellas en las que el viento sopla en contra o a favor del movimiento longitudinal de la aeronave. De igual manera, será importante conocer el viento en los procedimientos de despegue y aterrizaje, pues deben realizarse con viento en cara, siendo especialmente peligrosa la componente cruzada de viento en estas maniobras, puesto que puede comprometer la estabilidad de las aeronaves. Además, tanto en estas como en la fase de vuelo crucero, con flujos de viento cruzado aumenta la fatiga de los materiales y de los pilotos al mando. Por esta razón, las tripulaciones y servicios de control y tránsito aéreo deben conocer el rumbo del viento y ser capaces de poder comunicarlo, y en caso de los helicópteros, en situaciones de tomas fuera de campo, ser capaces de obtenerlo, normalmente con pasadas altas y/o bajas sobre la zona.

Así pues, el principal fenómeno que da lugar al viento es el gradiente horizontal de presión, es decir, “cuando entre dos zonas la presión del aire es distinta, éste tiende a moverse desde la zona de alta presión a la zona de baja presión”(Jiménez Rodríguez, Capa Benito y Portela Lozano, 2004, p.20). Así, este fenómeno es el responsable principal del viento horizontal. Pero, ¿A qué se debe esta diferencia de presiones?

La respuesta a esta pregunta radica en distintas causas relacionadas entre sí. La principal serían causas dinámicas relacionadas con el movimiento de aire en estratos altos de la troposfera que dan lugar al desarrollo de anticiclones (zonas de alta presión en superficie) y borrascas (zonas de baja presión en superficie). Es la convergencia y divergencia de aire de altura. Estos movimientos de aire hacia y desde un área central en el plano horizontal son la razón del viento en anticiclones y borrascas, respectivamente, y los consecuentes aumentos y descensos de presión en la superficie. Su formación tiene, a su vez, diferentes motivos. Por un lado, la diferencia de temperatura entre distintas masas de aire, lo cual lleva al ascenso de las masas cálidas y al descenso de las más frías, debido a la diferencia de densidad; y, por otra parte, a movimientos de aire advectivo que desencadenan ascendencias y subsidencias de masas de aire. Estos son la razón de que los movimientos de aire en el plano horizontal y vertical estén íntimamente ligados

Además, los movimientos de masas de aire debidas a la circulación en chorro favorecerán también la formación de anticiclones y borrascas. Este concepto será tratado más adelante con mayor detalle.

⁴ “Eurocontrol es una organización paneuropea civil-militar dedicada a apoyar la aviación europea. La visión de la empresa recoge el compromiso de la Unión Europea de un cielo único europeo, con el objetivo de hacer que la aviación en Europa sea más segura, más eficiente, más rentable y con un impacto medioambiental mínimo.” (Eurocontrol)

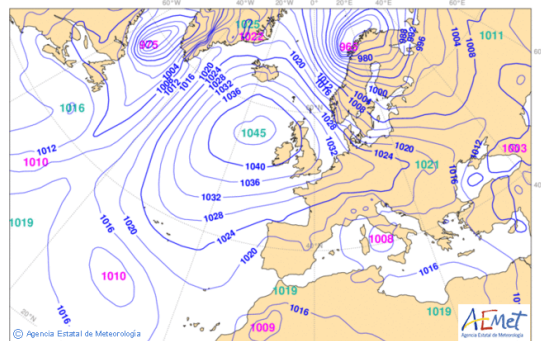
⁵ No como fenómeno meteorológico en su conjunto.



LUIS MARÍA MESTRE BULEO

Por su parte, el calentamiento desigual de la superficie terrestre secunda la aparición de anticiclones por enfriamiento y borrascas por calentamiento. Cuando esto ocurre, el aire adyacente a la superficie se calienta de manera desigual, propiciando el ascenso de las masas más cálidas, dando lugar a zonas de baja presión atmosférica; y el descenso de las frías, generando zonas de altas presiones.

Para la representación de estas zonas de distinta presión atmosférica se emplearán mapas de isobaras. Estos muestran las zonas de igual presión (como si de unas líneas de cota se tratase), y son un buen indicador del gradiente de presión que actúa sobre una zona. Pues, considerando lo anterior, este se dirige desde las altas presiones hacia las bajas y a mayor diferencia de presión entre cada isobara y menor distancia entre ellas mayor intensidad del viento.





LUIS MARÍA MESTRE BULEO

no es si no, “el viento teórico que corresponde al equilibrio entre la fuerza horizontal de presión y la fuerza debida a la rotación de la Tierra, suponiendo que ambas actúan solamente en el aire. Sopla paralelamente a las isobaras o a las isohipsas⁶ rectilíneas.”(Acaso Liria y Casals Marcén, 1986, p.386)

La existencia de este modelo teórico de viento en la atmósfera libre se justifica con la presencia de la fuerza del gradiente de presión que actúa sobre una masa de aire y, al comenzar a moverse, actúa la fuerza de Coriolis. Así, llega un momento que las fuerzas se equilibran y actúa una fuerza cero, por lo que el viento paralelo a las isobaras circula en órbitas alrededor de los núcleos de altas y bajas presiones.

Este viento geostrófico es inversamente proporcional a la fuerza de Coriolis (el cual, aumenta con la latitud) y a la distancia entre las isobaras. Mientras que es linealmente dependiente del gradiente de presión. Por ello, a mayor diferencia de presiones en una zona más reducida y con una fuerza de Coriolis relativamente baja, es decir, a latitudes próximas al Ecuador, el viento geostrófico tendrá una intensidad considerable.

Este modelo está ideado para explicar el viento en una atmósfera libre, es decir, en el que las isobaras son rectas, por las que no está sometido a fuerzas centrípetas; no sufre aceleraciones y no se ve afectado por la fricción, por lo que podría suponerse que se asemeja al viento en altura, sin embargo, estas consideraciones difícilmente se dan en la realidad, por lo que es más bien una aproximación al viento real.(Morales, 2021)

Además, en la capa límite de la superficie terrestre se añade un vector que modifica la dirección e intensidad del viento en los estratos más inferiores de la troposfera. Se trata de la fuerza de rozamiento que se opone al desplazamiento. Esta da lugar a una reducción de la intensidad con respecto al viento geostrófico y una modificación de su dirección (al reducir la intensidad de la fuerza de Coriolis), lo cual provoca que el viento cruce las isobaras con un ángulo del orden de 25 a 35 grados en zonas de mayor fricción, como es la superficie terrestre, zonas urbanizadas... y de entre 10 y 20 grados sobre las superficies que presentan menos fricción, como es, por ejemplo, el mar; en dirección a las zonas de bajas presiones. Dado que estas variaciones de intensidad y rumbo del viento se deben a la fricción, serán inexistentes en altura, donde el viento seguirá más fielmente el modelo geostrófico. Este nuevo vector incluido sobre el viento geostrófico es el denominado viento ageostrófico, definido como aquella “diferencia vectorial entre el viento real y el viento geostrófico. Se denomina también componente ageostrófico del viento”(Acaso Liria and Casals Marcén, 1986) (véase figura 2).

⁶ “Línea que une puntos de igual altura geopotencial en una superficie, que por lo general es una superficie isobárica. A las isohipsas también se las denomina líneas de contorno.”(AEMET, 2018)
Se diferencian de las isobaras en que, mientras en los mapas de isohipsas se unen puntos de igual altura a una presión dada, en los mapas de isobaras se unen puntos de igual presión a una altura dada, normalmente a la altura del nivel del mar.



LUIS MARÍA MESTRE BULEO

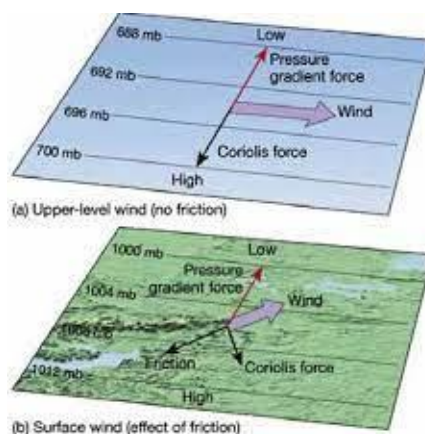


Figura 2: Influencia del rozamiento sobre el viento geostrófico (Morales, 2021)

Una posible ayuda para determinar la posición de las altas y bajas presiones en función del viento, y viceversa, es la ley de Buys-Ballot que, resumiendo el movimiento horizontal del aire, dice: “Un observador en el Hemisferio Norte dando la espalda al viento tiene las bajas presiones a la izquierda y un poco hacia adelante y las altas presiones a la derecha y un poco hacia atrás. Al contrario en el Hemisferio Sur.” (Acaso Liria y Casals Marcén, 1986, p.386) No obstante, este no es válido para brisas, vientos locales, fenómenos convectivos y las latitudes situadas entre ambos trópicos y el Ecuador (latitudes menores a 25° , aproximadamente).

De tal manera, con la altura, el viento aumentará su intensidad y variará su dirección con respecto al viento en superficie, por efecto de la fricción. Por ello, con el ejemplo de la aeronave que despegue con viento en cara, en el HN, se observa que conforme va aumentando su altitud, la intensidad incrementa y la dirección del viento va variando, hasta que recibe el viento cruzado por su derecha. La intensidad de esta variación de rumbo e intensidad del viento dependerá del grado de fricción que haya en la pista desde la que se despegue. (Jiménez Rodríguez, Capa Benito and Portela Lozano, 2004)

La existencia de sistemas de bajas y altas presiones, además de introducir el gradiente de presión necesario para la existencia de viento, produce que este también gire en torno a estos sistemas de presiones, por lo que cabe considerar la existencia de la trayectoria curva en torno a estas. Por ello, este efecto introduce la existencia de una nueva fuerza sobre el viento. Es la fuerza centrífuga, la cual empuja al aire hacia fuera de la curva. La resultante, una vez incluida esta nueva componente, se conoce como viento del gradiente, que no es sino el “viento teórico que corresponde al equilibrio entre la fuerza horizontal de presión, la componente horizontal de la fuerza desviadora debida a la rotación de la Tierra y la fuerza centrífuga debida a la curvatura de la trayectoria del aire. Supuestas que actúan solas sobre el aire. Sopla paralelamente a las isobaras o a las isohipsas. Se llama también viento bórico.” (Acaso Liria y Casals Marcén, 1986, p.385)

Así pudiese, en el HN, cuando el aire se mueve en torno a las bajas presiones, donde este movimiento es contrario al de las agujas del reloj, la fuerza centrífuga se opone a la del gradiente de presión y con lo cual la intensidad del viento de gradiente resultante es inferior al del teórico viento geostrófico, razón por la cual, se denomina viento subgeostrófico. Lo contrario ocurre en torno a los anticiclones, donde el movimiento del aire hace que la fuerza centrífuga se sume a la componente del gradiente de presión, dando lugar a un viento de mayor intensidad que el geostrófico. Es el viento supergeostrófico. (Jiménez Rodríguez, Capa Benito and Portela Lozano, 2004)

Los sistemas de altas y bajas presiones, además de ser interesantes para la aviación en cuanto al viento, son importantes debido a la variación que introducen sobre las lecturas que los barómetros hacen de la presión estática en el ambiente, produciendo variaciones en las



marcaciones de los altímetros de las aeronaves, que en principio únicamente cuentan con la variación de la presión con la altura. Por ello, estas diferencias horizontales de presión y la necesidad de las aeronaves de emplear la presión estática para determinar la altitud y su variación introducen la necesidad de emplear distintas referencias para determinar los pies a los que se está volando. Así, según la referencia empleada se tratará de QNH, QNE y QFE. El QNE hace referencia a la presión a nivel del mar en atmósfera estándar⁷, es decir, estaríamos obteniendo la altitud presión⁸. Para trabajar con esta referencia el piloto debe calar en su altímetro 1013 mb o 29,92 pulgadas. Este sistema se emplea a altitudes superiores a las de transición establecidas por los organismos aeronáuticos competentes para cada zona, generalmente 6000 ft. Por ello, todas las aeronaves emplearán una única referencia para determinar su nivel de vuelo y el de las aeronaves circundantes.

El QNH se refiere a la presión a nivel del mar equivalente, es decir, el cálculo de la presión atmosférica del aeródromo si se encontrara a 0 ft, asumiendo condiciones estándar. Es usado regularmente por controladores y pilotos al volar en altitudes inferiores a las de transición y en aproximaciones y aterrizajes.

Finalmente, el QFE hace alusión a la presión sobre el aeródromo, es decir, los pilotos en su altímetro al calar esta presión de referencia estarían obteniendo su altura con respecto al aeródromo y cuando estén sobre este indicará 0 ft de altura. (Hierro Álvarez, 2021)

Movimiento vertical de aire

Los movimientos verticales del aire pueden tener diversas causas. La principal es la convergencia y divergencia, comentada anteriormente. Estos movimientos de aire en altura dan lugar al desplazamiento subsidente o ascendente de aire en anticiclones y borrascas, respectivamente, y las consecuentes diferencias de presión consecuente. Así, la estructura vertical del anticiclón es característica por el descenso de aire (asociado a situaciones de tiempo estable y ausencia de precipitaciones, debido a que el aire descendente es más estable que el circundante), mostrando una divergencia en superficie y con ello, un aumento de la presión sobre esta zona; mientras que, en altura, el anticiclón presenta un área de convergencia. Por el contrario, la borrasca, asociada a fenómenos de enfriamiento, inestabilidad, condensación y precipitaciones, se caracteriza por el descenso de presión en superficie, debido al ascenso de aire tras la convergencia en la capa límite y un área de divergencia en altura (véase figura 3).

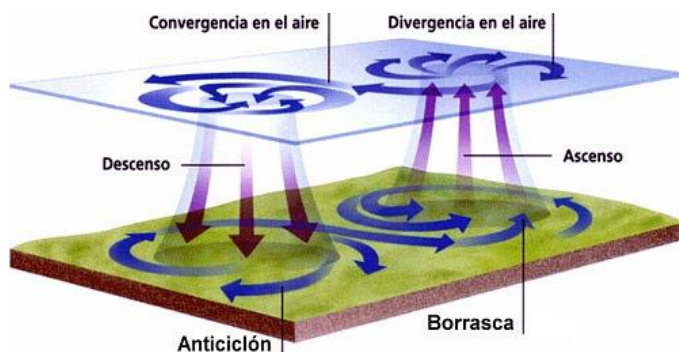


Figura 3: Movimiento de aire en anticiclones y borrascas en HN (Morales, 2021)

No obstante, esta no es la única causa del movimiento vertical del aire, pues existen

⁷ La atmósfera estándar o ISA "es un modelo de la atmósfera terrestre que permite obtener los valores de presión, temperatura, densidad y viscosidad del aire en función de la altitud. Su función es proporcionar un marco de referencia invariante para la navegación aérea y para la realización de cálculos aerodinámicos consistentes." (Wikipedia, 2021)

⁸ Junto con el término de altitud presión, es especialmente relevante para la aviación el concepto de altitud densidad. Este es derivado del anterior y se obtiene al corregir la altitud presión ante las desviaciones de temperatura no estándar. Su importancia radica en que las prestaciones de las aeronaves dependen inversamente de ella.



fenómenos como la orografía, la convección, ascensos de aire debido a frentes y fricción... que dan lugar a este tipo de desplazamientos de masas de aire.

La orografía produce que, en ocasiones, el flujo de aire que topa con obstáculos debido a la topografía se vea obligado a realizar ascensos y descensos.

La convección, debida a calentamientos irregulares de las masas de aire adyacentes a la superficie terrestre, es la razón por la cual se da el ascenso de masas de aire a mayor temperatura y descenso de aquellas más frías.

Los frentes son aquella zona de separación entre dos masas de aire a distinta temperatura que non se mezclan, si no que dan lugar a ascensos forzados de unas masas sobre otras, generalmente, de las más cálidas.

Además, la fricción, sobretodo presente en la capa límite, produce la formación de torbellinos turbulentos que dan lugar a ascensos y descensos. Las ondulaciones en el flujo de aire dan lugar a la misma situación.(González López, 2006)

4.2.1.2. Vientos locales

Tal y como se explica en *Meteorología aplicada a la Aviación*, “las irregularidades de la superficie son la causa de que el viento en superficie no siga en muchas ocasiones la regla del viento geostrofico”(Ledesma y Baleriola, 2004, p.88). Con lo cual, el viento local podría definirse como aquel que “sopla solamente en un dominio limitado y provocado por condiciones locales”(Acaso Liria and Casals Marcén, 1986), este debido a dichas condiciones “adquiere caracteres particulares.”(Acaso Liria and Casals Marcén, 1986) Estos, aunque “pertenecen a circulaciones de pequeña escala, pueden afectar seriamente a las condiciones de vuelo, pero su presencia no es obvia en los análisis de superficie, ya que pueden quedar enmascarados por circulaciones de mayor escala.”(González López, 2006, p.5.13) Así, existen diversas causas que dan lugar a este tipo de fenómenos. Entre ellos destacan:

1. Vientos locales de carácter térmico

➤ Brisa de mar (virazón) y de tierra(terral) (*ver figura 4*). El fenómeno de la brisa de mar se da cuando en regiones próximas a la costa se produce una diferencia de temperatura en las masas de aire inmediatamente próximas a la superficie y sobre el mar. Esto sucede debido a que durante el día el aire sobre la tierra se calienta más que aquel sobre el mar, debido a su menor calor específico⁹. Por ello, la menor densidad de esta masa la hace ascender, creando una zona de baja presión. Así, el gradiente de presión generado propicia que la masa más fría se desplace sobre la costa. Esta brisa tiene lugar durante el día, cesando sobre la puesta de sol. “Penetra hasta 30/40 Km, con intensidades de entre 8-14Kt”(Morales, 2021), siempre que la orografía lo permita, siendo favorecido por valles fluviales y llanuras que permitan el desplazamiento libre de las masas de aire.

Con el fenómeno de la brisa de tierra ocurre lo mismo, sin embargo, esta se da durante la noche, cuando el calor residual del agua calienta más las masas de aire, ya que la tierra se enfría más rápido. Esta suele iniciarse unas horas después de la puesta de Sol. “Penetra hasta 20 Km, con intensidades de entre 5-12 Kt.”(Morales, 2021)

⁹ El calor específico hace referencia la cantidad de calor que hay que suministrar a un sistema para que aumente su temperatura en una unidad. (Morales, 2021)



LUIS MARÍA MESTRE BULEO

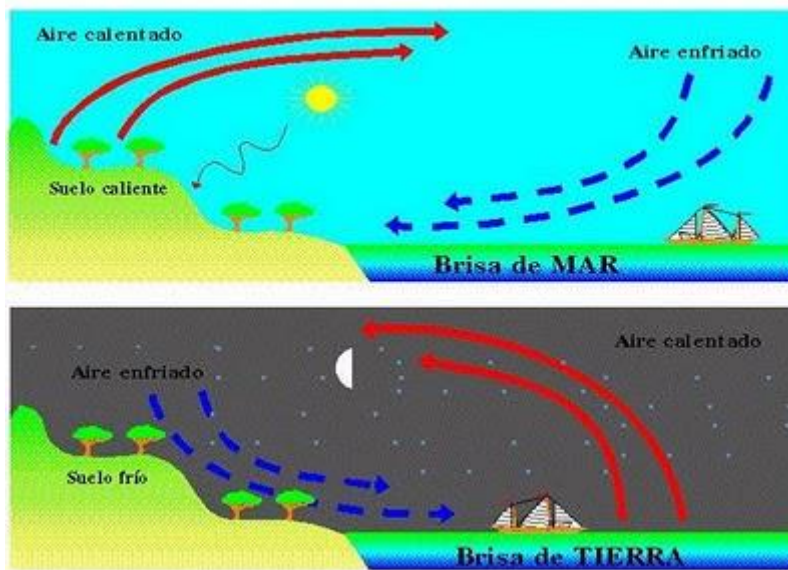


Figura 4: Esquema de la brisa marina y terrenal (Morales, 2021)

➤ Brisa de montaña. También denominado viento catabático. Ocurre cuando, durante la noche, el aire sobre las zonas más altas de la montaña, más frío que el aire sobre el valle desciende, al ser más denso. Esta comienza tras la puesta de Sol y su intensidad depende de la orografía y orientación del valle.

➤ Brisa de valle. También conocido como viento anabático. Se da cuando, durante el día, las masas de aire adyacentes a las laderas expuestas a la radiación solar se calientan. Así, estas masas ascienden generando la brisa de valle. El viento anabático comienza tras la salida del Sol, aunque depende de la orientación del valle, ya que en zonas de sombra no se da este fenómeno.

2. Vientos de carácter orográfico.

➤ Convergencia/divergencia orográfica. Tal y como se explica en *Meteorología aplicada a la Aviación*, este efecto es debido a que:

El viento que tropieza contra una montaña es desviado y modificado, y se orienta según su flujo, que depende de la forma del obstáculo y la orientación del valle. [...] Si la distribución orográfica es tal que hay dos zonas montañosas próximas, el flujo de aire se ve obligado a penetrar por un estrecho canal. (Ledesma y Baleriola, 2004, p.90)

Así, el efecto Venturi da lugar a que cuando esto ocurre, o si, por el contrario, la orografía diverge, se den aumentos y disminuciones, respectivamente, de la velocidad del viento. Además, este efecto conllevará variaciones en la presión estática (recogida por los sensores de la aeronave), lo que provocará cambios en las lecturas del altímetro, entre otros instrumentos. Así mismo, se darán ascensiones o descendencias, más o menos acusadas según el grado de pendiente del obstáculo.

➤ Viento descendente de ladera. Este efecto se da cuando, al superar un obstáculo topográfico, el viento a sotavento desciende acelerado (por efecto Venturi, debido a la reducción de sección por la que circula el aire) y calentado, tras sufrir un proceso de calentamiento por compresión adiabática¹⁰.

¹⁰ La compresión adiabática hace referencia al fenómeno por el que un determinado volumen de aire, sin realizar cambio de calor entre este y el aire, desciende experimentando una compresión al aumentar la



Este viento se conoce, generalmente, como Föhn o Foehn y es definido como aquel “viento calentado y desecado por un movimiento descendente, en general hacia debajo de una montaña.” (Acaso Liria y Casals Marcén, 1986, p.152) Tras el ascenso y la pérdida de humedad correspondiente por la formación de nubes orográficas, el aire cae a sotavento de la ladera como aire seco, por lo que presenta un gradiente adiabático propio del aire seco (mayor que el gradiente térmico del aire saturado y el gradiente térmico atmosférico), produciendo un calentamiento mayor que el aire a barlovento. Por este motivo se dice que a sotavento de las cadenas montañosas se produce una mejora temporal de las condiciones de vuelo.

4.2.1.3. Turbulencias

Como es sabido, el flujo de cualquier fluido, incluido el aire, puede ser ordenado y rectilíneo o desordenado y caótico, es decir, laminar o turbulento, respectivamente. En este último tipo de flujo, el fluido crea vórtices o remolinos, que, en el caso del aire, dan lugar a variaciones de la dirección e intensidad del viento. Este hecho es conocido como turbulencia que, a nivel meteorológico, se refiere a aquel estado del flujo en el que la velocidad del aire presenta variaciones irregulares.

Sin embargo, y aunque idealmente el flujo laminar es posible, la realidad es que la estabilidad atmosférica absoluta no existe, y el aire siempre se mueve con un flujo turbulento.

No obstante, a nivel aeronáutico, se conoce a las turbulencias como a aquellas aceleraciones verticales u horizontales, que producen cambios de actitud de la aeronave, variaciones en los parámetros...y suponen la principal causa de los daños producidos en vuelo sobre las tripulaciones, pasajeros y estructura de las aeronaves.

Así pues, aunque siempre existen turbulencias en el aire, en términos aeronáuticos se considera que existe turbulencia cuando esta afecta a la trayectoria o movimiento de la aeronave. En este sentido, tanto el tamaño de los vórtices, la velocidad de la aeronave y el peso de esta son determinantes. Estos tres condicionantes, de tal manera, determinarán la intensidad de la turbulencia. Esta será medida en una escala EDR (Eddy Dissipation Rate -razón de disipación del remolino turbulento-), establecida por la OACI, para tal fin; que calificará en función del valor obtenido la turbulencia según sea fuerte, moderada o ligera.

De tal manera, las turbulencias son susceptibles de ocurrir en cualquier parte de la troposfera, desde la superficie hasta la tropopausa. Sin embargo, dependiendo del lugar donde se generen, estas pueden estar asociadas a la convección¹¹ y a condiciones orográficas, cuando se generan cerca de la superficie; o a la cizalladura¹² y gradiente de viento, cuando se generan en altura (en la alta atmósfera los remolinos suelen formarse por la rotura de las ondas por efecto de la cizalladura). No obstante, a niveles generales, las recomendaciones de vuelo para las tripulaciones al encontrar turbulencias en su ruta son similares, pues durante el vuelo crucero se debe reducir la velocidad, a fin de encontrarse menos turbulencias por unidad de tiempo y que su estructura no se vea sometida a tantos esfuerzos y personal a fatiga. Además, esta velocidad menor debe permitir contar con un excedente de potencia, y suponer la velocidad a la que la aeronave cuenta con mayor régimen de ascenso, a fin de que las posibles descendientes no propicien que la aeronave se precipite contra la superficie y permita retrasar el desprendimiento del flujo de aire laminar de la pala que retrocede (en caso de las aeronaves de ala rotatoria) y no

presión, lo que lleva involucrado un calentamiento adiabático.

¹¹ Convección. Movimientos interno organizados en una capa de aire que producen transferencias verticales de calor, cantidad de movimiento, etc. (Acaso Liria and Casals Marcén, 1986, p.84) Genera turbulencia debido a que interrumpe el flujo regular del aire. Esta será más intensa cuanto más inestable sea la atmósfera.

¹² La cizalladura de viento es definida por Acaso Liria y Casals Marcén (1986) como: “en un instante y en lugar dados, variación espacial del vector viento o de una componente de este en una dirección determinada”.



perder el flujo de aire que genera sustentación, en caso de flujos descendentes.

Así, según su origen, las turbulencias son clasificadas como sigue.

Tipos de turbulencia

1. Turbulencia en niveles bajos.

Es aquel tipo de turbulencia producida en bajas cotas, es decir, próximo a la superficie terrestre, donde el efecto de la fricción gana importancia, es la llamada capa límite de la superficie terrestre.

Este tipo de turbulencia incluye la turbulencia mecánica, la térmica o convectiva, la generada por la estela de las aeronaves y la asociada a frentes.

✓ Turbulencia mecánica. Es aquel tipo de turbulencia generada debido a la orografía, obstáculos del terreno...que aumentan la fricción y producen los remolinos que desencadenan cambios en la dirección e intensidad del viento. La intensidad de las turbulencias dependerá de la cantidad y tamaño de los obstáculos, de la velocidad del viento y de la estabilidad del aire (A mayor inestabilidad del aire, mayores vórtices y mayor volumen de aire afectado). Los efectos sobre el flujo de aire serán variables en cuanto a la entidad de los obstáculos, pues variarán los efectos, según se trate de una cadena, una serie de cadenas sucesivas o una montaña aislada.

Al despegar próximo a obstáculos susceptibles de generar este tipo de turbulencia se recomienda ascender por encima de las cotas más altas, a fin de evitar entrar en los remolinos y ser afectados por las descendentes. Este tipo de turbulencia es la razón principal de que los vuelos en montaña sean agitados y turbulentos.

✓ Turbulencia térmica o convectiva. Es un tipo de turbulencia debido al movimiento convectivo de masas de aire. Puede ser típicamente diurno, y deberse al calentamiento de las masas de aire más próximas a la superficie¹³ que, al calentarse, tiende a elevarse; u ocurrir indistintamente de noche o de día, cuando una masa de aire frío se topa con una masa de aire más cálido, ocurriendo el mismo efecto. De tal manera, cuando ocurre las masas de aire con movimiento convectivo son interceptadas por el movimiento del aire, generando remolinos turbulentos.

En estas turbulencias es especialmente relevante la estabilidad del aire, ya que, si lo es, la turbulencia ocupará únicamente capas bajas de la atmósfera, mientras que si el aire se muestra inestable, puede abarcar toda la troposfera. Además, la posible humedad del aire, abre la posibilidad de que se formen cúmulos de poco desarrollo en caso de que la atmósfera se muestra estable, o incluso tormentas si el aire es inestable.

Tanto esta como la turbulencia mecánica son altamente peligrosas en fases del vuelo próximas a la superficie, como son las aproximaciones y despegue, pues “el aumento o la reducción del ángulo de ataque ocasionado por una ascendencia o descendencia involuntaria, puede acabar con la entrada en pérdida de la aeronave.”(Lozano, 2013, p.18)

✓ Turbulencia de estela. A pesar de no ser una turbulencia provocada por fenómenos meteorológicos, resulta importante para la aviación. Esta es generada debido a que en el intradós (parte inferior del ala) existe mayor presión que en el extradós (parte superior de ala), originándose una diferencia de presiones en la parte más exterior del ala que provoca un movimiento de aire, donde forma un remolino. La intensidad de este tipo de turbulencia viene determinada por el tamaño y peso de la aeronave, además de ser inversamente proporcional a su velocidad. Suele afectar en mayor medida a las aeronaves de menor tamaño, por lo que los

¹³ Se trata del fenómeno de conducción.



pilotos deben de tratar de situarse a barlovento del avión que genera la turbulencia o fuera del alcance de estas.

✓ Turbulencia asociada a frentes. Un frente no es sino la superficie de separación entre dos o más masas de aire con temperatura y densidad diferente.

Los frentes pueden ser en altura o en superficie. Estos primeros son aquellos en los que la intersección entre las diferentes masas ocurre a cierta altura, mientras que los otros ocurren en contacto con la superficie. No obstante, aunque los frentes se pueden dar en altura, estos son incluidos dentro de las turbulencias a niveles bajos, ya que los principales efectos sobre las aeronaves asociados a este fenómeno se dan cuando las aeronaves vuelan a baja cota.

Los frentes se clasifican en función de la masa que se mueve y empuja al aire que se encuentra previamente en la región. Así, existen frentes fríos, cálidos, ocluidos y estacionarios. No obstante, los principales y de mayor relevancia para el estudio que acontece serán los dos primeros, sin embargo, la importancia de estos residirá en la intensidad con la que se den, de la que dependerá el grado de los efectos derivados del frente. Todos ellos, junto con su intensidad serán representados en los mapas de tiempo significativo previsto de baja cota (SIG-WX), los cuales serán de utilidad para las tripulaciones en el estudio previo de los fenómenos de tiempo presente para una zona en concreta en la reunión prevuelo.

El frente cálido se caracteriza porque el empuje es generado por la masa cálida que se desplaza. Esta suele moverse en dirección NE. En su desplazamiento el aire cálido, al ser menos denso, asciende por encima del aire frío. Por ello, se dice que el paso de un frente cálido supone una situación de inversión térmica pasajera. Así, en caso de que exista humedad suficiente, el frente cálido tiende a formar nubes de carácter estratiforme como son los cirros, cirrostratos, altoestratos, estratocúmulos y nimbostratos. Estas son propias de lluvias continuas y los nimbostratos hacen posible el desarrollo de lluvia engelante en el frente de la masa de aire, durante el invierno. La baja visibilidad y techos bajos son característicos de la banda de mal tiempo generada por el frente cálido. Así, la turbulencia asociada a este tipo de frentes suele ser débil en caso de tratarse de frentes estables y moderada o fuerte si existe inestabilidad.

En un frente frío la masa de menor temperatura empuja el aire de mayor temperatura con el que choca. Este suele ser más rápido que el frente cálido y su dirección de avance suele ser entorno al SE. Al paso del frente frío, al ser más denso que la masa de aire de mayor temperatura, suele empujar hacia arriba generando nubes de desarrollo vertical. Es por ello que es característico de este fenómeno las nubes como cumulonimbos y cúmulos (además de nimbostratos y estratocúmulos) y con ellas, los chubascos, es decir, lluvia intensa pero de corta duración, que junto con las posibles tormentas, son el principal efecto de este fenómeno que perjudica el vuelo, sobre todo, cuando la nubosidad se encuentra "embebida dentro de la masa nubosa principal y no es visible en la distancia" (Quintana Trenor, 2021). La turbulencia asociada a este tipo de frente es moderada o fuerte, ya que la banda de inestabilidad generada, usualmente en aire húmedo e inestable, da lugar a zonas de actividad convectiva con fuerte cizalladura de viento y variación de temperatura. Sin embargo, la banda de inestabilidad es más estrecha, por lo que son habituales los claros tras el paso de esta.

Así pues, el movimiento de masa de aire tiene gran repercusión sobre las prestaciones de las aeronaves, sobretodo, en dos estados especialmente críticos del vuelo, el despegue y el aterrizaje. Esto es debido a todos los efectos derivados del frente como son la reducción de visibilidad, el engelamiento, las tormentas... Pero también adquiere especial relevancia la cizalladura de viento atravesada por las aeronaves durante las maniobras próximas al suelo. La turbulencia asociada a estos cambios horizontales y verticales de viento será "tanto más brusca cuanto más fuerte es el gradiente de temperatura" (González López, 2006, p.13.13), es decir, la intensidad de los remolinos turbulentos generados depende de la del cambio de temperatura. De tal manera, el problema para las tripulaciones reside en que, al despegar desde un aeródromo con viento en cara, la aeronave sigue un rumbo, pero al ascender y abandonar dicha masa de



aire, el viento cambiará su dirección, lo que generará sobre el avión un cambio sobre la incidencia del viento en las alas, produciéndole una menor sustentación. Suponiendo que la maniobra sea ejecutada desde un aeródromo que se encuentra bajo una masa de aire cálido en la que el flujo del aire es de componente NE, al ascender sufrirá turbulencias debidas al cambio de la incidencia del viento que, en altura, tendrá componente SE, propio de un frente frío. En este mismo sentido es como las aeronaves se ven afectadas también en las maniobras de aterrizaje. (González López, 2006)

Es por esta misma razón que, durante el vuelo crucero la manera de maniobrar óptima sería ascender hasta superar el frente, ya que estos se debilitan con la altura, mientras que, como es obvio, se debe evitar volar a lo largo de este.

2. Turbulencia por onda de montaña

La onda de montaña es aquel fenómeno meteorológico debido a la incidencia del flujo del aire transversal sobre una cadena montañosa. Al toparse con esta barrera natural, el aire asciende hasta un cierto nivel, a partir del cual desciende. En este descenso adquiere aceleración y sobrepasa por debajo la altitud que tenía en un inicio. Por esta razón, a sotavento del obstáculo se produce un tren de ondas, por lo que el flujo de aire adopta un comportamiento ondulatorio, con ascensos y descensos a partir del nivel de equilibrio. Estas son las denominadas ondas de gravedad, origen de las turbulencias.

Así, para que tal fenómeno pueda ocurrir deben darse una serie de condiciones básicas. Estas residen en la dirección e intensidad del viento que incide sobre el obstáculo y en la estabilidad del aire en la cima de la cadena. Estos requisitos son importantes ya que determinarán la intensidad con la que se produce este fenómeno. De esta manera, la dirección del viento debe ser lo más perpendicular posible al eje de la montaña, pudiendo incidir con un máximo de unos 30° aproximadamente, como límite; la intensidad del viento debe situarse entre 15 y 25 nudos¹⁴(según la altitud de la cresta) en la cima y debe aumentar con la altura, pero no excesivamente rápido, mientras mantiene la dirección constante para los diferentes niveles de vuelo (FL). Además, sobre esta debe existir una capa de aire estable, en ocasiones, reflejado en el fenómeno de inversión térmica¹⁵ que ocurre en los niveles ligeramente superiores a la cima; ya que como defiende J.Thillet en *La meteorología de montaña*(1998, p.149):

Una partícula de aire estable es separada de su nivel de equilibrio tiende a volver a él. Si dicha partícula es movilizada por el viento, su trayectoria es una senoide. [...] Hay que destacar que las ondas no pueden formarse en una atmósfera inestable, ya que entonces la partícula no retrocede hacia abajo

Con ello, el efecto de las ondas de montaña es especialmente notable en dos regiones de la atmósfera, en los niveles que alcanzan la altitud de la creta y en las altas capas de la troposfera. La zona más inferior donde esta fenómeno gana importancia es a la altura de la cima de la cadena montañosa. Sobre esta se generan una serie de torbellinos denominados rotores que, según Acaso Liria y Casals Marcén(1986, p.331), son:

Remolinos amplios y cerrados, con un eje horizontal, producido a sotavento de una cadena montañosa cruzada por una corriente de aire estable. Se forman a veces bajo las ondas de montaña de gran amplitud. Su dimensión horizontal es de 3 a 10 km, y la vertical, de 1 a 3 km.

Los rotores de mayor intensidad, es decir, aquellos que generan mayor turbulencia son aquellos que aparecen bajo las primeras ondulaciones de la onda, alrededor de los 10 km

¹⁴ 1 nudo corresponde a 1 milla náutica(NM) por hora. Así, una milla náutica es igual a 1,851998 km/h

¹⁵ "Reparto vertical de temperatura tal que la temperatura crece con la altura"(Acaso Liria and Casals Marcén, 1986, p.203). Esta es característica de situaciones de gran estabilidad atmosférica.



siguientes al eje de la montaña.

La región superior donde las ondas de montaña modifican el flujo laminar del aire para hacerlo turbulento es en la región próxima a la troposfera, debido a la cizalladura de viento generada en la región. Esta área suele estar asociada a turbulencia moderada cuando se da este fenómeno.

A su vez, la zona intermedia entre la cima del obstáculo y los estratos superiores de la atmósfera suele permanecer con un flujo laminar, a pesar de ser ondulado (pero no turbulento). Esto indicará que las turbulencias en esta región serán de baja o nula repercusión para las aeronaves.

Así mismo, la intensidad de las ondas de montaña depende de la velocidad del viento que incide sobre el obstáculo orográfico, la estabilidad atmosférica y la cizalladura del viento. Esto se debe a que si existe una gran estabilidad (llegando incluso a la inversión térmica), el viento es suficientemente intenso (15-25kts) y no hay fuerte cizalladura de viento, es decir, la intensidad del viento no aumenta intensamente con la altura, las ondas generadas son de gran amplitud, lo que favorece su propagación en la vertical, llegando, en ocasiones incluso a abarcar toda la troposfera, aunque lo normal es que la zona de influencia de la cadena montañosa en la circulación del aire abarque entre 3 y 5 veces la altura de la cadena. Por el contrario, si existe inestabilidad atmosférica (lo que no favorecería la propagación del efecto ondulatorio de las partículas de aire sobre sus inmediatas vecinas) y/o fuerte cizalladura vertical del viento las ondas serán de menor amplitud (bajo esta condición se dice que las ondas están confinadas en los niveles inferiores de la atmósfera) y se vería favorecida la propagación horizontal de las estas, por lo que los rotos se extenderían en la perpendicular del eje de la cresta, pudiendo llegar hasta los 100 o 200 km tras la cresta, si la intensidad del viento es suficiente. Sin embargo, los rotos que generarían mayor turbulencia serían los que se hallaran bajo las primeras crestas, perdiendo fuerza aguas abajo.

Como efecto característico de este tipo de turbulencia se presentan tres tipos de nube que podrían denotar su existencia, dependiendo, claro está, de las condiciones de humedad y temperatura a sotavento de la cresta. El primero de los tipos son las nubes orográficas, es decir, aquellas “cuya presencia y forma están determinadas por el relieve del suelo” (Acaso Liria y Casals Marcén, 1986, p.267), en este caso, del obstáculo orográfico. El proceso por el que estas son formadas es el fenómeno de ascenso orográfico, por el que el aire, ante el obstáculo, se ve forzado a ascender y en condiciones de humedad suficientes, al alcanzar el nivel de condensación¹⁶ enfría y se forma la nube. Por esta misma razón, se forman sobre la cordillera en cuestión. Estas nubes son, generalmente, (según las condiciones de estabilidad atmosférica) de tipo estratiforme y caen ligeramente por la ladera de sotavento, formando lo que se conoce como “Muro de Föhn”.¹⁷

El segundo tipo de nube significativo son las nubes lenticulares (forma de lenteja), las cuales se generan a sotavento del obstáculo sobre las primeras ondas del flujo de aire, cuando al ascender el aire húmedo se condensa y evapora en el descenso. La altura de estas se sitúa sobre aquella zona donde el flujo de aire es laminar, es decir, a cierta altura sobre el nivel de la cima del obstáculo. De tal manera, se trata de nubes estacionarias, es decir que permanece en una posición estática con respecto a los picos. La forma de estas es característica, ya que se asemejan a la forma de una lenteja con unos contornos muy bien definidos.

Finalmente, el tipo más característico de este fenómeno meteorológico es la nube rotor, estas según la Agencia Española de Meteorología (AEMET):

¹⁶ “Nivel al cual el aire se satura a consecuencia de un proceso determinado.” (Acaso Liria y Casals Marcén, 1986, p.263)

¹⁷ El “muro de Föhn” hace referencia al efecto visual producido sobre las crestas de las montañas por las nubes creadas tras el ascenso del aire húmedo al condensar.



LUIS MARÍA MESTRE BULEO

Se forma(n) dentro de la célula turbulenta denominada rotor y en la que el aire gira alrededor de un eje paralelo al sistema montañoso. La nube rotor suele tener la apariencia de un rollo [...] y es indicio de turbulencia en niveles bajos.(2018)

Además, es factible también la formación de Cirros (Ci) y Cirrostratos(Cs) en el nivel de la tropopausa, como se puede observar en la *figura 5*.

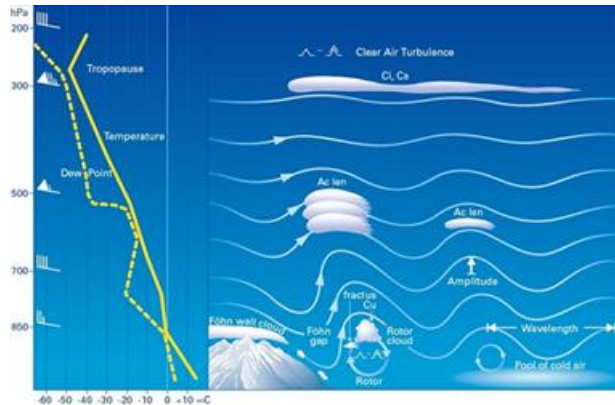


Figura 5: Esquema de las ondas de montaña y efectos asociados (Morales, 2021)

Así pues, dependiendo del nivel de vuelo de las aeronaves operando en regiones afectadas por el fenómeno de las ondas de montaña, estas se verán sometidas a unos efectos u otros, ya que el impacto de estas es diferente según la región de la troposfera.

De tal manera, las aeronaves que operen en la región turbulenta inferior, es decir, aquella donde se localizan los rotores se verán sometidos a fuertes corrientes descendentes que podrán poner en peligro la integridad de la aeronave. No obstante, existe gran diferencia entre realizar una aproximación al obstáculo con viento en cola o viento en cara, siendo notablemente más peligroso hacerlo desde sotavento, ya que realizarla con viento en cola permite a la aeronave ser sometida a las corrientes ascendentes que adopta el flujo de aire ante el choque con la montaña, permitiendo superarla con el mínimo incidente posible. Además, tanto de un lado como otro de la ladera “el mejor procedimiento para aproximarse a la montaña, es hacerlo con un ángulo de 45°, que permita retirarse rápidamente en caso de encontrar turbulencia.”(González López, 2006) Así pues, tal y como explica Blanca González López en *Meteorología Aeronáutica*, “la mayoría de los pilotos reaccionan a las descendencias intentando ascender. Estas tentativas de ascenso son efectivas siempre que la intensidad de la descendencia no sea demasiado severa, pero con una descendencia fuerte intentar ascender es contraproducente.”(2018, p.15.13) Tanto es así que, incluso en caso de aeronaves de ala rotatoria, el intentar el ascenso en una descendente puede desencadenar incluso entrar en anillos turbillónarios, es decir, entrada en pérdida, lo que a bajos niveles de vuelo podría producir incluso un accidente fatal. Por esta misma razón, ante una aproximación al obstáculo con viento en cara la maniobra más sensata es “ponerse con viento de cola, y salir de la descendente volando hacia un terreno bajo.[...] Una vez que el avión ha salido del área de descendencias, puede ascender de nuevo, e intentar cruzar el área turbulenta [rotor] cuando gane suficiente altura.”(González López, 2006).

La otra región problemática, es decir, aquella superior de la troposfera próxima a la tropopausa, es caracterizada por ser más turbulenta cuanto más próxima a la montaña. Por ello, la recomendación es superarla desde barlovento, donde la onda de montaña (si procede) es notable ya que, de tal manera, el piloto podrá intuir si existen o no ondas de montaña.

No obstante, preferiblemente “la zona que debe buscar el piloto para atravesar de forma segura una cadena montañosa en la que se han formado ondas, es aquella donde el régimen es laminar, a pesar de que el flujo sea ondulado.”(Viñas, 2011) Esta zona es aquella donde se forman los Altocúmulos lenticulares. (González López, 2006)



3. Turbulencias debido a nubes

Las nubes tal y como es definido por Acaso Liria y Casals Marcén en *Vocabulario de Términos Meteorológicos y Ciencias Afines*, (1986) son:

“Un conjunto variable de partículas minúsculas de agua líquida o de hielo, o de ambas cosas a la vez, en suspensión en la atmósfera. Este conjunto puede también contener partículas de agua líquida o de hielo de mayores dimensiones y partículas procedentes, por ejemplo, de vapores industriales, de humo o de polvo.”

Así, conocerlas y saber identificarlas resulta una tarea fundamental para las tripulaciones, ya que únicamente el profundo conocimiento de estas puede evitar las distintas turbulencias, reducción de visibilidad, engelamiento y descenso del techo de nubes derivados de navegar en ellas.

Para su formación se requiere de las condiciones de humedad suficiente, es decir, una determinada cantidad de vapor de agua en una región concreta de la atmósfera; núcleos de condensación (fundamentales para que se produzca un cambio de fase)¹⁸ y enfriamiento, el cual debe ser suficiente para alcanzar el punto de saturación. Este se da cuando la humedad relativa alcanza el 100%, es decir, aquella situación definida por unas condiciones determinadas de humedad y temperatura, en la que el aire no admite más vapor de agua sin llegar a condensar. Por ello, el punto de saturación podrá ser alcanzado por dos vías: aumentando la cantidad de vapor de agua en aire o disminuyendo la temperatura.¹⁹

El proceso por el que se produzca dicho enfriamiento determinará el proceso de formación de la nube. Así, podrán ser:

➤ Por contacto con una superficie fría. Se da en la interacción de masas de aire de distinta temperatura que da lugar a ascensos y condensación en la formación de frentes; al producirse un desplazamiento horizontal de una masa de aire cálido y húmedo sobre una superficie fría o masa de aire frío, es decir, por advección; y por radiación.²⁰ Tanto este proceso como el anterior requieren estabilidad atmosférica²¹ y, si se da a nivel del suelo, se forman nieblas.

➤ Por expansión adiabática. Es el proceso por el que se forman la mayoría de nubes y ocurre por convección²², por convergencia de aire en superficie (ante la convergencia de masas de diferente temperatura en superficie, se produce el ascenso de las más cálidas), por ascenso orográfico y por turbulencia, si es intensa con suficiente estabilidad atmosférica puede dar lugar al transporte de masas de aire más cálido y húmedo a elevadas alturas. Si se llega a alcanzar el nivel de saturación se produce una capa de nubes estratiformes con tope en el techo de la masa de aire turbulenta. Es el caso de los estratos y estratocúmulos.

Así, atendiendo a factores como la estabilidad atmosférica y el proceso de formación de nubes se forman tres grandes tipos de nube (representadas gráficamente en la *figura 6*):

❖ Nubes cirriformes. Están formadas por cristales de hielo a gran altura ante la sublimación

¹⁸ Partículas microscópicas como polvo o demás aerosoles que actúan como superficies sobre las que las partículas condensan (son los denominados núcleos higroscópicos)

¹⁹ Ante unas condiciones de humedad dadas, la temperatura a la que el aire alcanzará el punto de saturación se denomina Punto de Rocío (Dew Point).

²⁰ Durante la noche en calma, el suelo al perder calor por irradiación, provoca el enfriamiento de la masa de aire adyacente al suelo, dando lugar a una inversión térmica.

²¹ La atmósfera estable hace referencia a aquella situación en la que la temperatura de la troposfera desciende menos de 1°C/100 m. Puede darse la situación de atmósfera hiperestable, en la que la temperatura llega incluso a aumentar con la altitud. Se denomina inversión térmica.

²² Durante el día, el calentamiento de la superficie propicia el aumento de temperatura de las masas de aire adyacentes. Por ello, ascienden. Al hacerlo, en condiciones de humedad suficientes se alcanza el punto de saturación y se forman nubes. Son nubes convectivas de desarrollo vertical



del vapor de agua. Son nubes asociadas a fenómenos meteorológicos que tienen lugar en los niveles superiores de la troposfera.

❖ Nubes cumuliformes. Son nubes de desarrollo vertical asociadas a masa de aire inestable con movimientos convectivos. Estas son las únicas en sí mismas peligrosas para el vuelo.

❖ Nubes estratiformes. Nubes que se extienden horizontalmente, asociadas a masas de aire estables.

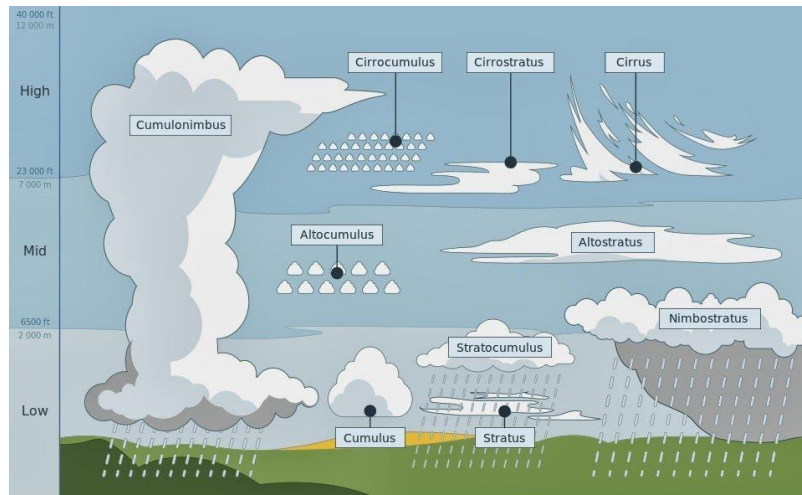


Figura 6: Representación esquemática de nubes (Morales, 2021)

La tabla (véase Anexo 1) refleja los diferentes tipos de nubes que existen, clasificadas según su altura, tipo de precipitación, turbulencia asociada, precipitación y demás características asociadas.

La importancia de las nubes en lo que respecta a la aviación reside en su afectación sobre la visibilidad y la posibilidad de presentar turbulencias o engelamiento, entre otros factores. Pero, además, estas determinarán el techo de nubes, anteriormente citado. Es decir, según la OACI, la “altura a que, sobre la tierra o el agua, se encuentra la base de la capa inferior de nubes por debajo de 6 000 m (20 000 ft) y que cubre más de la mitad del cielo”(OACI, 2016), es decir, para poder hablar de techo de nubes debe existir en los informes aeronáuticos, METAR, SPECI y TAF, una cobertura del cielo de más de 4 octas²³, y por tanto, reflejar BKN (entre 5 a 8 octavos) u OVC (8 octavos) . Este concepto será importante a la hora de determinar las reglas de vuelo bajo las que operar (VFR o IFR), y tanto los organismos internacionales, como OACI, como los distintos servicios de información de los aeródromos marcarán mínimos (entre los que se encuentra el techo de nubes) de empleo de las instalaciones, bajo las diferentes reglas de vuelo. Por lo general, las reglas de vuelo IFR se aplicarán cuando el vuelo bajo condiciones VMC no sea posible, aunque también debe contarse con unos mínimos para la operación en IMC. Así, la operación en reglas de vuelo VFR, está marcada por OACI como sigue:

En un aeródromo, dentro de una zona de control y sus inmediaciones, no se despegará ni se aterrizará, ni se entrará en la zona de tránsito de aeródromo o en el circuito de tránsito de dicho aeródromo si el techo de nubes es inferior a 450 m (1500 pies) o si la visibilidad en tierra es inferior a 5000 m, a menos que la autoridad aeronáutica del país defina otros parámetros.(OACI, 2016)

Así mismo, la variable meteorológica del techo de nubes será especialmente relevante cuando el vuelo se produzca en montaña, donde la entrada en bancos de nieblas y nubes es

²³ La octa es una medida para determinar la nubosidad en un determinado lugar. Para aplicar este sistema debe dividirse el cielo en 8 partes iguales. A partir de esta división podrá determinarse cuantas octas de cielo están cubiertas por distintos tipos de nubosidad.(Morales, 2021)



factible, lo que sumado a un cierto desconocimiento del terreno puede desembocar en consecuencias fatales. Además, la peligrosidad del vuelo en estas condiciones incrementa debido a la rapidez con la que los meteoros se desarrollan en este tipo de terreno. Es por ello que, cabe realizar un buen estudio meteorológico de la zona en la que se va a operar, sirviéndose, entre otros, de mapas de tiempo significativos que alerten a los pilotos de las probabilidades de que se desarrollen tormentas, o de entrar en bancos de nieblas o nubes.

3. Turbulencia en aire claro (TAC)

La turbulencia en aire claro es aquel efecto generado en la atmósfera libre no asociado a sistemas nubosos. A pesar de su gran influencia sobre los vuelos a altas cotas, las TAC no se diferencian en su efecto sobre la aeronave del resto de turbulencias, si no que más bien, lo hacen en la manera en la que estas se desarrollan, a que fenómenos están asociados, cuando tienen mayor predisposición a aparecer y a la ausencia de nubosidad en las regiones que aparecen.

Los fenómenos que pueden desarrollar la TAC son corrientes en chorro y sus regiones circundantes (donde se presenta una elevada cizalladura de viento), fundamentalmente, así como otros que dan lugar a ondulaciones en el flujo de aire en altura, como son las ondas de montaña, y zonas de baja presión o vaguadas (según la representación en mapas de isobaras e isohipsas) en niveles altos. Sin embargo, estos otros están relacionados también con la corriente en chorro o, en su defecto, con fuerte cizalladura del viento en altura, que dan lugar a que estas ondas deriven en ondas de gravedad-cizalladura.

La presencia de corriente en chorro constituye uno de los principales fenómenos que pueden dar lugar a este efecto y, por ello, se toma en especial relevancia a la hora de elaborar las predicciones vinculadas al TAC. Pero ¿Qué es la corriente en chorro?

Según la OMM, esta no es sino “una fuerte y estrecha corriente concentrada a lo largo de un eje casi horizontal, en la alta troposfera o en la estratosfera, caracterizada por una fuerte cizalladura horizontal y vertical, presentando uno o más máximos en la velocidad.” (Viñas) La razón de existencia de la corriente en chorro son las diferencias térmicas entre las masas de aire tropicales y polares (debido al calentamiento diferencial de la Tierra), cuyo gradiente de presión, sumado al efecto de rotación de la Tierra (efecto Coriolis) provoca el movimiento de flujos de aire en altura a elevadas velocidades. En el HN, el chorro polar (el de mayor relevancia para los vuelos próximos a las latitudes próximas a la península) se encuentra en torno al paralelo de los 60° N, entre la celda Polar y de Ferrel, a la altura de la troposfera. Fluye hacia el Este con una intensidad de unos 200 nudos²⁴, aproximadamente, aunque varía con la estación, pues aumenta en los meses de invierno (cuando el gradiente de temperatura y cizalladura son mayores) y con el movimiento de masas de aire.²⁵ (González López, 2006)

Estos máximos de velocidad son representados en los mapas de isotacas²⁶ como el eje del chorro. Este “presenta ondulaciones, tanto en el plano vertical como en el horizontal.” (González López, 2006) Además, es discontinua, ya que es afectada por vientos de otros caracteres.

La turbulencia asociada al chorro puede producirse tanto en su eje, como en zonas próximas, donde la cizalladura es elevada. Esto se debe a que la troposfera constituye la frontera de separación entre masas de aire frías (propias de los estratos más elevados de la atmósfera) con masas de aire estratosférico (más cálido). Esta elevada diferencia de temperatura provoca ondulaciones sobre la tropopausa, formando ondas de gravedad que por efecto de la cizalladura pueden llegar a constituir turbulencias.

²⁴ 1 nudo= 1,852 km/h

²⁵ Se ha observado valores máximos de velocidad del flujo detrás de frentes fríos, mientras que detrás de los cálidos, los máximos no son tan relevantes.

²⁶ Son aquellas líneas que unen puntos donde el viento tiene igual intensidad. Para la representación de la corriente en chorro suelen emplearse mapas de isotacas a 500hPa o 300hPa. (Morales, 2021)



LUIS MARÍA MESTRE BULEO

La turbulencia en aire claro puede darse también debido a las ondulaciones del chorro. Estas se denominan ‘Ondas de Rossby’, y no sólo conllevan la turbulencia media o severa asociada al chorro, sino que, en caso del chorro polar, además traen asociadas sistemas “altas presiones a la derecha de la corriente y bajas presiones a la izquierda, que en superficie se reflejan como anticiclones [de naturaleza anticiclónica] (como el anticiclón de las Azores, que tiene una enorme influencia en la Península Ibérica) y borrascas [de naturaleza ciclónica], respectivamente.”(Portillo) Este fenómeno es representado en los mapas de isohipsas con vaguadas y dorsales, respectivamente, y en ciertas ocasiones, puede darse la situación de que estas masas de aire queden aisladas del resto del chorro. Cuando se da esta situación, en caso de ser masas de aire de naturaleza ciclónica, el sistema de bajas presiones aislado se denomina gota fría. (Portillo)

Otro importante fenómeno relacionado con la aparición de TAC son las ondas de montaña, ya que la corriente de chorro o la fuerte cizalladura de viento en altura son susceptibles de derivar las ondas, producidas por el obstáculo y que alcanzan los estratos superiores de la atmósfera, en ondas de gravedad-cizalladura.(González López, 2006)

Así, en todos los casos anteriores, la intensidad de las TAC dependerá de la intensidad del flujo en el chorro y de la cizalladura (a mayor velocidad del aire en el chorro, mayor cizalladura para disminuir la velocidad del viento hasta la normal en el resto de la atmósfera libre), así como de lo violento de la curvatura de las isobaras, en el caso de las TAC en zonas de Ondas de Rossby.

Con respecto al vuelo en zonas próximas a la corriente en chorro cabe destacar la importancia del estudio previo necesario de la ruta, ya que adquiere especial relevancia conocer la localización e intensidad de los vientos susceptibles de afectar a los vuelos intercontinentales, por ejemplo, que se hagan próximos a las latitudes polares. Tal es la afectación de este fenómeno sobre las operaciones aéreas que diariamente los pilotos de aerolíneas comerciales y militares de caza, se aprovechan de los vientos del jet stream que ofrecen vientos en cola elevados que permiten reducir el tiempo de vuelo y disminuir el consumo de combustible, ya que estos fuertes vientos en altura afectan en gran medida a la autonomía de vuelo. Para su estudio los pilotos se sirven de los mapas de viento en altura y de tiempo significativo (SIGWX), cuyos datos “cobra(n) especial importancia en los trayectos largos en IFR, dado que en niveles superiores a FL050 el viento supera fácilmente los 25Kt”(Quintana Trenor, 2021). La predicción ofrecida a las tripulaciones acerca de la TAC se basa en probabilidades de toparse con este fenómeno en distintas rutas, en función de las condiciones meteorológicas de la zona susceptibles de generar TAC y de observaciones satelitales de los jet stream y otras causas.

Así pues, una vez se está volando por la región de la corriente en chorro o de ondas de gravedad-cizalladura, la actuación de los pilotos al entrar en zonas de turbulencia en aire claro debe depender de si recibe viento en cola o cara, o por el contrario cruzado. No obstante, salvo que el vuelo se haya planeado por esta ruta y las TAC sean asumibles, siempre debe adaptarse la velocidad a la máxima con turbulencias, que será aquella velocidad que permita una máxima potencia y mayor régimen de ascenso. Además, deberá decidirse si desconectar el piloto automático si se prevén turbulencias intensas. Así mismo, “cuando un avión está sujeto a turbulencias moderadas y severas, los pilotos deben informar al ATC —Control de tráfico aéreo— para ayudar a otros tráficos en el área circundante y avisar sobre posibles áreas peligrosas. Un simple cambio de Nivel de Vuelo (Altitud) suele ser suficiente para salir del área turbulenta.” (Domenech Llinares, 2019)

De tal manera, al estar volando próximo a la corriente en chorro, debe procurarse hacerlo en el eje, pues es donde la temperatura se mantiene más estable, no existe cizalladura, y el viento es más favorable al desplazamiento de la aeronave. No obstante, ante cambios en la OAT, indicador de desvío de la aeronave con respecto al eje, simplemente se debe abandonar la región



turbulenta, cambiando el nivel de vuelo o el rumbo, ya que las zonas de turbulencia se alargan en la dirección del viento, pero no abrazan zonas de gran espesor.

Si se entra en zona de TAC con viento cruzado, obviamente, la aeronave no podrá viajar sobre el eje del chorro, por lo que directamente, deberán analizarse los cambios en la OAT y determinar si se debe ascender o descender, de igual manera que en el anterior caso, para evitar las zonas de mayor turbulencia.(González López, 2006)

4.Turbulencia debida a tormentas

Las tormentas son definidas por la RAE como aquella “perturbación atmosférica violenta acompañada de aparato eléctrico y viento fuerte, lluvia, nieve o granizo.” (2014) Estas son un fenómeno meteorológico complejo, pues abarcan gran cantidad de condiciones climáticas diferentes a estudiar.

Además, tienen gran repercusión sobre el vuelo de aeronaves en cuanto a visibilidad, turbulencias, engelamiento y reducción del techo de nubes. No obstante, la gran complejidad de este aparato meteorológico requiere que se trate en un capítulo independiente.

En resumen, la turbulencia es aquel fenómeno, derivado de distintas condiciones climáticas, que genera sobre la aeronave aceleraciones, ascencencias y descendencias, variaciones en la altitud o, simplemente, cambios en la guiñada y cabeceo o sacudidas, producidos por rachas. Por tanto, la importancia de estos vendrá determinado, principalmente, por el tamaño e intensidad de la turbulencia, tamaño de la aeronave y velocidad de esta en su ruta, pues a mayor velocidad, menor potencia disponible, mayor número de remolinos atravesados y mayores esfuerzos ejercidos sobre la estructura de las aeronaves y a mayor estrés es sometido el piloto. Por ello, la intensidad de la afectación de las turbulencias sobre la aeronave, puede llevar a los pilotos a valorar el desvío de la aeronave con respecto a la ruta establecida.

Además, en caso de los procedimientos de despegue y aterrizaje, aparte de ser relevante los tipos de turbulencia comunes en vuelo de crucero, también adquieren importancia aquellas generadas a niveles bajos. Esto, sumado a la posibilidad de existencia de vientos cruzados en superficie, hace de estos procedimientos maniobras especialmente complejas y delicadas en una fase del vuelo crítica en la que, a altas velocidades (en caso de los aviones) se alcanza la superficie.

4.2.2. Engelamiento

El engelamiento hace referencia a aquel fenómeno de “formación de cencellada o escarcha sobre una aeronave”(Acaso Liria y Casals Marcén, 1986, p.129), producido a partir de la acumulación de hielo tras el impacto del agua subfundida²⁷ del aire ambiente sobre la aeronave.

Para que este fenómeno pueda tener lugar deben cumplirse determinados factores. El primero de ellos es la necesidad de que exista humedad en el aire, formado por agua en estado líquido; y que la temperatura ambiente sea próxima o inferior a 0º, pero no excesivamente bajo, ya que en ese caso difícilmente el agua se mantendría en estado líquido, pues se convertiría en hielo. Esta es la razón por la cual este fenómeno se da con mayor intensidad en las capas inmediatamente superiores a la isocero²⁸ (0º) y no en niveles muy superiores, donde la posible

²⁷ El agua subfundida hace referencia a aquella que se encuentra en gotitas en suspensión en un nube o en niebla o como precipitación con una temperatura inferior a 0º. De tal manera, cuando el agua subfundida entra en contacto con una superficie, en el caso de estudio, con la aeronave, esta recibe el estímulo energético necesario para romper el equilibrio inestable en el que se encuentra y cambiar de fase a estado sólido, hielo.

²⁸ La isocero es la altitud en la que las masas de aire se encuentran a 0ºC.



agua presente se encuentra en forma de hielo directamente y este efecto, aún susceptible de ocurrir, reduce su intensidad enormemente (De forma ocasional, se puede desarrollarse hielo a temperaturas más altas, con lo cual, los pilotos considerarán como temperatura de “alarma” +4°C). Es necesario también que la temperatura de la superficie de la aeronave sobre la que se produce el engelamiento se encuentre inferior a 0° y finalmente, que las gotas de agua tengan un diámetro adecuado, pues “si las gotas que constituyen las nubes son grandes, sólo pueden ser superenfriadas dentro de un corto intervalo de temperatura bajo cero” (Ledesma and Baleriola, 2004), mientras que, por el contrario, si son demasiado pequeñas estaremos ante un engelamiento ligero. (González López, 2006)

Los tipos de hielo (y, en gran medida, la intensidad del engelamiento) vendrán determinados por su forma, estructura y manera de adherirse a la aeronave. Así, podrá ser:

➤ Hielo granulado. Causado por el impacto sobre la estructura de gránulos de hielo de diámetro pequeño. No genera elevado peso extra para la aeronave y su capacidad de adherirse es reducida, ya que es fruto de un proceso de congelación rápido que ocurre a temperaturas muy bajas, donde la existencia de agua superenfriada en la atmósfera se encuentra en gotas muy pequeñas (del orden de entre -15°C y -40°C). Se adhiere únicamente al borde de ataque de las alas o palas. Este tipo de engelamiento puede darse en nubes estratiformes, aunque en su caso suele ser ligero o, en algunos casos, moderado.

➤ Hielo claro. Causado por el impacto sobre la estructura de gotas de agua subfundida de diámetro grande. Es propio del de nubes cumuliformes o nimbostratos, y al ser fruto de un proceso de congelación más lento (puesto que las gotas de agua subfundida son de mayor tamaño, ya que se encuentran a temperatura del orden de entre -2°C y -15°C) si tienen gran capacidad para adherirse. El cristal de hielo suele adherirse al B.A. y gran parte de la superficie del extradós, ya que las gotas grandes al impactar contra la superficie y congelarse liberan calor latente por el impacto, el cual es aprovechado por gotas que impactan posteriormente y hacen resbalar por la superficie hasta congelarse. Por ello, la superficie del perfil alar afectada por el engelamiento es extensa y se le atribuye la intensidad de moderado o severo.

➤ Lluvia engelante. Esta al precipitar es agua líquida superenfriada al pasar por capas con temperatura inferior a 0°, pero se congela al instante al impactar contra la estructura de la aeronave, al liberar calor latente. Se acumula uniformemente sobre el fuselaje, por lo que resulta especialmente peligrosa, “en forma de un hielo compacto, a menudo macizo y transparente.”(Morales, 2021) Suele ser típica de precipitación asociada a nimbostratos en la parte delantera de frentes cálidos en invierno. Cuando este fenómeno es factible es vital conocer la altitud de la isocero, es decir, el nivel del aire que se encuentra a 0° C, y la OAT de la masa del aire sobre la que vuela el helicóptero. Esto será una medida preventiva básica para mantener la seguridad de vuelo.(González López, 2006)

➤ Nieve húmeda. “Constituida por cristales de hielo coexistiendo con gotas de agua subfundida y, a temperaturas próximas a 0° C, puede dar lugar a engelamiento.”(González López, 2006)

➤ Niebla helada. Formada por microcristales de hielo en suspensión. Pueden existir nieblas de hasta -15°C.

➤ Niebla engelante. Similar a la lluvia engelante, está formada por agua subfundida en suspensión. Produce “acumulaciones de hielo a sotavento de los objetos.”(Morales, 2021)

➤ Escarcha. Es la “deposición directa del vapor de agua en el fuselaje de las aeronaves en forma de agujas o plumas cristalinas.”(Lozano, 2013) Se da cuando el aire saturado de humedad se enfría por debajo de 0° C. Puede darse sobre aeronave en tierra cuando hay aire húmedo, temperaturas inferiores a 0° C y atmósfera estable o en vuelo cuando la aeronave avanza desde masas de aire con temperatura menor a 0° hasta otras más cálidas y húmedas.

Este fenómeno, al estar asociado a la existencia de gotas de agua subfundida, está



LUIS MARÍA MESTRE BULEO

relacionado con los movimientos ascendentes de aire húmedo, susceptibles de ocurrir en situaciones de turbulencia en estratos inferiores de la atmósfera que generan ascensos, movimientos ascendentes de aire húmedo debido a terrenos escarpados o en zonas de costa, pasos de frentes cálidos que dan lugar a ascensos de aire cálido (generando, entre otras, nimbostratos, relacionados con el engelamiento de hielo granulado y la lluvia engelante) y de frentes fríos que producen movimientos convectivos de masas (produciendo el desarrollo de nubes cumuliformes, cuyo movimiento ascendente de aire permite a las gotas alcanzar diámetros mayores, dando lugar a engelamiento de hielo claro), o simplemente, al vuelo en niveles de vuelo (FL) de alta cota. Cabe recordar que en la troposfera se produce una disminución de temperatura de en torno a 2°C por cada 1000 ft. No obstante, también se puede producir este efecto sobre las aeronaves en tierra y sobre la superficie de las pistas, cuando se dan las condiciones de temperatura y humedad correspondientes o de precipitación necesarias.

El engelamiento puede ser clasificado en torno a distintas variables que lo definen, como su intensidad y los elementos de la aeronave a los que afectan.

En cuanto a su intensidad, se distingue entre ligero, moderado y severo. El primer tipo no requiere acción del piloto como cambios de altitud o activación de los sistemas de deshielo, excepto si se prolonga en el tiempo. El engelamiento severo si requiere que se adopten este tipo de medidas, aunque sea por un corto periodo de tiempo y, finalmente, el severo requiere un cambio de nivel de vuelo inmediato, ya que la acción de los sistemas antihelio puede no ser efectiva.

A nivel aeronáutico, cabe distinguir entre el engelamiento que afecta a la estructura externa de la aeronave (engelamiento estructural) y el engelamiento interno, que afecta, principalmente, al funcionamiento de los motores.

La importancia del engelamiento estructural reside en su afectación sobre las áreas de la aeronave que definen sus propiedades aerodinámicas y otras de especial relevancia para el vuelo y gobernabilidad de la aeronave. Este tipo de engelamiento recoge aquel formado sobre las estructuras externas de las aeronaves, como son, los bordes de ataque y cola, hélices, tubo de Pitot y toma estática y otros elementos, como antenas, cristales y tren de aterrizaje, pudiendo afectar al desarrollo de maniobras, afectación sobre las ondas de radio, visibilidad... Aquel engelamiento que actúa sobre los B.A es especialmente relevante, ya que la acumulación de hielo sobre las regiones de la aeronave que generan la sustentación da lugar a que “la capa límite se vuelve más turbulenta a lo largo de la cuerda aerodinámica, produciéndose la separación del flujo laminar para un ángulo de ataque más pequeño”(Lozano, 2013), dando lugar a un aumento de peso y de la resistencia aerodinámica generada, perdiendo así sustentación, requiriendo mayor potencia para mantener un vuelo recto y nivelado y aumentando la fatiga estructural.

También es importante el engelamiento sobre el tubo Pitot y las tomas estáticas exteriores. Sobre el primero, al impedir la entrada de aire a través de él, la medida de velocidad indicada(IAS), recogida por la diferencia de presión entre la presión atmosférica y la del viento relativo que la aeronave recibe de cara, se hace imposible saber la velocidad entra esta y la masa de fluido sobre la que se desplaza, dando lecturas incorrectas de las IAS en el anemómetro, además del error propio de la instalación y compresibilidad. De manera semejante, el engelamiento sobre las tomas estáticas impide realizar una lectura correcta de la presión de la masa de aire en la que se encuentra la aeronave, por lo que no se puede determinar correctamente la altura, dando falsas indicaciones en el altímetro y variómetro, entre otros instrumentos.

El engelamiento interno, al afectar al funcionamiento de los motores, cabe tenerlo en consideración, pues un fallo de estos o una pérdida de potencia, derivado de este fenómeno puede ser fatal. Esto se puede deber a que el hielo puede formarse en las entradas de aire del motor (impidiendo la circulación de aire necesaria) o introducirse en los conductos que trasladan



LUIS MARÍA MESTRE BULEO

el aire hacia las cámaras de combustión, dando lugar a “vibraciones en el fan con posibilidad de desprenderse un alabe, causando daños internos en el motor. Y [...] la reducción del flujo de aire, reduciéndose así el empuje de la aeronave.”(Lozano, 2013) En ciertos modelos de helicópteros, como el EC-135, la probabilidad de que ocurra este fenómeno es disminuida al hacer pasar el aire que reciben las entradas de aire del motor, por compartimentos próximos a los ejes de salida de potencia, por lo que el aire que recibe el motor es calentado a una temperatura óptima de funcionamiento.

El engelamiento interno también hace referencia al hielo formado en el carburador, y aunque este no es debido al impacto directo del aire, se debe al enfriamiento adiabático que sufre el aire debido a la expansión en esta zona. Así, “las gotas de agua líquida que contiene, se congelan en la superficie interna del carburador, disminuyendo su diámetro interno o también pueden trabar la mariposa que regula el paso del aire, variando por lo tanto las condiciones de la mezcla.” (Lozano, 2013) Esto genera una reducción del empuje generado por el motor.

A la hora de tratar las distintas medidas para evitar este fenómeno, cabe destacar la protección meteorológica, basada en evitar las zonas en las que existen condiciones engelantes, gracias a las predicciones y partes meteorológicas, de mano de los METAR, TAF y mapas de Tiempo significativo; y los medios técnicos, es decir, aquellos que evitan que se forme hielo o eliminan el ya formado. De estos últimos destaca el empleo de medios mecánicos; térmicos, como el empleado en los tubos Pitot; y los baños de líquido anticongelante de las estructuras más críticas.

4.2.3. Cizalladura del viento

Como ya se ha venido tratando, el concepto de cizalladura hace referencia al gradiente de viento, tanto horizontal como vertical, es decir, a “el cambio de la dirección y/o intensidad del viento en una distancia dada”.(González López, 2006) Este fenómeno puede darse a cualquier altitud, ya que son numerosos factores los que dan lugar a ello (razón por la cual, según ciertos estudios²⁹, “casi la mitad de los accidentes se deben al viento” (Pelacho Aja, 2018)), sin embargo, para la aviación resulta especialmente conflictivo en la capa límite de la superficie, donde determinados tipos de rachas pueden producir cambios importantes de la velocidad de la aeronave con respecto al volumen de aire sobre el que se desplaza y desembocar en turbulencias y pérdidas de control durante las maniobras de despegue y aterrizaje, cuando el tiempo de reacción es especialmente crítico.

Por esta misma razón, un conocimiento práctico que permita saber identificar a las tripulaciones regiones en las que es factible este fenómeno y qué consecuencias puede desencadenar será vital para evitar incidentes y accidentes y poder ejecutar el plan de vuelos y misiones de acuerdo a lo establecido. Además, permite contribuir con la seguridad de vuelo, ya que la fuente principal de identificación de este fenómeno son los pilotos. La confirmación por su parte de este fenómeno permite reflejarlo en los METAR, ya que, a excepción de los aeropuertos con mayor volumen de tráfico, muy pocos aeropuertos cuentan con los dispositivos requeridos para su detección, como son los perfiladores de viento (que permiten identificar la cizalladura), aunque si son comunes los sensores de viento.

Por ello, dada su importancia, a continuación, se analizarán los efectos sobre la aeronave y sus propiedades aerodinámicas al ser sometidos a la acción de diferentes rachas, durante la ejecución de maniobras en las que su afectación es más crítica.

1. Fase de despegue y aproximación con aumento del viento de cara o cola. Durante estas, un aumento o disminución (debido al aumento del viento de componente de cola) de la componente del viento en cara da lugar a una mayor o menor incidencia del viento relativo,

²⁹ Cfr. National Transportation Safety Board: <https://www.nts.gov>



respectivamente, sobre el borde de ataque de las palas o alas, generando una mayor o menor sustentación sobre estas. Ante ello, la aeronave sufrirá un ascenso o descenso con respecto a la senda de planeo trazada para esta maniobra. Por esta razón, los pilotos deberán disminuir o aumentar, según corresponda, la potencia dirigida a las turbinas o rotores que generan el empuje para poder alcanzar la velocidad requerida y así adecuar la actitud, velocidad y altura al procedimiento. De lo contrario, en caso del despegue, la aeronave se desviará de la ruta establecida en cuanto a la altura o verá la seguridad de esta comprometida al volar con un ángulo de ascenso demasiado bajo; mientras que, en caso de aterrizaje, se efectuará un aterrizaje largo o corto. Un indicador del viento serán lecturas en el anemómetro de IAS elevadas o reducidas con respecto a la GS, es decir, la velocidad real sobre el suelo.

2. Fase de despegue y aproximación con cizalladura de viento cruzado. Este fenómeno es especialmente peligroso, ya que afecta a la trayectoria de la aeronave, desplazándola lateralmente y creando una derrota, obligando al piloto a modificar el heading (rumbo de cabeza de la aeronave) para seguir el curso deseado. Además, si este viento es muy severo puede incluso afectar la estabilidad y estructura de la aeronave, ya que sus propiedades aerodinámicas no contemplan volar con un viento cruzado mayor que el recibido de cara y el fuselaje puede sufrir esfuerzos.

3. Cizalladura vertical por ascendentes y descendentes. Ante este efecto, la aeronave en cuestión es susceptible de sufrir aumentos o disminuciones de la sustentación ejercida sobre las palas o alas. Esto se debe a que, ante una ascendente, el ángulo de ataque del perfil alar aumenta, propiciando un aumento de esta fuerza (que, en caso de mantenerse, provocaría el vuelo de la aeronave por encima de la senda marcada) hasta un determinado ángulo, denominado ángulo de pérdida, a partir del cual la sustentación cae bruscamente. Esto es especialmente peligroso si se da en fases de vuelo próximas a la superficie. (González López, 2006)

De igual manera, ante corrientes descendentes, el ángulo de ataque decrece, cayendo la sustentación, lo que provocará que la aeronave vuele a alturas inferiores a las previstas. Aumenta así, el riesgo de perder el control de la aeronave e impactar contra la superficie cuando se ejecutan maniobras cerca del suelo.

Es por su grave incidencia sobre la seguridad de vuelo, que resulta fundamental la labor de observadores y controladores, que al estimar direcciones, intensidades y rachas de viento 'in situ', ofrecen a los pilotos las herramientas para poder ejecutar estas maniobras con seguridad.

Tal y como se ha comentado, la cizalladura puede darse tanto a niveles altos como en niveles bajos. En los estratos superiores de la atmósfera hace referencia a la generada por la corriente en chorro, analizada en el capítulo de turbulencias. Así, a continuación, se detallarán algunas de las causas desencadenantes de este fenómeno en estratos inferiores de la troposfera. No obstante, estas están íntimamente ligadas con los fenómenos estudiados en el capítulo de turbulencias, ya que la cizalladura es un gran generador de estas.

1. Frentes en superficie. La importancia de estos en cuanto a la cizalladura del viento radica en la variación de este delante del frente, al paso del frente y detrás de él. Por ello, en una superficie relativamente corta se genera un gran gradiente horizontal de viento. Esto es especialmente relevante, como se ha demostrado ya, en las maniobras de aterrizaje y despegue, ya que puede suponer que, tras despegar con viento en cara, este cambie y se presente cruzado para la aeronave. Así, será importante evitar volar a lo largo del frente, como ya se comentó en capítulos anteriores.

2. Inversión térmica. El fenómeno de inversión de la temperatura se debe a la existencia en altura de masas cálidas, lo que provoca el aumento de la temperatura con el ascenso. Así, este gradiente de temperatura dará lugar a diferencias de presión y la consecuente cizalladura, que será más intensa en el techo de la inversión y cuanto mayor diferencia de temperatura haya entre



las masas de aire. Esta puede ser generada por diversos fenómenos, como son los frentes superficiales, la brisa de mar y de montaña y la radiación nocturna.

3. Vientos intensos en superficie y con rumbo distinto al viento en altura, por efecto de la fricción.

4. Flujo de viento ondulado debido a condiciones locales y orográficas.

5. Precipitación. La cizalladura, tanto horizontal como vertical, es generada por el efecto de la precipitación en su caída, en concreto, por las corrientes verticales asociadas a ella.

6. Cizalladura producida por tormentas. La cizalladura más relevante para las aeronaves producida a niveles bajos es aquella producida debajo del cúmulo de la tormenta, debido a los micro reventones, la fuerte precipitación³⁰, los frentes de racha asociados y los tornados. Estos serán analizados en el capítulo referente a las tormentas.

De tal manera, la gran afectación de este fenómeno a la aviación hace necesario que tanto pilotos como controladores sepan identificarlo y evitarlo, en la medida de lo posible, así como ser conscientes de las medidas que deben adoptar y cuando. Para ello, se debe prestar atención a los informes meteorológicos, estudiando las posibles zonas afectadas por fenómenos capaces de desencadenar la cizalladura; analizando en vuelo la lectura de los diferentes instrumentos y prestando atención en el terreno a los posibles indicadores de la cizalladura. (González López, 2006)

4.2.4. Visibilidad

La OACI define, en su anexo 3, la visibilidad en el sentido aeronáutico como aquella

“distancia máxima a la que pueda verse y reconocerse un objeto de color negro de dimensiones convenientes, situado cerca del suelo, al ser observado ante un fondo brillante o la distancia máxima a la que puedan verse e identificarse las luces de aproximadamente 1 000 candelas ante un fondo no iluminado.”(OACI, 2016)

Así pues, en lo referente a la operación de las aeronaves, es especialmente relevante la visibilidad horizontal, vertical, oblicua y la RVR. A continuación, se definirá cada una de ellas.

➤ Visibilidad horizontal. Hace referencia a “la distancia máxima a la cual un observador puede ver e identificar un objeto situado en la proximidad del plano horizontal en donde él se encuentra.”(Acaso Liria y Casals Marcén, 1986, p.388)

➤ Visibilidad vertical. “Distancia máxima a la cual un observador puede ver e identificar un objeto sobre su misma vertical, hacia arriba o hacia abajo.”(Acaso Liria y Casals Marcén, 1986, p.388)

A novel aeronáutico, se entiende como “la distancia vertical a partir de la cual el piloto tiene visión de la pista”(González López, 2006)

➤ Visibilidad oblicua. “Distancia máxima a la cual un observador puede ver e identificar un objeto situado en distinta altitud y distinta vertical ala que él se encuentra.”(Acaso Liria y Casals Marcén, 1986, p.388) Aeronáuticamente, se refiere a la distancia máxima desde la cual el piloto tiene visual de la pista, mirando desde la senda de planeo.

➤ Alcance visual en la pista (RVR). “Distancia hasta la cual el piloto de una aeronave que se encuentra sobre el eje de una pista puede ver las señales de superficie de la pista o las luces

³⁰ Tanto los micro reventones como la precipitación se traducen en esfuerzos descendentes que obligan a los pilotos a aumentar la potencia requerida, a fin de mantener la senda en vuelo recto y nivelado o de planeo o ascenso. Estas variaciones bruscas de potencia aplicada pueden ser críticas cuando la potencia remanente es escasa y el vuelo se ejecuta a baja altura.



que la delimitan o que señalan su eje.” (OACI, 2016)

“Los criterios para determinar el tipo de vuelo que se debe efectuar, es decir, entre vuelo visual (VMC) e instrumental (IMC) se basan en mediciones de la visibilidad en tierra, techo de nubes y distancia de la aeronave a nubes.”(González López, 2006) De hecho, su importancia es tal que todos los aeródromos poseen un documento (en caso de las bases y aeródromos militares cuentan con las Normas Operativas(NOP) en las que esta información viene reflejada, a disposición de todos los usuarios que requieran de los servicios aeronáuticos) en el que se reflejan los límites mínimos de operación a los que están sujetos, y en función de las condiciones emplear distintos tipos de reglas de vuelo, lo cual determinará procedimientos de aproximación, alturas a las que volar, uso o no de distintos tipos de referencias....Estos pueden ser los mínimos de visibilidad marcados por los organismos aeronáuticos competentes o ser más restrictivos, según las características de dichos aeródromos.

Así, dado que la visibilidad es afectada por numerosos factores y varía desde ‘nula’ hasta ‘máxima’, los informes meteorológicos deben ofrecer aquella visibilidad que sea relevante para la operación en los aeródromos. Esta es la visibilidad reinante, definida por la OACI como:

El valor máximo de la visibilidad, observado de conformidad con la definición de ‘visibilidad’, al que se llega dentro de un círculo que cubre por lo menos la mitad del horizonte o por lo menos la mitad de la superficie del aeródromo. Estas áreas podrían comprender sectores contiguos o no contiguos.(OACI, 2016)

Además, la anteriormente comentada RVR, también debe venir reflejada en los partes meteorológicos METAR “si es inferior a 1500 m, y se debe dar por incrementos de 25 a 60 m hasta los 800 m y de 100 m para una RVR superior”(Lozano, 2013, p.8), así como disminuciones significativas de visibilidad para distintos rumbos.

Además, aquellos factores propios de lo que se está observando, como son el color, brillo, tamaño de los objetos, accidentes orográficos, paisajes...afectan a la visibilidad de los mismos en vuelo. Por ello, no será lo mismo para un piloto de helicópteros tomar en una pista bien iluminada que hacerlo en una montaña, durante una maniobra fuera de campo, entre otros. Inclusive, sobre la visibilidad afectará también condicionantes como la posición del sol, que afectan a la manera en la que los observadores reciben la luz, y todos aquellos factores que afectan a la “transparencia del aire”(Ledesma and Baleriola, 2004), como puede ser la humedad, polvo, aerosoles, humo y demás partículas en suspensión, cuya mayor o menor concentración en el aire afectarán a la luz recibida. Además, el viento también jugará un importante papel sobre los diferentes tipos de visibilidad comentados, pues la capacidad de este fenómeno de desplazar las citadas partículas y gotas impedirá su estacionamiento. Por ello, a continuación, se incluye una descripción de los fenómenos que afectan principalmente a la visibilidad y se consideran peligrosos para el desarrollo de la actividad aeronáutica, en tanto que afectan mayoritariamente a maniobras críticas como son el despegue, el aterrizaje o el rodaje. Estos, según la OACI en su *Anexo 3* son aquella serie de fenómenos de tiempo presente como:

➤ Niebla. Este fenómeno hace referencia a la “suspensión en la atmósfera de gotas muy pequeñas de agua, que reducen la visibilidad horizontal sobre la superficie del globo a menos de un kilómetro.”(Acaso Liria y Casals Marcén, 1986, p.260) Esta podría compararse a una nube estratiforme próxima o en contacto con la superficie terrestre, por lo que los procesos de formación son los propios de las nubes. Además, el aumento de la humedad relativa por aumento de la cantidad de vapor en aire debido a la evaporación de masas de agua o de la precipitación y el estancamiento próximo a la superficie de los gases emitidos en una combustión, debido a una atmósfera altamente estable, pueden provocar también su formación.

➤ Bruma. Se trata del mismo fenómeno que el comentado anteriormente, sin embargo, mientras la niebla reduce la visibilidad horizontal por debajo de los 1000 metros, la bruma lo reduce a entre 1000 y 5000 metros. Este hecho se debe a la menor densidad de gotitas de agua



o aerosoles en suspensión.

➤ Nubes. Como ya se ha analizado, existen una gran variedad de nubes definidas por su proceso de formación, forma, tamaño y demás características que determinan los efectos que tienen asociados. Por ello, hay gran diferencia en cuanto a la afectación sobre la visibilidad de los distintos tipos. De tal manera, las nubes cumuliformes son aquellas que más limitan la visibilidad, llegando los Cumulonimbus incluso a limitarla hasta los 20 m., dentro de ella. Entre la variedad de nubes estratiformes, la nube más limitante es el Nimbosestrato, mientras que la visibilidad dentro de estratos y estratocúmulos se encuentra entre los 150-200 m., siendo incluso superior en altoestratos y altocúmulos. Este fenómeno, junto a los anteriores dos comentados, son los de mayor relevancia en cuanto a aquellos con repercusión sobre la visibilidad, puesto que su posible presencia a baja cota y su elevada frecuencia en latitudes propias a las de España hacen de ellos un verdadero meteoro a tener en cuenta durante el pilotaje y estudio de las rutas con los mapas de Tiempo Significativo a Baja Cota.

➤ Calima. Según Acaso Liria y Casals Marcén, se refiere a “la suspensión en la atmósfera de partículas secas, extremadamente pequeñas, invisibles a simple vista y bastante numerosas que da al aire un aspecto opalescente.”(1986) Cuando se da este fenómeno la visibilidad suele ser reducida por debajo de los 5000 m.

➤ Humo. Es un fenómeno recurrente en zonas industriales, y de la misma manera que en el caso anterior, se trata de partículas en suspensión que limitan la visibilidad hasta los 5 km, pero en este caso procedentes de la combustión y susceptibles de generar nubes o nieblas.

➤ Arena y polvo. La presencia de estas estos está relacionada con “vientos fuertes y atmósfera inestable”(González López, 2006), que producen la formación de remolinos turbulentos, dando lugar al ascenso por turbulencia de partículas de arena levantadas durante los periodos secos. Este fenómeno tiene una gran repercusión para las operaciones aéreas en la fase de despegue y aproximación, ya que la reducción de visibilidad, en ciertos casos por debajo de 1000 m; el viento racheado y turbulento y la penetración del polvo y arena en los motores y turbinas puede tener un desenlace fatal. Además, para los helicópteros este hecho es especialmente prejudicial, pues su capacidad de aterrizar sobre la vertical produce que el chorro de aire descendente levante gran cantidad de polvo y arena durante las tomas. Es el denominado Brown out o White out (en caso de ocurrir en nieve) Para las tomas en este ambiente se recomienda hacer unas pasadas sobre el punto para limpiar la zona y realizarla directamente hasta el suelo, sin pasar por estacionario. En caso de perder visibilidad es recomendable abortar la toma cuando se está en estacionario sobre el punto o en corta final a poca velocidad.

➤ Precipitación. Este fenómeno es aquel por el cual “partículas líquidas o sólidas procedentes de las nubes alcanzan el suelo.” (González López, 2006) Para que ocurra, las gotas susceptibles de precipitar deben ser suficientemente grandes como para que por gravedad caigan, para lo cual su tamaño debe aumentar desde las gotitas propias de las nubes hasta las precipitables. Existen tres métodos posibles. Condensación-sublimación, condensación-coalescencia y acreción de los cristales de hielo. Así, en función del perfil de temperatura que describa durante la caída y de su método de formación se dará un tipo u otro de precipitación, entre los que se puede distinguir la llovizna, la llovizna engelante, la lluvia engelante, nieve, cinarra, cristales de hielo, hielo granulado y granizo. Todos estos, a su vez, pueden ser clasificados en torno a chubascos y precipitaciones uniformes. Como característica común a todos ellos, la mera presencia de precipitación ya reducirá el techo de nubes y la visibilidad. No obstante, el tamaño de las gotas y su concentración determinarán la gravedad de su afectación sobre estos factores, de manera que fuertes chubascos pueden reducir la visibilidad a valores inferiores a los 100 m, mientras que una lluvia fuerte puede limitarla de 50 a 500 m. Siguiendo con esta línea, la llovizna moderada puede limitarla hasta los 3 km, pero, contrariamente a lo que se pueda pensar, una llovizna densa puede limitar el campo de visión por debajo del medio kilómetro. Esto se debe a que, durante la llovizna, a aparte de las gotas precipitantes, quedan



suspendidas en el aire otras de un tamaño mínimo que producen el efecto de una neblina, perjudicando aún más la visibilidad.

➤ Ventisca. Este fenómeno, similar al de la tormenta de arena, se produce cuando el viento en niveles bajos levanta la nieve sobre la superficie. Tal y como ocurre con las tormentas de arena, el viento fuerte y la atmósfera inestable, produce la ascensión de la nieve, pudiendo alcanzar alturas considerables que afectan a la visibilidad durante la operación de las aeronaves. (Ignacio y Crespo del Arco, 2021; Jiménez Rodríguez, Capa Benito y Portela Lozano, 2004)

Así mismo, en el marco de la importancia que tienen las maniobras próximas a la superficie, como son el despegue, aterrizaje y rodaje, cabe destacar ciertos fenómenos que se dan en el transcurso de estas, agravados por situaciones de reducción de visibilidad. Aunque no son fenómenos puramente meteorológicos, las condiciones atmosféricas adversas si aumentan la probabilidad de que sucedan, suponiendo un reto añadido para los pilotos. Se trata de las ilusiones ópticas, derivadas de las características de la pista, del terreno circundante y de ciertos meteoros. A continuación, se detallan algunas de las principales causas de ilusiones ocurridas próximas a la superficie y su afectación sobre la tripulación.

➤ Pendiente en la pista de aterrizaje. Durante las maniobras de aproximación, la inclinación de la pista de aterrizaje puede afectar a la percepción del suelo por parte de los pilotos. Si en la senda de aproximación se topa con una pista con inclinación ascendente, el piloto tenderá a pensar que su altura es superior, procediendo a descender y pudiendo poner en peligro la integridad de la aeronave si el nivel de vuelo es muy inferior al establecido por procedimiento.

➤ Anchura de la pista de aterrizaje. Una pista especialmente angosta o ancha puede crear el efecto sobre el piloto de que la altura no es correcta, pudiendo conducirlo a perjudicar la seguridad de la aeronave por exceso de altura o por aproximarse con una altitud insuficiente.

➤ Terreno circundante. Las luces de las ciudades colindantes a la pista o la falta de contrastes debidos a nieblas, calimas, humos... pueden crear la sensación sobre los pilotos de creer estar a mayor altura o pudiendo llegar a desorientarle al no encontrar la pista. Lo contrario sucede en caso de una pista aislada de población, donde no hay luces en zonas próximas y las condiciones meteorológicas permiten ver la pista muy iluminada. Ante ello, el piloto puede tener la sensación de estar más próximo de lo normal, ascendiendo y realizando un aterrizaje largo.

➤ Lluvia. La acumulación de agua sobre el parabrisas debido a la precipitación puede conducir a una percepción errónea de la altura sobre el suelo y la pista, ya que con lluvia la percepción sobre la altura es que se vuela más alto de la altura a la que realmente se está. Además, el efecto del agua sobre las luces, al intensificar su brillo o difuminarlo, puede dar lugar a considerar que se está más próximo o más lejos del foco. (González López, 2006)

Así pues, la gran variedad de fenómenos meteorológicos que afectan a la visibilidad, pone de manifiesto la peligrosidad de que se de este hecho en vuelo, pues puede llegar a ser causa factible de incidentes y accidentes, y es reflejado como tal por el Eurocontrol, en algunos de sus informes. De hecho, las conclusiones de numerosos estudios³¹ señalan a este variable meteorológica como la segunda que más influye en accidentes aeronáuticos, con gran diferencia con respecto a los demás, y la que más peso tiene en “las fases de vuelo fuera de la ruta (aproximación, despegue, aterrizaje), [...] en los incidentes o accidentes, así como en los problemas de la gestión del tráfico, como retrasos o desvíos, por ejemplo.” (Pelacho Aja, 2018)

A tal efecto, aunque la problemática derivada de la reducción de visibilidad suele asociarse a las fases de aterrizaje, despegue y vuelo de crucero, no se limita únicamente a ellos. Esto se debe a que, a pesar de la posibilidad de hacer la transición a vuelo instrumental bajo reglas IFR, lo cual permite operar con condiciones de visibilidad reducida (dependiendo el valor de la visibilidad horizontal de las distintas maniobras que se ejecuten y del aeródromo en el que se

³¹ Cfr. National Transportation Safety Board: <https://www.nts.gov>



LUIS MARÍA MESTRE BULEO

opere, el cual establece las normas operativas para la operación en sus instalaciones)(en estas condiciones la aeronave es guiada por las instrucciones del servicio de control de tránsito aéreo de los distintos aeródromos, por los pilotos en base a las cartas de vuelo instrumental, radio ayudas en tierra y sistemas de posición por satélite),su utilidad es escasa en las fases de corta final y aterrizaje. Por ello, la afectación sobre este factor incide sobremanera en esta parte del vuelo, ya que se trata del tramo en el que la aeronave, a alta velocidad, está a escasos pies de la pista antes de tocar con el tren de aterrizaje, lo que la hace especialmente crítica.

Sin embargo, resta una fase en la que la aeronave está en movimiento y, también, especialmente expuesta. Se trata de la fase de rodaje, en la que los pilotos deben tener muy claro la dirección de pista con la que se debe despegar, las calles de rodaje por las que debe entrar o abandonar la pista en servicio y tener una buena conciencia situacional de los vuelos que hay en la zona y las aeronaves que pretenden aterrizar y despegar. Todo ello se hace especialmente difícil cuando la visibilidad es afectada por la presencia de nieblas, brumas, calimas, tormentas de arena... y demás factores que puedan afectar la visibilidad. De hecho, tal y como se afirma en *El Impacto de la Meteorología en la Aeronáutica*:

Algunos accidentes han tenido lugar precisamente cuando alguna aeronave estaba rodando en pista y por mala visibilidad no se ha percatado de la presencia de otra aeronave o ha tomado una pista de rodaje que no era la apropiada, interfiriendo en las maniobras de otro avión. (Pelacho Aja, 2018)

4.2.5. Tormentas

Las tormentas, como ya se ha tratado en capítulos anteriores, son un fenómeno a tener en consideración a la hora de estudiar la meteorología en un punto o en una ruta, ya que sus posibles efectos sobre el vuelo, debido a la gran cantidad de fenómenos que aglutinan, pueden ser determinantes. Las tormentas están constituidas por nubes cumuliformes acompañadas de descargas eléctricas y otros fenómenos relacionados con la precipitación, engelamiento, cizalladura, tornados, microrreventones... de distinta severidad. Todas estas variables meteorológicas introducidas por las tormentas hacen de este el fenómeno meteorológico que más afecta al tráfico aéreo. (Pelacho Aja, 2018, p.49)

Este fenómeno, a pesar de poder tener diversas causas, presenta, generalmente, 3 elementos clave que deben darse para que tengan lugar. Estos son la existencia de aire húmedo, es decir, será necesario, un cierto contenido de vapor de agua en las capas bajas de la atmósfera; un cierto nivel de inestabilidad de la atmósfera, el cual permita el ascenso del aire, y por último, un "mecanismo de disparo", es decir, "algún fenómeno que propicie el ascenso de burbujas de aire próximas al suelo."(Oficina Meteorológica de Base LEBT, 2017) Este último factor, es decir, el motivo de su origen, será el que determine el tipo de tormenta.

Así, se clasifican según sean debidas a masas de aire o tormentas frontales. El primer tipo de tormenta incluye las de origen térmico, es decir, debidas a movimientos convectivos de aire; de origen orográfico, surgidas ante el ascenso forzado del aire por el terreno; y surgidas de "mezcla turbulenta, cuando el aire en contacto con una superficie de agua más cálida se inestabiliza."(González López, 2006) El segundo tipo incluirá aquellas producidas en los frentes.

El ciclo de vida de las tormentas se divide en tres estados, estado de crecimiento, madurez y disipación. El primero de ellos se caracteriza por las fuertes corrientes ascendentes desde el suelo que provocan la condensación del aire húmedo, formando un cúmulo. Por ello, en este periodo, ya se detectan turbulencias en el interior de la nube. Las gotas de la nube aumentan su tamaño, pero la nube aún no es detectada por el radar, ya que solo empieza a ser detectable una vez estas adquieren el tamaño suficiente para la precipitación. Finalmente, esta fase termina cuando empieza la precipitación.

La segunda fase de formación de la tormenta y más activa, la de madurez, se inicia con las



LUIS MARÍA MESTRE BULEO

precipitaciones que dan término a la anterior etapa. en ella la nube alcanza su máxima altura, llegando incluso a alturas de la tropopausa, donde el cumulonimbus desarrolla su parte superior en forma de yunque, claramente identificable. Las turbulencias debidas a movimientos convectivos ascendentes adquieren su mayor intensidad y la precipitación propia de esta fase (intensa y localizada) induce descendencias, lo cual da lugar a fuerte cizalladura y turbulencias en la nube y área circundante (ya que ambas descendencias de sentido contrario conviven en el interior del cúmulo). Además, estas intensas descendencias de aire frío dan lugar a frentes de racha cuando alcanzan el suelo. Estas producen el desplazamiento de masas de aire cálido ciertos kilómetros, y suponen un peligro para la aviación, sobre todo en aquellas maniobras en las que la aeronave es más vulnerable al estar próxima la suelo. Esta supone la principal razón por la que, con tormenta, se suspenden o aplazan los vuelos en aeródromos afectados. Así mismo, en esta fase ocurren los primeros rayos (especialmente peligrosos cuando se está produciendo el repostaje de combustible).

Por último, tiene lugar la etapa de disipación. Esta fase final de la nube comienza cuando ya únicamente persisten las rachas de aire descendente, ya de mucha menor intensidad, ligadas a la precipitación, la cual pasa a ser muy extendida y ligera. Aun cuando la tormenta se ha disipado, el yunque puede permanecer más tiempo.

Algunos de los efectos más relevantes que se pueden dar cuando existen tormentas son los microrreventones y los tornados. Los microrreventones son las rachas descendentes de aire frío y denso que provocan los frentes de racha comentados anteriormente. Estos se extienden en el tiempo y espacialmente en cortos periodos, pero su importancia reside en la intensidad que pueden llegar a alcanzar, llegando en ciertos casos a alcanzar vientos con “velocidades de hasta 280 km/h”.(González López, 2006, p.16.14) De tal manera, cuando la micro ráfaga descendente alcanza el suelo, se forma el frente de racha, generándose en la parte delantera del flujo saliente torbellinos. Otro fenómeno asociado a la tormenta es el tornado, este constituye uno de los fenómenos más violentos que se dan en la atmósfera y es el meteoro que da lugar a los mayores vientos que se registran en superficie. Se trata de “un vórtice[...] girando constantemente en forma de torbellino que se descuelga de la base de un Cumulonimbos, extendiéndose hasta el suelo.”(Capel Molina, 2002)

En lo que respecta a la incidencia sobre la ejecución de la actividad aérea cabe señalar la importancia de un pronóstico correcto de este fenómeno, debido a las graves consecuencias que puede tener y las diferentes causas que lo pueden desencadenar. Los peligros asociados a este meteoro varían en función del nivel de vuelo por el que se esté operando en función de la célula, ya que los efectos asociados son muy cambiantes.

El vuelo por debajo del cúmulo de la tormenta resulta especialmente peligroso tanto durante el vuelo crucero como durante las operaciones de despegue y aproximación, ya que las aeronaves se exponen a la severa cizalladura, especialmente crítica cuando se producen microrreventones y, en consecuencia, frentes de racha. Además, la turbulencia mecánica que esta puede desencadenar, y las intensas precipitaciones (con la consecuente disminución de visibilidad) son factores a considerar a la hora de analizar la matriz de riesgos y valorar el vuelo en esta zona. Estos efectos sobre las aeronaves son los que se pretenden evitar cuando, al ser afectado por una tormenta, el vuelo sobre los aeródromos es aplazado o cancelado, sobre todo si los planes de vuelo prevén aterrizajes y despegues en estos.

Dentro de la tormenta, los efectos sobre la aeronave más relevantes de asocian a la cizalladura producida por las corrientes ascendentes y descendentes(con la correspondiente pérdida o ganancia de altura y coeficiente de sustentación), la reducción de visibilidad dentro de la nube, la posible afectación por el alcance de rayos (aunque en esta caso las aeronaves suelen actuar como jaulas de Faraday, si pueden afectar a ciertos equipos eléctricos) y el engelamiento a niveles de vuelo relativamente bajos, debido a las corrientes descendentes de aire frío y la creación de bolsas de aire frío en superficie, que conllevan un descenso de la línea isocero.



Todos los problemas derivados de este factor meteorológico hacen de él el meteoro que más incidencia tiene en el desarrollo correcto de la actividad aeronáutica, pues tal y como reflejan los datos recogidos en ciertos análisis estadísticos, no solo afectan a los tramos en ruta al obligar a las aeronaves a modificarla, si no que “en las cercanías del aeropuerto, [...] esta situación interfiere mucho en la entrada y/o salida de los aviones, generando problemas de seguridad y de desvío de aeronaves hacia otros aeropuertos”(Pelacho Aja, 2018)³². Ante tal significativa influencia se deben tomar tanto medidas preventivas como correctivas. En un primer momento, se debe proceder al estudio correcto de la meteorología durante el planeamiento, a través de herramientas comentadas previamente (como son los mapas de tiempo significativo, el estudio de METAR's, TAF's, AIRMET, SIGMET...) Además, será tarea de los servicios de control de vuelo el proceder a la cancelación de los planes de vuelo relativos a un aeródromo y determinar si debe permanecer cerrado por seguridad de vuelo al ser afectado por este meteoro. También debe realizarse, de manera cruzada con el estudio de la meteorología, un exhaustivo análisis de la ruta de navegación y/o zona a realizar las distintas operaciones. Este punto adquiere especial importancia cuando se pretende realizar vuelos en zonas de montaña o, siendo en terreno sin reconocimiento previo, se pretenden realizar tomas fuera de campo en zonas confinadas o pináculos (misiones altamente especializadas para el vuelo de helicópteros). En cuanto a las medidas correctivas a aplicar al identificar una tormenta en vuelo, deberá evitarse volar dentro de la nube, pretendiendo rodearla o sobrevolarla (en caso de que sea posible, normalmente cuando la tormenta aún no ha alcanzado su estado de madurez), sin tampoco entrar en la zona circundante donde las turbulencias son intensas. En caso de tener que volar en ellas, deberá ajustarse la velocidad de vuelo a aquella que requiera menor potencia. Como es evidente, se deberá evitar volar por debajo de la tormenta y del yunque del cumulonimbo. No obstante, en caso de imposibilidad de desarrollar estas acciones y la aeronave penetre en la tormenta, se debe ejecutar una transición a vuelo IFR, dado que, previsiblemente, las condiciones de vuelo serán inferiores a VMC (IMC). Así mismo, dada la dificultad que supondrá mantener la altitud, debido a las fuertes corrientes de viento y cizalladura, deberá pretenderse mantener la actitud constante, sin introducir bruscas variaciones que introduzcan esfuerzos sobre el fuselaje de la aeronave e intentando mantener constantemente un remanente de potencia que permita actuar a los pilotos en caso de emergencia.

4.3. PRODUCTOS DE USO AERONÁUTICO

Como ya se ha comentado, la acelerada evolución de la aviación, tanto militar como civil, ha llevado de la mano el desarrollo de la ciencia de la meteorología. Esto se debe a que, como es sabido, esta participa directamente de la seguridad de vuelo, al ser capaz de prever cuáles serán las condiciones ambientales que envolverán los distintos vuelos o, si procede, determinar que no es seguro su ejecución debido a los peligros que estas entrañan. Por esta misma razón, una vez controladores y tripulaciones están familiarizados con los procesos físicos que condicionan la actividad aeronáutica y son conscientes de los peligros que llevan asociados, se debe trabajar y dar a conocer los diferentes productos aeronáuticos. La importancia de estos reside en que ofrecen la información meteorológica aeronáutica pertinente, por lo que saber interpretar sus codificaciones será vital para tripulaciones y servicios de control de tránsito aéreo. Así pues, dada la gran afectación de los fenómenos meteorológicos sobre la actividad aeronáutica y con ello, la implicación de los productos meteorológicos de uso aeronáutico en la seguridad de vuelo, cabe destacar la importancia del correcto estudio de estos, de manera cruzada con la ruta, que podrá proveer a los usuarios del espacio aéreo de la información

³² Cfr. Informe técnico IN-026/2015. Incidente ocurrido a la aeronave Boeing B-757-200, matrícula EC-ISY, operada por la compañía Privilege Style, el 4 de septiembre de 2015 en la aproximación al aeropuerto de Ibiza (Illes Balears- España).
https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/ciaiac/informes/2015_026_in.pdf



imprescindible acerca de las condiciones ambientales que incidirán sobre las aeronaves a la hora de ejecutar los planes de vuelo y misiones asignadas.

De esta manera, para el usuario del espacio aéreo, los productos meteorológicos de mayor relevancia para su análisis son los informes de observación en superficie, como son los METAR y SPECI; los informes de predicción de aeródromo, TAF (de entre los cuales será importante estudiar los de los aeródromos de partida, destino y alternativos en la ruta); mapas de tiempo y viento significativo para los niveles de vuelo en los que se prevé trabajar y los avisos de aeródromos y ruta de fenomenología susceptible de afectar al vuelo, dentro de los FIR³³ de trabajo, recogidos en los SIGMET. EN caso de realizar vuelos a baja cota, será importante también analizar los pronósticos de área para niveles inferiores a FL150, es decir, los GAMET y AIRMET. Además, los NOTAM³⁴ son susceptibles de recoger también información meteorológica de una zona o ruta en concreto, cuyo empleo está denegado o limitado, por lo que también deberán ser analizados y estudiados con anterioridad a los vuelos.

Los METAR Y SPECI son las publicaciones resultado de las observaciones meteorológicas en superficie, emitidos por las propias oficinas meteorológicas de los distintos aeródromos (OMA u OMD). En concreto, los METAR son aquellos informes rutinarios fruto de las observaciones que la oficina meteorológica del aeródromo en cuestión realiza. Estos se ejecutan durante el periodo que las instalaciones se encuentran operativas, lo cual puede abarcar, en ciertos casos, las 24 horas. Su publicación se ejecuta cada media hora o cada hora, según se establezca, y en caso de suceder cualquier fenómeno relevante que modifique alguno de los elementos del METAR dentro de estos intervalos se realizará la publicación de un SPECI. El contenido y codificación de este es igual que el del METAR. Sendas publicaciones recogen en distintos campos de información el grupo de identificación de estación meteorológica o aeródromo, fecha y hora de publicación, datos de viento en superficie (dirección y velocidad, se incluye además los datos de posibles ráfagas si es necesario), visibilidad horizontal predominante (cuando haya gran diferencia entre esta y la visibilidad mínima en alguna dirección se indica también), datos de alcance visual en pista (RVR) si procede, notificación de fenómenos de tiempo presente, nubosidad y altura de nubes (puede incluir datos de visibilidad vertical y presencia de tipos de nubes significativos, si es menester)[los campos de visibilidad horizontal, fenómenos de tiempo presente, nubosidad y altura de nubes pueden ser sustituidos por CAVOK³⁵ si se da el caso], temperatura y punto de rocío, presión en forma de QNH, información suplementaria que recoge normalmente información de fenómenos observados en hora anterior o desde última observación pero no durante esta, cizalladura de viento en capa inferior a 500 m. y notificación de tendencia.

Por su parte, los TAF, aunque similares en cuanto a codificación a los METAR y SPECI, tienen ciertos elementos diferentes, así como una finalidad distinta, además de ser emitidos por las OMPA, en lugar de las de los propios aeródromos. Estos son descripciones completas de las

³³ El Espacio Aéreo Español se divide verticalmente en dos zonas: 1. Espacio aéreo inferior (FIR): que se extiende desde el suelo o mar, hasta FL245. 2. Espacio aéreo superior (UIR): que se extiende desde el nivel de vuelo 245, hacia arriba, quedando limitados los servicios de control en el nivel de vuelo 460, en aquellas áreas en que se proporciona.

Existe también una división del espacio aéreo español en el plano horizontal, distinguiendo entre FIR Madrid, FIR Barcelona, FIR Canarias, en el espacio aéreo inferior, y UIR Madrid, UIR Barcelona, UIR Canarias, en el espacio aéreo superior. (Ministerio de Fomento) (OACI, 1994)

³⁴ Los NOTAM, es decir, los avisos a aviadores, tienen la misión de informar de novedades de cualquier índole en el espacio aéreo o en tierra que afecten al desarrollo de la actividad aeronáutica y a la seguridad de las operaciones. Estos complementan a la información ofrecida por las AIP, pero al tratarse de información urgente e impredecible no se incluye en ellos (López Pérez, 2020)

³⁵ El término CAVOK hace referencia a las siglas "Ceiling and Visibility OK" y sirve para indicar condiciones meteorológicas favorables en los informes aeronáuticos. Se cifra de este modo cuando se cumplen simultáneamente las siguientes condiciones: visibilidad de 10 km o más y no se verifican los criterios para la inclusión del grupo de visibilidad mínima; ninguna nube por debajo de 1500 metros (5000 pies) o por debajo de la mayor altitud mínima del sector (de estas dos la que sea mayor) y ausencia de cumulonimbos (CB) y de torrecúmulos (TCU); y ningún fenómeno de tiempo significativo." (AEMET, 2018)



LUIS MARÍA MESTRE BULEO

condiciones meteorológicas predominantes esperadas en un aeródromo durante el tiempo en el que el pronóstico es válido. Estos incluyen, a su vez, los posibles cambios en la meteorología que puedan afectar a la operación de las aeronaves en el aeródromo en cuestión. En cuanto a su periodo de validez, puede tratarse de un TAF corto y abarcar 9 horas o un TAF largo y ser válido durante 24 horas, publicados cada 3 y 6 horas, respectivamente. En caso de que sea necesaria la publicación de un TAF adicional debido a que la evolución de los fenómenos meteorológicos será diferente a la prevista, se elabora un TAF AMD (enmendado), cuya validez es menor, ya que durará hasta la hora de publicación del siguiente pronóstico. Estos, en su cuerpo, incluyen el indicador del lugar OACI del aeródromo, fecha y hora de publicación, día y hora de comienzo y fin de validez del pronóstico, viento pronosticado en superficie, visibilidad predominante pronosticada (y mínima si es relevante), tiempo significativo pronosticado, nubosidad y altura de nubes pronosticada, visibilidad vertical pronosticada (los campos de visibilidad horizontal, fenómenos de tiempo presente, nubosidad y altura de nubes pueden ser sustituidos por CAVOK si así se pronostica), datos de nubes significativas (en caso de que existan nubes por debajo de la altura de referencia del aeródromo en cuestión o Cb o Tcu. Se emplea en caso de que no exista CAVOK), temperatura máxima y mínima pronosticada y, por último, indicador de cambios significativos en la predicción para un periodo de tiempo señalado (este campo incluirá la probabilidad de ocurrencia de esta variación de la fenomenología) y se utilizará con la forma BECMG o TEMPO. La primera nomenclatura indicará que el cambio, regular o irregular, de fenomenología recogido a continuación puede suceder en cualquier momento no especificado comprendido en el periodo de tiempo indicado, aunque el cambio indicado no excederá, generalmente, las dos horas y nunca las cuatro; mientras que el grupo TEMPO hace referencia a fluctuaciones temporales en las condiciones meteorológicas pronosticadas con posibilidad de darse en cualquier momento del periodo indicado. (AEMET, 2019)

Otro tipo de documento importante a revisar son los distintos avisos emitidos por las Oficinas de Vigilancia Meteorológica, los SIGMET. En estos se “recoge la existencia real o prevista de determinados fenómenos meteorológicos en ruta y de otros fenómenos en la atmósfera, que pueden afectar a la seguridad operacional de las aeronaves” (AEMET, 2019), dentro de un determinado FIR o UIR. Estos mensajes tienen una validez de entre 4 y 6 horas, sin embargo, pueden cancelarse cuando los fenómenos se disipan o no se espera que ocurran en la zona. Estos incluyen en la primera línea el indicador del lugar de la dependencia ATS al que se destina el, la identificación y número de serie del mensaje, su periodo de validez y el código OACI de la Oficina de Vigilancia Meteorológica que publica el mensaje (ubicadas en LEVA -Valencia- o GCC -Las Palmas de Gran Canaria-). En la segunda y sucesivas líneas se incluye el indicativo y FIR respecto al que se emite el mensaje, información de los fenómenos meteorológicos y su descripción, indican si se trata de fenomenología observada o pronosticada, lugares y niveles de vuelo o altitud, movimiento, dirección y velocidad (si procede) y cambios de intensidad reales o pronosticados.

De manera similar, y de aplicación para las operaciones aéreas ejecutadas a baja cota, se emplean los pronósticos de área GAMET y AIRMET. Los GAMET son, tal y como se explica en la Guía de Información Meteorológica de AEMET:

Pronósticos de área para los vuelos por debajo del FL150 en una Región de Información de Vuelo (FIR) o en una subzona de la misma. Se expide cada seis horas y tiene un periodo de validez de seis horas. En caso de que los fenómenos meteorológicos peligrosos se hayan incluido en un pronóstico GAMET y un fenómeno pronosticado no ocurra o deje de figurar en el pronóstico, se expide un GAMET AMD enmendando el elemento meteorológico en cuestión, mediante el término NSW. (2019)

Estos incluyen en sus líneas el indicador de la dependencia ATS para el FIR al que va dirigido (de igual manera que en el mensaje SIGMET), la identificación del mensaje, el periodo de validez, el indicador de la Oficina de Vigilancia Meteorológica del aeródromo que emite el



LUIS MARÍA MESTRE BULEO

mensaje (LEVA o GCCC), el indicador y nombre de la FIR o subzona respecto al que se emite el mensaje, el límite vertical de la zona de responsabilidad e información sobre los fenómenos meteorológicos en ruta y cierta información de utilidad para la planificación y realización de los vuelos a baja cota.

Por su parte, los AIRMET recogen la “información acerca de la presencia real o pronosticada de determinados fenómenos meteorológicos en ruta que puedan afectar a la seguridad de los vuelos de baja altura (por debajo de FL150), y que no hayan sido incluidos en el GAMET.”(AEMET, 2019) Tienen igual estructura que los SIGMET y son publicados por el mismo organismo.

A esta documentación básica a revisar por tripulaciones, pilotos y agentes del servicio de control de tránsito aéreo se suman los mapas de viento y tiempo significativos pertinentes. Estos son un recurso fundamental para las tripulaciones a la hora de estudiar la meteorología, ya que permiten a los pilotos y demás personal, generar un mapa mental de la situación atmosférica reinante para una franja horaria determinada. Los mapas de viento permiten determinar *grosso modo* como va a ser el consumo de combustible y la posible presencia de turbulencia a una altura dada en un periodo de tiempo. Estos son elaborados para distintos niveles de vuelo y reflejan la intensidad y dirección del viento líneas y banderolas, respectivamente.

En el caso de los mapas de tiempo significativo, se incluyen, en base a un mapa de la zona donde se pretende ejecutar el vuelo, información de la altitud de la isocero, los centros de los sistemas de altas y bajas presiones, sistemas frontales (indicando el tipo de frente y dirección y sentido de avance), tiempo presente y zonas de peligro por fenomenología adversa, cobertura nubosa que define el techo de nubes (BKN y OVC, junto con lo que se indica su base y techo), intensidad del viento... Los responsables de su elaboración son las OVM (LEVA o GCCC) y se publican para las 00, 06, 12 y 18Z. Su validez es de 6 horas y se publican para distintos niveles de vuelo, diferenciando entre mapas de baja, media y alta cota. De igual manera se trabaja con los mapas de viento significativo.



5. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones obtenidas a lo largo del estudio al tratar sobre la relevancia de los fenómenos meteorológicos y su incidencia sobre los principales factores meteorológicos, las prestaciones de las aeronaves y el desarrollo de la actividad aérea son:

- Los avances tecnológicos en el desarrollo de aeronaves hacen que cada vez cuenten con un mayor número y calidad de sistemas de estabilidad y ayudas a la navegación, lo cual ha permitido que la meteorología como causa única de accidentes e incidentes haya decrecido significativamente desde los inicios de la aviación a principios del siglo pasado. No obstante, gran número de incidentes graves y accidentes reportados y analizados en España por la CIAIAC y CITAAM, encuentran la afectación de los meteoros adversos como causa añadida de estos, por lo que su relevancia sigue siendo notable.

- Existe una gran variedad de meteoros que pueden afectar e incidir sobre las condiciones de ejecución de la actividad aérea. No obstante, en relación a las variables meteorológicas que mayor incidencia tienen en el desarrollo de los vuelos y operación de los aeródromos destacan, según distintos documentos publicados por la autoridad europea en este sector, EUROCONTROL, la turbulencia severa, debido a la gran cantidad de fenomenología capaz de desarrollar este factor meteorológico; la afectación sobre la visibilidad, tanto en vuelo crucero como en las fases de despegue y aproximación y en la fase de rodaje, debido a nieblas y precipitaciones, en la mayor parte de los casos; el engelamiento y los daños producidos sobre el fuselaje por el granizo y la formación de hielo debido al vuelo en altas cotas; y, por último, el viento fuerte y la cizalladura, íntimamente relacionada con la turbulencia.³⁶

Además, la intensidad de los fenómenos, la posible concurrencia con otro tipo de fenomenología, las condiciones de la aeronave que opera y la fase de vuelo de vuelo en la que se encuentra son también factor clave a la hora de determinar cómo estas van a ser afectadas³⁷.

- La revisión a conciencia previa al vuelo (briefing prevuelo³⁸) de los productos meteorológicos aeronáuticos publicados (en la que se recojan los fenómenos de tiempo presente más significativos) será vital para poder ejecutar las misiones asignadas y planes de vuelo correspondientes con la suficiente Seguridad de Vuelo que, además de permitir un vuelo seguro, haga posible el mantenimiento de la Seguridad táctica, para las aeronaves militares. Para poder acometer este importante paso previo al vuelo, deben integrarse las funciones de los servicios meteorológicos destinados en las distintas Oficinas Meteorológicas de Aeródromo y de Vigilancia Meteorológica, de controladores aéreos y secciones de planificación de vuelos (planas y órganos adjuntos a la jefatura de la autoridad encargada de la operación) y de tripulaciones.

- Las tripulaciones deben ser capaces de realizar una preparación adecuada de los vuelos, en función de la información a la que tienen acceso y adaptar la maniobra y tipo de vuelo a las condiciones en las que se va a ejecutar su vuelo y según los factores que sean afectados, siendo conscientes de que no existe un procedimiento estándar para cada uno de los fenómenos que afecten. Por ello, un profundo conocimiento de las condiciones meteorológicas de tiempo

³⁶ Cfr. Pelacho Aja, M. Á. (2018) 'El impacto de la meteorología en la aeronáutica'

³⁷ "Desde 1967 un total de 1809 accidentes aéreos, es decir un 67,3% de los analizados, han ocurrido durante estas fases, concretamente el 6% en el descenso, el 8,2% en el despegue, el 8,4% entre el ascenso inicial y el final, el 18,2% entre la aproximación inicial y la final, y el 26,5% en el aterrizaje, siendo, por lo tanto, esta última fase, la más frecuente a padecer accidentes aéreos." (Lozano, 2013)

³⁸ Exposición verbal previa en la que se detalla la información relevante para el vuelo en cuestión.



LUIS MARÍA MESTRE BULEO

presente, el saber identificarlas en vuelo y leyendo los productos meteorológicos, la manera en la que se desarrollan y como se debe operar en ellas, junto con conocimientos de las limitaciones, prestaciones, procedimientos estandarizados normales, especiales y de emergencia de las aeronaves con la que operan es siempre necesario para pilotos. Por su parte, los controladores deberán conocer las posibilidades de las aeronaves que trabajan regularmente en su aeródromo, las limitaciones de uso de este y demás normas operativas establecidas para un aeródromo o aeropuerto.

Nuevas líneas de trabajo y desarrollo

Actualmente, la obtención de datos de numerosas variables meteorológicas en zonas alejadas de aeródromos, como pueden ser océanos, selvas sudamericanas, regiones de montaña... se realiza a través de sensores, procesadores de datos y sistemas de comunicación instalados en los aviones comerciales que recopilan, procesan y transmiten datos meteorológicos a estaciones terrestres a través de enlaces por satélite o radio, a fin de complementar la información obtenida por los satélites. Una vez son recepcionados los datos se transmiten a los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales, donde se procesan, controlan su calidad y se transmiten al Sistema de Información de la OMM. Es el denominado sistema AMDAR.

Este sistema permite obtener variables para caracterizar la meteorología de la zona en un momento determinado y, con ello, mejorar los modelos meteorológicos y de predicción. No obstante, este sistema está limitado al escaso tráfico que pueda existir en zonas muy aisladas y al nivel de vuelo en el que operan. Además, un avión comercial realizando un vuelo transatlántico será capaz de determinar variables meteorológicas en altura, pero nunca de factores meteorológicos en superficie.

Sin embargo, en los últimos años, el desarrollo de los drones, cuya rápida evolución e integración en el modelo de gestión de tráfico aéreo tradicional hace que se requiera de más precisión e inmediatez en la información meteorológica debido a la saturación, aún mayor, del espacio aéreo a nivel mundial.

Por ello, una futura línea de aplicación y desarrollo de estos sistemas no tripulados será apoyar la función que, hasta ahora, realizan aviones y satélites. Para ello, bastaría con dotar estas aeronaves con sensores meteorológicos, que les permita recabar estos datos. Esta tarea no supondría un elevado esfuerzo, ya que la totalidad de las aeronaves cuentan con sensores que permiten captar viento, temperatura, humedad... por lo que solo habría que añadirle algunos sistemas complementarios. Además, estos permitirían no solo obtener información en altura, si no también hacerlo en superficie, al permitir (algunos de ellos) el vuelo en estacionario. Esto sería útil, sobretudo, para completar los modelos de predicción en superficie y ayudar a confirmar la existencia de fenomenología de tiempo presente en las distintas zonas. Además, hay un grupo de usuarios del espacio aéreo que se vería muy beneficiado. Se trata de la aviación militar que emplea aeronaves de ala rotatoria. Estos usuarios del espacio aéreo acostumbran a ejecutar sus operaciones en la mayoría de casos próximos al terreno, por lo que les resulta más útil la información de la meteorología en un punto particular, afectada por condiciones locales que quizá, características meteorológicas generales de una región amplia.

La gran problemática de este sistema sería la autonomía con la que cuentan estos dispositivos. Esto se debe a que el desplazamiento hacia las zonas de estudio donde no existen sensores para la recopilación de datos meteorológicos, la operación durante un tiempo prolongado que permita obtener el perfil meteorológico de la zona y el regreso a la zona de operación requiere de una autonomía elevada, únicamente apta para los drones de nueva generación. Además, que se requeriría una flota de RPAS suficientemente amplia, a disposición de la OMM, para cubrir las necesidades de datos a nivel global.



6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acaso Liria, A. and Casals Marcén, M. (1986) *Vocabulario de términos meteorológicos y ciencias afines*.
- AEMET (2018) *Glosario Aemet*.
- AEMET (2019) 'Guía Met. Información meteorológica aeronáutica'.
- Agencia Estatal de Meteorología (no date) *AEMET*.
- Capel Molina, J. J. (2002) *Nimbus*.
- Domenech Llinares, E. (2019) 'El Jet Stream', *Aviación Global*.
- González López, B. (2006) *Meteorología Aeronáutica*.
- Grupo Europeo para and seguridad en la aviación (EGAST), de la A. E. de S. A. (EASA). (no date) 'Toma de decisiones para pilotos de aviación general'.
- Hierro Álvarez, J. P. (2021) *Apuntes asignatura aviónica AGM*.
- Ignacio, Z. L. and Crespo del Arco, E. (2021) *Meteorología y Climatología*.
- Jiménez Rodríguez, R. M., Capa Benito, Á. and Portela Lozano, A. (2004) *Meteorología y Climatología*.
- Ledesma, M. and Baleriola, G. (2004) *Meteorología aplicada a la Aviación*.
- López Pérez, F. (2020) *Asignatura derecho aeronautico*.
- Lozano, M. (2013) 'WRF simulation of the atmospheric conditions in some aircraft accidents', p. 94.
- Mendes Frades, A. and Alcazar Izquierdo, A. (2018) *Meteorología aeronautica: un marco de estudio esencial para comprender la impacto del tiempo en la aviación*.
- Ministerio de Fomento (no date) *Plan Director del Aeropuerto de la Región de Murcia*.
- Ministerio de Transportes, M. y A. U. (no date) *Participación en organismos internacionales. EASA*.
- Morales, M. (2021) *Asignatura meteorología*.
- OACI (1994) 'Anexo 11 de la OACI 10ª edición'.
- OACI (2016) *Anexo 3: Servicio meteorológico para la navegación aérea internacional (decimonovena edición)*.
- Oficina Meteorológica de Base LEBT (2017) *Tormentas. Formación meteorológica*.
- Palomares Calderón de la Barca, M. (2019) 'Breve historia de la meteorología', *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), pp. 1689–1699.
- Pelacho Aja, M. Á. (2018) 'El impacto de la meteorología en la aeronáutica'.
- Portillo, G. (no date) *la Corriente en chorro, Meteorología en Red*.
- Quintana Trenor, I. (2021) *Entrevista sobre meteorología planteado por el Alférez Mestre Buleo*.
- Real Academia Española (2014) *Diccionario de la lengua española*.
- Tema Astra (2021) 'El Efecto Coriolis', *Areaceincias*.
- Thillet, J.-J. (1998) *La meteorología de montaña*.
- Ticona Patzi, L. A. (2018) *Estudio de las condiciones favorables en la reducción de la visibilidad y la formación de techos de nubes bajas en el aeródromo de alcantarí*.
- Viñas, J. M. (2011) 'Meteorología aplicada. Ondas de montaña', *Avión & piloto*, 22(Meteorología aplicada.Ondas de montaña), p. 4.
- Viñas, J. M. (no date) 'Corrientes en chorro'.



LUIS MARÍA MESTRE BULEO

Wikipedia (2021) *Atmósfera Estándar Internacional*.

[https://es.wikipedia.org/wiki/Atm%C3%B3sfera_Est%C3%A1ndar_Internacional#:~:text=La%20Atm%C3%B3sfera%20Est%C3%A1ndar%20Internacional%20\(en,en%20funci%C3%B3n%20de%20la%20altitud.](https://es.wikipedia.org/wiki/Atm%C3%B3sfera_Est%C3%A1ndar_Internacional#:~:text=La%20Atm%C3%B3sfera%20Est%C3%A1ndar%20Internacional%20(en,en%20funci%C3%B3n%20de%20la%20altitud.) [consultado en 18-08-2021]

ANEXOS

Anexo I. Nubes y efectos asociados

ALTURA DE LAS NUBES	TIPO DE NUBES	TURBULENCIA	PRECIPITACIÓN	OBSERVACIONES	
NUBES ALTAS (C _H) Altitud:>5000 m.	Cirros(Ci) (Formadas por cristales de hielo)	<u>Sin turbulencia</u>	<u>No</u>	<u>No afectan al vuelo, pero dan indicaciones al piloto. Presagian el paso de una perturbación Si avanzan invadiendo el cielo pueden anunciar la entrada de un frente frío, y largas bandas de cirros señalan la presencia de vientos fuertes en altura</u>	
	<u>Cirrocúmulos(Cc)</u>			<u>Presagian la entrada de una perturbación. La estela de estos reactores se considera de este tipo.</u>	
	<u>Cirroestratos(Cs)</u>			<u>Formado por cristales de hielo. Presagina la entrada de una perturbación.</u>	
NUBES MEDIAS (C _M) Altitud:7000-2000 m.	<u>Altocúmulos(Ac)</u>	<u>Castellanus: indican inestabilidad (turbulencia moderada)</u>	<u>Débil ocasional</u>	<u>Presagian la entrada de un frente</u>	<u>Son precursores de inestabilidad y tormentas.</u>
		<u>Lenticulares: presencia de ondas de montaña</u>		<u>Asociado a fenómenos ondulatorios</u>	
	<u>Altoestratos(As)</u>	<u>Turbulencia ligera-moderada cuando son espesos</u>	<u>Precipitación uniforme: débil ocasional</u>	<u>Presagian la entrada de un frente. Espesor de 10000-15000 ft. Pueden dar lugar a engelamiento débil.</u>	
NUBES BAJAS (C _L) Altitud: <2000 m.	<u>Estratos (St)</u>	<u>Turbulencia térmica por debajo</u>	<u>Precipitación uniforme: Llovizna ocasional</u>	<u>Indican estabilidad. Espesor de 1000ft. Su base puede llegar a ser realmente baja, por lo que puede resultar peligroso para maniobras de aterrizaje y depegue e</u>	

				<u>incluso devenir en niebla.</u>
	<u>Estratocúmulos (Sc)</u>		<u>Débil ocasional</u>	<u>Indican cierta inestabilidad. Espesor de 2000ft. Indican buen tiempo.</u>
	<u>Nimboestratos(Ns)</u>	<u>Débil-moderada o fuerte si se encuentran próximos a superficie</u>	<u>Precipitación uniforme: Lluvia continua. Posible lluvia engelante.</u>	<u>Propio de frentes cálidos. Espesor de 17000 ft. Indican mal tiempo. Engelmiento</u>
NUBES DE DESARROLLO VERTICAL (C _D)	<u>Cúmulos (Cu)</u>	<u>Moderada-Fuerte. Evitar.</u>	<u>Chubasco (SH) (lluvia, nieve)</u>	<u>Engelmiento. Su formación puede darse con buen tiempo por fenómenos convectivos. Puede alcanzar gran desarrollo vertical, alcanzando los 10.000 ft, pasando a denominarse Cumulo congestus (TCu). Al volar por sus proximidades, conviene sobrepasarlos a máxima altura o rodearlos. Asociado a tormentas. Fuertes corrientes verticales.</u>
	<u>Cumulonimbos (Cb)</u>	<u>Fuerte. Evitar.</u>	<u>Chubasco (SH) (lluvia, nieve, granizo)</u>	<u>Engelmiento. Espesor de en torno a 30000ft. Es característico el yunque de su parte superior. Fuertes corrientes verticales. Asociado a tormentas. Muy peligrosas en vuelo.</u>

Tabla 1: Nubes y efectos asociados (AEMET,2019; Jiménez Rodríguez, R. M., Capa Benito, Á. y Portela Lozano, A., 2004; Morales, M.,2021; Ledesma, M. y Baleriola, G., 2004; Capel Molina, J. J.,2002; Quintana Trenor, 2021; González López, B.,2006)

Anexo II. Entrevistas a personal destinado en OMA

Las siguientes entrevistas están dirigidas a personal de AEMET destinado en la Base aérea de Morón. Se trata de personal perfectamente formado y experto en la materia que acontece, los principales efectos meteorológicos que afectan a la aviación. Dentro de este amplio espectro de posibilidades que tienen lugar a lo largo y ancho de todo el globo, el alcance de la búsqueda ha sido reducido a aquellos fenómenos atmosféricos que son de especial relevancia para los vuelos de aeronaves que desarrollan la totalidad de sus cometidos a baja y media cota, además, de haber seleccionado las condiciones climáticas que son factibles de ocurrir en España, es decir, dentro de un clima propio de latitudes medias.

Así pues, el objetivo de la entrevista no es sino, indagar más en el conocimiento de estos fenómenos y realizar una tarea de investigación para conocer de primera mano cómo estas condiciones afectan a la aviación y como se manejan las situaciones derivadas del desarrollo de factores peligrosos para el vuelo.

Entrevistado: D. Antonio de Hoyo Lora

-Atendiendo a los ppales. fenómenos que afectan a la aviación de vuelo ejecutados a media y baja cota ¿Cuáles son los que más afectan?

Los principales fenómenos a tener en cuenta en meteorología aeronáutica podrían ser la turbulencia, las tormentas, el englamamiento, la cizalladura del viento y la visibilidad.

- ¿Cuáles son las componentes del viento que más afectan al vuelo a media y baja cota, tras las condiciones locales (topografía-turbulencias)?

En las maniobras de aterrizaje y despegue, la componente cruzada de viento es la más importante ya que puede afectar a la estabilidad de la aeronave. Además, las cizalladuras vertical y horizontal son muy peligrosas y dificultan dichas maniobras.

- ¿Podría describir los tipos de frente (mov. de masas de aire) más peligrosos para el vuelo de helicópteros y de qué manera estos lo afectan?

La variación de la velocidad y dirección del viento, al paso de un frente, afecta al vuelo, especialmente a las operaciones de despegue y aterrizaje. Dicha variación es tanto más brusca cuanto más fuerte es el gradiente de temperatura. Cuando un frente se encuentra en las inmediaciones de un aeródromo, la variación del viento se produce delante del frente cálido que se aproxima al mismo, y detrás del frente frío que se aleja.

En el aire cálido que hay encima de las superficies frontales, el viento es del SW, mientras que en el aire frío que hay debajo de dichas superficies, el viento sopla del NW en el frente frío y del SE en el frente cálido. Si un avión despegue con el viento en cara y sigue una trayectoria rectilínea, ascenderá con dicha componente de viento hasta que atraviesa la superficie frontal, donde el viento gira, de manera que la componente de viento en cara disminuye bruscamente, disminuyendo a su vez la sustentación y velocidad del avión.

Cuando un avión se dispone a efectuar una maniobra de aterrizaje en un aeropuerto al que se aproxima un frente cálido, si en altura tiene una componente de viento en cara (SW), cuando atraviesa la superficie frontal el viento gira a SE. La componente de viento en cara disminuye, por lo que debe realizarse una corrección inmediata para no descender por debajo de la senda de planeo.

-En su opinión, ¿cuáles son los tipos de nube más significativos para el vuelo? ¿y

de precipitación?

La incidencia sobre el vuelo de las nubes es variable, dependiendo del tipo que sean, pues, por ejemplo, los cirros no afectan al vuelo, pero dan indicaciones al piloto de que se aproxima un sistema frontal, o de presencia de vientos fuertes en altura. Los altocúmulos castellanus indican turbulencia moderada y los lenticulares pueden indicar la presencia de ondas de montaña; los nimboestratos son nubes de gran espesor, susceptibles de producir engelamiento y turbulencia moderados, salvo en zonas montañosas donde pueden ser fuertes. Los estratos son nubes peligrosas para las operaciones de aterrizaje y despegue, debido a que la altura de su base puede ser muy baja, reduciendo mucho la visibilidad. Estratocúmulos, por debajo de los cuales, suele haber turbulencia producida por térmicas y por encima, estabilidad. Y los más peligrosos para el vuelo, los cúmulos y cumulonimbus, asociados a engelamiento, turbulencia, granizo y tormentas, por lo que deben evitarse.

En cuanto a la precipitación, afecta a las operaciones aeronáuticas en tanto que reduce significativamente la visibilidad- reducida a unas centenas de metros con chubascos fuertes; inferior a cinco kilómetros con lluvia fuerte; entre cinco y seis kilómetros con lluvia moderada; entre siete y ocho kilómetros con lluvia débil, y a decenas de metros con nieve -, a la cizalladura generada en la caída, el engelamiento, el aumento de distancia necesaria para el frenado, la necesidad de rodar a baja velocidad ya que el suelo es deslizante y los posibles daños sobre la estructura del avión en caso de tratarse de hielo o granizo.

- ¿Podría describir el fenómeno del engelamiento, y las medidas que se adoptan en vuelo y en tierra para evitarlo? ¿y de reducción de visibilidad horizontal y vertical?

El engelamiento es el depósito de hielo sobre una aeronave, que se produce cuando el agua líquida subfundida se congela al impactar con ella. El hielo se adhiere principalmente a los elementos expuestos al viento relativo, y a aquellas partes que sobresalen de la célula del avión pudiendo dar lugar a alteraciones en la propiedades aerodinámicas de la aeronave en vuelo, reducción de la visibilidad, interferencias en las ondas de radio, errores en los instrumentos, aumento de peso de la aeronave, pérdida de potencia y vibraciones que provocan fatiga estructural.

El engelamiento sobre un avión puede producirse dentro de nubes, niebla, dentro de la precipitación (lluvia engelante) o en aire claro, donde se forman escarcha, aunque sus efectos son mucho más leves.

La protección contra el engelamiento puede ser meteorológica o técnica. La protección meteorológica consiste en no volar en aquellas zonas en las cuales haya condiciones favorables para la formación de engelamiento. A nivel técnico existen equipos de deshielo que eliminan el hielo que se ha formado y equipos anti hielo que evitan la formación del mismo. Pueden ser mecánicos, térmicos (como calentadores eléctricos empleados en el tubo de Pitot), y químicos (baños de sustancias anticongelantes)

En cuanto a la reducción de la visibilidad, los principales fenómenos que la provocan son la niebla, la bruma, la calima, el humo, el smog, la arena y polvo, las nubes y la precipitación. Ventisca de nieve

-En su opinión, ¿Cuáles son las condiciones locales más significativas para el vuelo? P.ej: ascendentes en laderas, efecto foëhn...

Los vientos locales pueden ser de carácter térmico como la brisa de mar, de tierra, de montaña o de valle, o de carácter orográfico como los ascensos y descensos debidos a la orografía, el viento Föhn y las canalizaciones de flujo debido al relieve. Estos vientos, que pertenecen a circulaciones de pequeña escala, pueden afectar muy seriamente a las condiciones de vuelo, pero su presencia no es obvia en los análisis de superficie, ya que

pueden quedar enmascarados por circulaciones de mayor escala.

-¿Podría describir la importancia que tienen en su trabajo los productos aeronáuticos? Véase mapa de tiempo significativo, metar, taf, notam, ama...

La actividad principal de mi trabajo como observador aeronáutico es la elaboración y difusión de METAR y SPECI. Difundimos un mensaje METAR cada media hora en el que incluimos toda la información meteorológica del aeródromo de relevancia para la aeronáutica, tales como la velocidad y dirección del viento, nubosidad, visibilidad horizontal, RVR, tiempo presente, temperatura y QNH. Además, en caso de cambio significativo de tiempo, difundimos un SPECI.

Entrevistado: D. Ignacio Quintana Trenor

-Atendiendo a los ppales. fenómenos que afectan a la aviación de vuelo ejecutados a media y baja cota ¿Cuáles son los que más afectan?

Todos los fenómenos adversos (tormentas, vientos fuertes, engelamiento, etc) pueden afectar. Depende, esencialmente de la intensidad del fenómeno y del momento del vuelo en que nos encontremos. Un viento cruzado fuerte y racheado produce una simple deriva y cierta incomodidad al pasaje volando a 3000' AGL; por el contrario durante la maniobra de aterrizaje compromete seriamente el control de la aeronave. La proximidad del suelo en los vuelos a baja cota hace que aquellos fenómenos asociados a la visibilidad como las nieblas y las nubes muy bajas sean especialmente relevantes y además son los más frecuentes en nuestro entorno y en los vuelos de los helicópteros que mayoritariamente son VFR.

- ¿Cuáles son las componentes del viento(p. ej. Cizalladura del viento) que más afectan al vuelo a media y baja cota, tras las condiciones locales(topografía-turbulencias)?

En la respuesta a la pregunta anterior ya mencionamos la incidencia del viento durante el vuelo. Como he dicho, es en la maniobra de aterrizaje, sobre todo, cuando esta incidencia es mayor. El controlador dispone en su consola de datos de dirección, fuerza y rachas de viento en tiempo real. Los pilotos se asegurarán de disponer de estos datos justo antes del aterrizaje para tomar la decisión acertada.

La autonomía del vuelo (y por tanto la máxima carga útil) está condicionada por la dirección y la fuerza del viento a lo largo de la ruta. Esta información se encuentra en los mapas de vientos que suministra AEMET en los que se indican esos dos datos en distintos niveles de vuelo. El conocimiento de estos datos cobra especial importancia en los trayectos largos en IFR, dado que en niveles superiores a FL050 el viento supera fácilmente los 25Kt y tenerlo en cara aumentará el consumo de combustible de forma significativa.

La cizalladura (variación de la dirección y/o la fuerza del viento con la altura) es frecuente en la atmósfera y representa un peligro significativo durante las maniobras de despegue y sobre todo de aterrizaje. Se trata de un fenómeno difícil de pronosticar (y también de observar) y representa un desafío para predictores y observadores. Algunos aeropuertos disponen de perfiladores verticales de viento que son capaces de detectarla y cuantificarla; por otro lado, cuando el aeropuerto tiene un tráfico muy frecuente, las tripulaciones avisan a la torre de la presencia de este fenómeno. En estos dos casos, cuando se detecta el fenómeno, aparece reseñado en el mensaje METAR. Desgraciadamente esas son las únicas formas de observarla y solo aeropuertos grandes como Barajas o el Prat pueden disponer de estos servicios.

Para terminar con el viento, las tormentas en su fase final, producen a menudo una descarga de aire frío sobre el suelo procedente del interior del Cumulonimbus y que da lugar a

rachas de viento fuerte o muy fuerte en superficie con dirección imprevisible. El piloto debe ser consciente (el controlador le avisará de ello) de la posible presencia de la tormenta en el aeródromo durante la maniobra de aterrizaje y estará preparado para responder a esta eventualidad si observa signos viento fuerte en el suelo (movimiento de las copas de los árboles o levantamiento de nubes de polvo).

Me gustaría por último recordar que en la parte TREND del mensaje METAR así como en el TAF se realiza un pronóstico detallado del viento previsto en el aeródromo con sus variaciones de dirección y posibles rachas (viento superior a 10Kt sobre el viento medio). En estos mensajes, que la tripulación debe conocer antes del inicio del vuelo, se indica también la posible presencia de tormentas (y por consiguiente de la posibilidad de rachas de viento fuerte o muy fuerte de dirección imprevisible)

- ¿Podría describir los tipos de frente (mov. de masas de aire) más peligrosos para el vuelo de helicópteros y de qué manera estos lo afectan?

Es importante conocer la posible presencia de un frente en nuestra ruta prevista aunque lo que debe preocuparnos son los fenómenos que lo acompañan así como su intensidad y estos dependen del grado de actividad del frente. No todos los frentes fríos traen tormentas o turbulencia y no todos los frentes cálidos van acompañados de nieblas extensas o lluvia engelante en su parte delantera.

Cuando un frente, sea de la naturaleza que sea, alcance un grado de actividad relevante será representado en el mapa de Tiempo Significativo Previsto de baja cota (SIG-WX) y junto a las clásicas líneas festoneadas aparecerán los símbolos de los fenómenos significativos que lo acompañan con expresión de su intensidad y de su extensión horizontal y vertical. Son estos datos los que deben preocuparnos.

En los frentes fríos los mayores problemas vendrán de las tormentas y precipitaciones fuertes que pueden complicarse cuando están embebidas dentro de la masa nubosa principal y no son visibles en la distancia (es conveniente estar muy atento al radar si la aeronave cuenta con él) En las épocas más frías del año y en zonas montañosas también habrá que prestar atención al nivel de engelamiento.

En el caso del frente cálido, como se ha mencionado antes, habrá que estar muy atento a las pobres condiciones de visibilidad que lo preceden (frecuentemente con nieblas súbitas y espesas) Otro fenómeno muy peligroso que puede acompañar al frente cálido en invierno es la lluvia engelante. A diferencia del engelamiento, en este caso, la velocidad con la que el hielo se adhiere y la forma de los depósitos que produce destruye la capacidad de sustentación de las palas en pocos minutos. Es esencial conocer siempre la altitud del nivel de 0°C (isocero) y estar atentos a la temperatura en el exterior de la aeronave en vuelo.

-En su opinión, ¿cuáles son los tipos de nube más significativos para el vuelo? ¿y de precipitación?

Solo las nubes convectivas son peligrosas por sí mismas y deben ser evitadas a toda costa. Las demás lo son por los efectos que producen, fundamentalmente la reducción de la visibilidad y del techo. Estos efectos son especialmente significativos en vuelo en montaña donde las variaciones de altitud del suelo provocan súbitas reducciones de techo que nos pueden dejar dentro de una niebla en pocos segundos; el conocimiento del terreno y un pronóstico meteorológico específico son esenciales en estos casos.

Como acabo de decir, las nubes más peligrosas para el vuelo en aeronaves pequeñas a baja cota son las nubes convectivas: los grandes Cúmulus (Tcu) y los Cumulonimbus (Cb). En su estadio más avanzado estas nubes dan lugar a tormentas con los fenómenos adversos conocidos que las acompañan. Sin embargo, antes de llegar a ese estadio, las fuertes corrientes verticales que siempre las acompañan, producen en sus proximidades (no hace falta penetrar en ellas) rachas de viento fuerte de dirección imprevisible así como turbulencia

moderada a fuerte. Siempre que las veamos en nuestra ruta se les debe dar un resguardo suficiente para evitar estos fenómenos y en ninguna circunstancia volar en su interior. El uso del radar de a bordo, si se dispone de él, es esencial ante un pronóstico de nubes convectivas en la ruta.

La sola presencia de precipitación, aunque no sea fuerte, da lugar casi siempre, a una reducción de techo y de visibilidad que será tanto mayor cuanto mayor sea la intensidad de la precipitación; la posible presencia de chubascos en la ruta nos avisa de que estas reducciones pueden ser, además intensas y súbitas. La llovizna representa un caso especial puesto que se trata de gotas de muy pequeño tamaño (inferior a 0,5mm) que apenas acumula precipitación pero cuando es de gran extensión, produce reducciones de visibilidad significativas.

- ¿Podría describir el fenómeno del engelamiento, y las medidas que se adoptan en vuelo y en tierra para evitarlo?

El engelamiento es el depósito de hielo sobre las superficies de la aeronave. Este fenómeno se produce gracias a la propiedad que tiene el agua de permanecer en la atmósfera en estado líquido a temperaturas inferiores a la de congelación (0°C). Esta propiedad del agua se llama "subfusión" y al agua que se encuentra en este estado de equilibrio inestable se le denomina "subfundida". El efecto mecánico del impacto de las gotas de agua subfundida con un objeto de tamaño y velocidad suficientes (una aeronave, en nuestro caso) rompe ese equilibrio inestable y la gota pasa de estado líquido a sólido súbitamente quedando adherida al objeto en cuestión. De la descripción del fenómeno se deducen varios hechos muy importantes.

En primer lugar: para que se produzca engelamiento hace falta agua líquida subfundida, es decir tenemos que volar dentro de una nube que se encuentre a temperatura inferior a 0°C. De forma ocasional, sin embargo, se puede formar hielo a temperaturas más altas, por este motivo se toma como temperatura de "alarma" +4°C. A temperaturas muy bajas (inferiores a -12°C) la mayor parte del agua de la nube ya se encuentra en forma de hielo y las gotas de agua líquida son de muy pequeño tamaño, en consecuencia no producirán engelamiento significativo. Volar dentro de nubes espesas como los Nimboestratos o Altocúmulos densos con una temperatura entre -2°C y -8°C garantiza, como mínimo, engelamiento moderado y muy probablemente severo.

Los efectos del engelamiento sobre la aeronave son variados, pero el más importante para el vuelo en helicópteros, es la deformación que sufre el perfil aerodinámico de las palas por el hielo que se adhiere a ellas. Esta deformación disminuye drásticamente la capacidad de sustentación y aumenta la resistencia al avance, hasta el punto de hacer inútil cualquier maniobra para mantener la altura.

Debe evitarse volar en condiciones engelantes. Hoy día la calidad de la predicción meteorológica nos permite delimitar con precisión en el mapa de tiempo significativo previsto de baja cota (SIG-WX) las zonas donde es probable encontrar engelamiento. En estos mapas se indica además su extensión horizontal y vertical. En cualquier caso, cuando ya estemos sufriendo el fenómeno hay que actuar con mucha rapidez activando las medidas anti-hielo si es que la aeronave cuenta con ellas al tiempo que salimos del estrato "frío y húmedo" donde se está formando el hielo (bien sea subiendo o bajando)

Cuando el hielo se ha depositado estando la aeronave parada en tierra (bien sea por escarcha, lluvia engelante o cencellada), no debe intentarse un despegue antes de retirarlo completamente de todas las superficies. En los aeródromos donde esto es más frecuente se cuenta con sistemas de rociado con anticongelante que acelera la descongelación al tiempo que evita que el hielo se forme otra vez.

- ¿y de reducción de visibilidad horizontal y vertical?

La reducción de la visibilidad en la atmósfera está siempre originada por la presencia de partículas líquidas o sólidas suspendidas en el aire. La intensidad de esta reducción

depende fundamentalmente del tamaño y la concentración por unidad de volumen de estas partículas.

Hay que insistir en el peligro que representa este fenómeno en el vuelo en montaña y la facilidad y rapidez con la que nos podemos ver inmersos en la niebla (una niebla no es más que una nube cuya base toca el suelo). Hay que estar muy atentos delante para ver como el terreno se “acerca” rápidamente a la base de la nube, pero nunca hay que perder de vista lo que sucede detrás, por la eventualidad de tener que retroceder al encontrar un collado cerrado, por ejemplo.

Como se ha mencionado para otros fenómenos, un buen análisis de los productos meteorológicos previstos (fundamentalmente en este caso el mapa SIG-WX y el mensaje TAF) nos permite conocer la posibilidad de encontrar zonas con visibilidad reducida en la ruta y evitar volar por ellas. Si se conoce bien el terreno, el simple conocimiento del techo (altitud de la base de la nube) nos da un dato definitivo para saber si la ruta estará tapada por las nieblas-nubes.

Mención aparte merecen las “nieblas o brumas secas” originadas por partículas de polvo o arena. En la península, en pocas ocasiones veremos que reducen la visibilidad de forma significativa. Sin embargo, la proximidad del desierto convierten este fenómeno en muy frecuente en Canarias.

- En su opinión, ¿Cuáles son las condiciones locales más significativas para el vuelo en montaña? P.ej: ascendentes en laderas, efecto foehn...

El vuelo a baja cota en montaña, por la propia naturaleza del relieve del terreno, es en sí mismo peligroso. Esta peligrosidad se ve acentuada por los variados fenómenos meteorológicos que en ellas se dan. El primer y principal factor de peligrosidad tiene que ver con lo rápidas e intensas que son las variaciones de las condiciones meteorológicas en montaña. Como acabo de decir, es muy fácil verse envuelto en una niebla mientras volamos dentro de una vaguada o encontrar turbulencia fuerte al remontar una cresta aislada y esto sucede en solo unos segundos. Asimismo, las tormentas en la montaña se desarrollan con sorprendente rapidez.

Cuando el viento sopla fuerte en una zona de relieve complejo, como puede ser un macizo montañoso o una cordillera, dará lugar frecuentemente a fenómenos peligrosos para el vuelo. Estos fenómenos (turbulencias y corrientes descendentes) son más intensos y frecuentes en la capa más cercana al suelo y, en ocasiones, donde la configuración del relieve es propicia, se presentan incluso con viento moderado.

En cualquier caso, la naturaleza ondulatoria del viento a su paso sobre una cordillera transmite hacia arriba algunos de estos fenómenos y podemos encontrarlos en niveles más altos. Aquí serán obviamente menos peligrosos pero su impacto en las condiciones de vuelo y en la seguridad de la aeronave no deben despreciarse. Esta misma naturaleza ondulatoria del movimiento del viento, da lugar a la aparición de turbulencias y corrientes descendentes a sotavento de la cordillera, fuera de ella, que serán más intensas cuanto más cerca se encuentren las crestas.

Así pues, en montaña es aún más importante conocer de antemano las condiciones meteorológicas previstas. En estos casos, el Briefing previo al vuelo de un meteorólogo conocedor del clima y del relieve de la zona es especialmente valioso. Una vez más la información inicial será siempre el mapa de tiempo significativo previsto para baja cota SIG-WX donde se indican las zonas de posible presencia de ondas de montaña y turbulencias.

-¿Podría describir la importancia que tienen en su trabajo los productos aeronáuticos? Véase mapa de tiempo significativo, metar, taf, notam, ama...

El rápido desarrollo de la aviación como actividad comercial y el impacto decisivo que las condiciones meteorológicas tienen en el vuelo ha obligado a la Ciencia Meteorológica a

desarrollarse con igual rapidez (de este desarrollo se han aprovechado, afortunadamente, muchas otras actividades humanas). Hoy día, los Modelos Numéricos de Predicción Meteorológica son capaces de adelantar de forma extraordinariamente fiable, no solo el valor de las magnitudes meteorológicas básicas en cada punto de la atmósfera como la presión o la temperatura. Proporcionan, además, información sobre parámetros derivados como la visibilidad o el techo y el espesor de las nubes cuyo conocimiento es vital para afrontar un vuelo con seguridad. Como profesional de la Meteorología Aeronáutica son los mapas generados a partir de los Modelos Numéricos de Predicción las herramientas más importantes para realizar mi trabajo.

Para los pilotos y tripulantes son, naturalmente, más útiles otros productos más elaborados, como algunos de los que mencionas en tu pregunta. Ningún piloto debe iniciar un vuelo sin conocer y analizar previamente los METAR y los TAF de los aeropuertos de salida y de destino, así como de los que se encuentren en la ruta (sean o no alternativos en el FPL). Se deben solicitar y analizar asimismo los Avisos de los mismos aeródromos así como los avisos de ruta (AIRMET y SIGMET) de los FIRs atravesados. Ningún planeamiento estaría completo sin consultar los mapas de viento y tiempo significativo previsto. Los primeros son indispensables para determinar con precisión la autonomía real de la aeronave y de forma indirecta, la posible presencia de turbulencia en nuestro nivel de vuelo. El mapa de tiempo significativo para vuelos a baja cota (SIG-WX) es la herramienta esencial para el planeamiento meteorológico del vuelo; recoge y resume la mayor parte de la información mencionada a lo largo de esta conversación y nos anuncia la presencia de todos los fenómenos meteorológicos que pueden incidir en el vuelo. No se debe iniciar ningún vuelo sin conocer y analizar este último mapa.

La principal finalidad de las oficinas meteorológicas que tiene AEMET en bases militares (OMDs) es contribuir a la seguridad de los vuelos que en ellas se realizan. Casi todas ellas cuentan con personal perfectamente entrenado que suministrará esta información en el formato requerido. Forma parte de la instrucción básica de los pilotos el conocimiento de los símbolos, abreviaturas y términos contenidos en esa información; en cualquier caso, el personal de las OMDs de AEMET aclarará cualquier duda referente a su interpretación. En los casos de no poder contar con este servicio, recurriremos al AMA donde AEMET pone a disposición del personal aeronáutico toda la información mencionada.