

Capítulo 8.

Peligros meteorológicos – engelamiento

- 8.1 Altitudes favorables para el engelamiento
- 8.2 Nubes que producen engelamiento
- 8.3 Factores para que se produzca engelamiento
- 8.4 Clasificación del engelamiento
- 8.5 Tipos de hielo en los que se manifiesta el engelamiento
- 8.6 Engelamiento en la aeronave

112

Según un estudio de Moreno y Gil (2003), con datos del periodo 1970 a 1999, el *engelamiento* es el factor meteorológico que más ha producido incidentes y accidentes aéreos a nivel mundial (36 %), y es el único que ha mantenido la regularidad de accidentes a lo largo del tiempo. Para evitarlo, se debe conocer su mecanismo de acción para así minimizar sus efectos al aplicar los procedimientos estipulados en caso de encontrar indicios de su presencia.

Se conoce como *engelamiento* al congelamiento de las gotas de agua de las nubes que impactan sobre la estructura de un avión en vuelo (borde de ataque de los perfiles alares, hélices, antenas, etc.), o que ingresan dentro de alguno de sus componentes que tienen contacto con el aire exterior (tubo Pitot, carburador, etc.). Puede también considerarse como un caso especial la escarcha, la cual se forma cuando el avión está en tierra durante noches frías y con un alto contenido atmosférico de vapor de agua en capas bajas. Se trata de un fenómeno que no sólo afecta seriamente las características aerodinámicas de la aeronave, sino también el funcionamiento de sus componentes.

8.1 Altitudes favorables para el engelamiento

El engelamiento puede ocurrir casi a cualquier altitud (figura 49) que cumpla dos condiciones esenciales: humedad visible (nubes o precipitación) y temperatura igual o inferior a 0 °C. No debe olvidarse que el enfriamiento aerodinámico puede descender la temperatura de las superficies del avión a 0 °C, aun cuando la temperatura del aire esté unos cuantos grados más caliente.

En Colombia, el engelamiento normalmente se produce sobre los 16 000 ft, altitud de la isoterma de 0 °C. Puede alcanzar un grado de moderado a severo en zonas montañosas y, en algunos sectores, podría encontrarse por encima de 12 000 ft. En latitudes medias, el engelamiento se da con mayor frecuencia en altitudes más bajas, donde la mayoría de los episodios ocurren entre 5 000 ft a 13 000 ft.



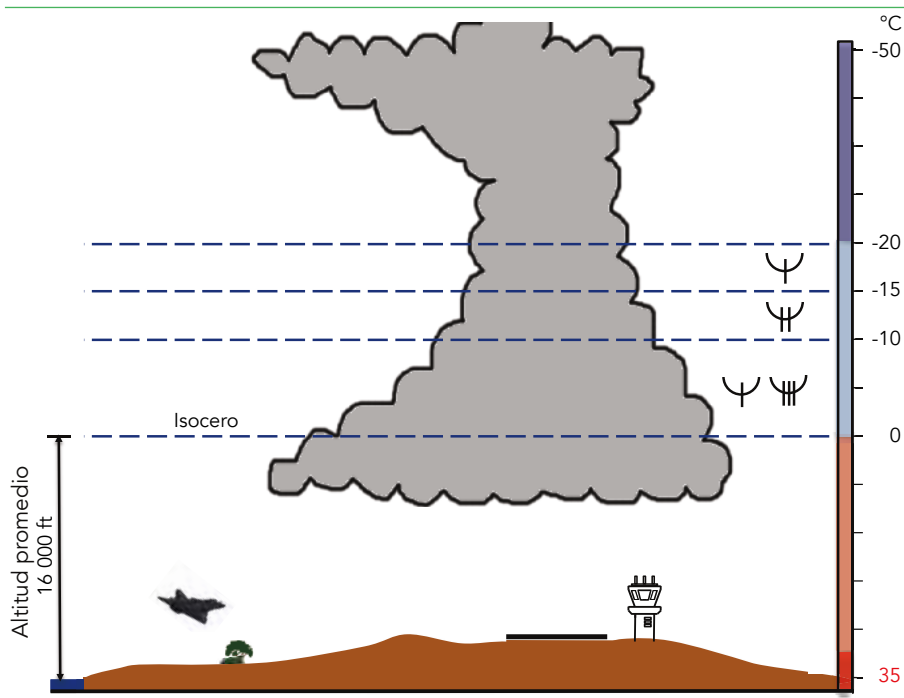


Figura 49. Altitudes favorables de engelamiento.

Fuente: elaboración propia.

8.2 Nubes que producen engelamiento

El engelamiento puede presentarse en cualquier tipo de nubes ya que cualquiera de ellas puede aportar el contenido de agua líquida que necesita. Sin embargo, el piloto también debe evitar volar sobre el tope de nubes, recordando que aunque no pueda ver el agua condensada en forma de nube, ello no significa que la humedad no esté afectando la aeronave.

Las nubes de desarrollo vertical generan el engelamiento más fuerte. Los torrecúmulos (TCU) y cumulonimbos (Cb) tienen un elevado contenido de agua líquida y pueden afectar gravemente el funcionamiento de la aeronave. En Colombia, el engelamiento por nubes medias puede ser moderado, con temperaturas entre $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ dependiendo de la densidad de la nube; sin embargo, lo habitual por la baja cantidad de agua líquida y espesor es que presenten un engelamiento ligero. Las nubes bajas tienen un bajo contenido de agua líquida y pocas veces alcanzan la isocero¹⁹, así que las probabilidades de engelamiento son mínimas. Tampoco es probable que las nubes altas reúnan las características atmosféricas que se requieren para el engelamiento.

¹⁹ Nombre especial para referirse a la isoterma de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

8.3 Factores para que se produzca engelamiento

114

8.3.1 Factores mínimos

Como su nombre lo indica, son los factores meteorológicos mínimos para que se produzca el engelamiento. De los tres, el piloto es consciente de la presencia del agua si se encuentra volando entre nubes y cuenta además con el dato de temperatura externa, así que deberá prestar especial atención a estos parámetros. Basado en datos tomados desde aeronaves con equipos especializados, Politovich (1989) resume las condiciones más favorables para que se produzca el engelamiento, entre las cuales destaca la temperatura, la cantidad de agua líquida y el tamaño de la gota:

- Agua líquida.
- Temperatura de la gota inferior a 0 °C (estado de sobre enfriamiento).
- Tamaño de la gota

Todas las aeronaves que se encuentren por encima de la isoterma de 0 °C y en área de humedad visible estarán expuestas a condiciones de engelamiento. Sin lluvia o nubes, el peligro de engelamiento es mucho menor (figura 50).

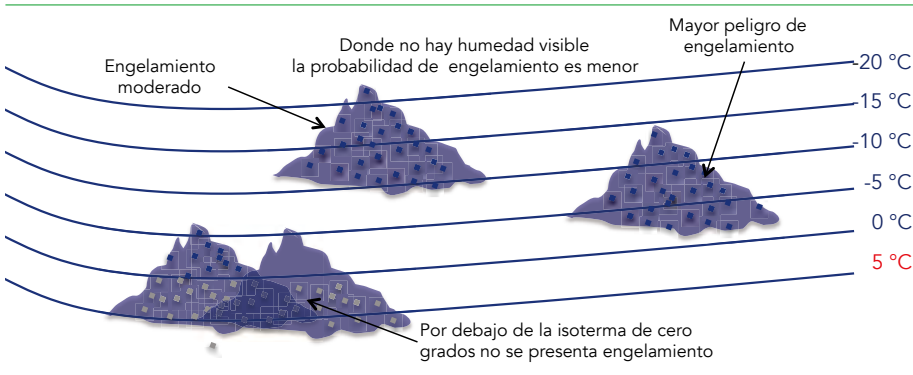


Figura 50. Gotas sobreenfriadas.

Fuente: elaboración propia.



8.3.2 Factores que lo intensifican

Son factores adicionales no esenciales para que se presente el engelamiento. Estos pueden ser más fácilmente identificados por las tripulaciones.

- **Velocidad de la aeronave.** Durante el vuelo y por efecto del rozamiento con el aire, la estructura de la aeronave se calienta: a mayor velocidad, menor probabilidad de formación de hielo. Sin embargo, cuando el avión vuela entre nubes, la protección proporcionada por este calentamiento cinético se reduce, ya que el calor debe gastarse también en elevar la temperatura del agua recolectada a la temperatura de la superficie y en proveer calor latente de evaporación a las mismas.
- **Eficiencia de la aeronave para acumular hielo.** Es una característica que varía según la estructura y perfil aerodinámico de cada aeronave.
- **Topografía del sector.** Cuando se produce un forzamiento orográfico, el aire tiende a enfriarse, alcanzado la saturación e intensificando las condiciones de engelamiento. Según la Federal Aviation Administration–FAA (2000), cada región montañosa tiene áreas definidas de formación de hielo que dependen del flujo del viento y que se extienden por encima de 5000 ft sobre la cima de las montañas.
- **Diámetro de la gota.** Según la Advisory Circular *Flight in icing conditions* (2015), las capas superiores de las nubes contienen a menudo la mayor cantidad de agua líquida y las gotas más grandes.
- **Velocidad del aire.** Al aumentar la velocidad del aire, se aumenta implícitamente la captura y cantidad de gotas superenfriadas y, por lo tanto, tiene el mismo efecto que una mayor concentración de agua líquida en la nube (UK. Met. Office, 1994)

En Colombia, el engelamiento se ve intensificado por las zonas más altas del país. La figura 51 muestra el pronóstico de este fenómeno para el día 5 de febrero de 2013 a las 19:00 hora local; en él se indica la altitud de la isocero en FL y los sectores más afectados, los cuales corresponden a las zonas montañosas. Aunque en la figura 51 no es posible observar el engelamiento sobre el océano Pacífico y mar Caribe, también puede presentarse.

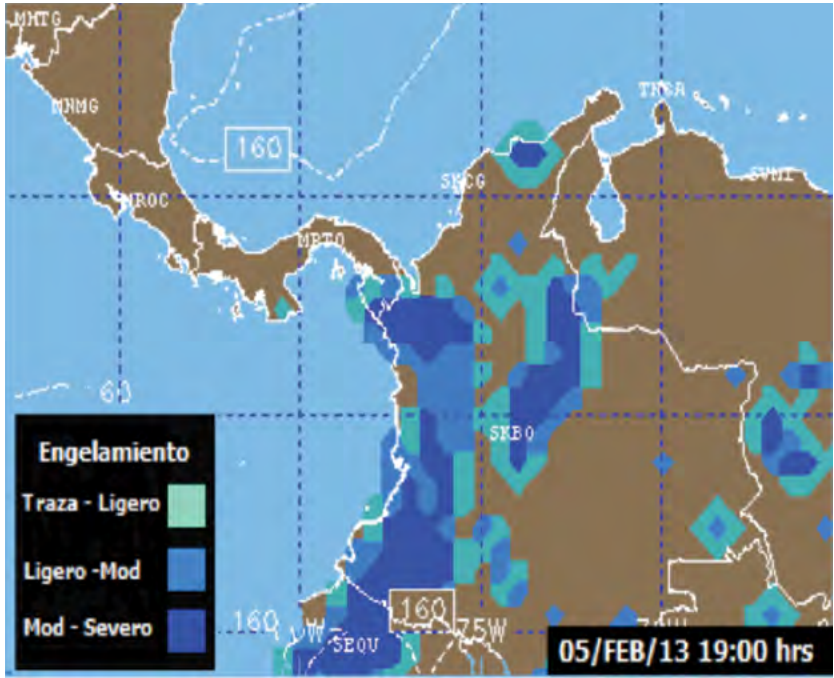


Figura 51. Engelamiento acentuado por montaña.

Fuente: Tomado de JetPlan (s.f.).

8.4 Clasificación del engelamiento

La clasificación del engelamiento se realiza según su intensidad, la cual puede ser de tipo traza, ligero, moderado o severo, en función de la cantidad de hielo que se forma por unidad de tiempo.

Traza. Es un tipo de engelamiento casi imperceptible para la tripulación. El hielo se disipa casi a la misma velocidad con la que se forma.

Ligero. El hielo se acumula lentamente y puede llegar a 5 mm en 5 minutos, sin afectar el rendimiento de la aeronave ni los instrumentos de comunicación. Se hace necesario utilizar los sistemas antiengelamiento y se recomienda no permanecer en esa situación por un periodo superior a una hora.

Moderado. El hielo acumulado alcanza los 50 mm en 5 minutos, reduciendo hasta un 15 % la velocidad de la aeronave y generando vibraciones con una posible pérdida de efectividad en los sistemas de comunicación. Además de usar los sistemas antiengelamiento, se requiere un cambio de altitud.



Severo. El hielo supera los 50 mm acumulados en 5 minutos, lo cual reduce hasta el 25 % la velocidad de la aeronave y afecta drásticamente los sistemas de control. Ello causa fuertes vibraciones, pérdida de potencia y avería de los sistemas de comunicación. Los sistemas antiengelamiento pocas veces funcionan, así que lo más recomendable es cambiar la altitud de inmediato.

El engelamiento se considera una situación crítica para la aeronave. Las tripulaciones no deben esperar a tener una confirmación visual de engelamiento. Antes de acumularse en los planos –donde es visible a la tripulación–, en la mayoría de los casos el engelamiento se forma primero en el empenaje²⁰.

Otro aspecto que se debe considerar sin tener en cuenta el tipo de engelamiento es si se está volando en una zona de riesgo, en cuyo caso la tripulación deberá considerar en primera instancia cambiar la altitud de la aeronave, es decir, salir de esa condición de riesgo. Cuando se está en tal situación, siempre es aconsejable disminuir la altura si las regulaciones aéreas y topografía lo permiten; de otra manera, podría considerar aumentar la altura. Las dos opciones son válidas.

8.5 Tipos de hielo en los que se manifiesta el engelamiento

Hielo claro (*clear ice*). El hielo claro se forma principalmente entre 2 °C y -10 °C. En este tipo de hielo, las gotas no se congelan inmediatamente –al hacer contacto con la aeronave–, sino que fluyen sobre la superficie, de tal manera que su congelamiento gradual les permite desplazarse inclusive dentro de la estructura interna de la aeronave. Su alta densidad y dificultad para desprenderse hace que sea calificado como el tipo de hielo más peligroso para las operaciones aéreas.

Hielo opaco, granular o cencellada (*rime ice*). Tiende a formarse con temperaturas inferiores a -15 °C. Al ser de congelación rápida, atrapa aire formando capas de hielo fáciles de romper (Eichenberger, 1996). Se acumula principalmente en las zonas externas y bordes delanteros de la aeronave. Se considera el más común y menos peligroso.

Hielo mixto. Es una mezcla del hielo opaco y claro que puede presentarse en cualquier rango de temperaturas. Su grado de peligrosidad está ubicado entre el hielo opaco y el claro, igual que su dificultad para desprenderse de la estructura de una aeronave. Normalmente, se presenta con temperaturas entre -10 y -15 °C.

La FAA (s.f.) vinculó el tipo de hielo con un rango específico de temperaturas que facilitan su formación. A diferencia del tipo de hielo, la intensidad del engelamiento no se encuentra solamente encasillada en un rango de temperaturas, sino que depende también del tiempo de exposición al fenómeno y del contenido de agua líquida presente en la atmósfera. Politovich (1989) realizó un estudio de condiciones favorables para que

20 Parte posterior de la aeronave compuesta por el estabilizador vertical y horizontal.






se presentara el engelamiento y concluyó que el rango de temperaturas más favorable se encuentra entre 0° y -20 °C, en especial en el rango de -5,5° a -9,4 °C.

Al realizar una aproximación de la intensidad de engelamiento teniendo como base los rangos de temperatura que la FAA asoció a los tipos de hielo, y bajo el principio que la peligrosidad del tipo de hielo le permitiría a la aeronave permanecer menos tiempo en esa condición, se lleva a cabo una aproximación práctica de la intensidad del engelamiento con la temperatura (tabla 14).

118

Tabla 14. Temperatura promedio según la intensidad de engelamiento y tipo de hielo.

Intensidad del engelamiento		Tipo de hielo	Temperatura promedio
	severo	claro	0 -10 °C
	moderado	mixto	-10 a -15 °C
	ligero	opaco	-15 a -20 °C

Nota:
 *La intensidad del engelamiento depende realmente del rango de temperatura, el contenido de agua líquida y el tiempo que la aeronave se ha expuesto al fenómeno.
 *Las tres intensidades de engelamiento pueden presentarse con cualquier tipo de hielo.

Fuente: elaboración propia.

8.6 Engelamiento en la aeronave

El engelamiento es el fenómeno meteorológico más peligroso para la aviación. Por ello, los aterrizajes, descensos, virajes, etc., deben realizarse con un amplio margen de seguridad, conscientes de la disminución de los mínimos operacionales.

Dependiendo de la clasificación del engelamiento y el tipo de hielo, la aeronave podría experimentar cualquiera de los siguientes inconvenientes:

- Aumento de resistencia por modificación del perfil aerodinámico.
- Aumento de consumo de combustible debido al peso extra causado por el engelamiento.
- Daños en los mecanismos de comando y control de la aeronave.
- Daños estructurales a la aeronave.
- Deterioros en las antenas.
- Falla en los instrumentos de control.



- Pérdida de sustentación.
- Pérdida de potencia, convertida en pérdida de velocidad y altitud.
- Pérdida de tracción en hélices.
- Disminución de visibilidad en cabina.
- Vibraciones.

8.6.1 Engelamiento de los bordes de ataque y cola

Lo que hace al engelamiento un verdadero peligro para la aviación es el efecto que produce sobre el borde de ataque de una aeronave, toda vez que modifica directamente el perfil aerodinámico, lo cual afecta gravemente la sustentación, aumenta la resistencia al avance y hace insostenible el vuelo.

Al ser de rápida congelación, el hielo opaco normalmente se acumula en una zona cerca del borde delantero donde los sistemas antiengelamiento lo pueden desprender. Su composición lo hace poco eficaz para perturbar el flujo del aire.

Por otra parte, el hielo claro es muy difícil de remover, y su acumulación progresiva causa una modificación al perfil alar que interfiere directamente con el flujo normal del aire y permite la formación de pequeños remolinos alrededor del borde de ataque que serán los encargados de crear zonas de turbulencia y la posterior pérdida de sustentación (figura 52).



Figura 52. Interacción entre el tipo de hielo y el flujo de aire. Adaptado de FAA (2015).

Fuente: elaboración propia.

8.6.2 Formación de hielo en hélices

Las hélices están constantemente expuestas a la fuerza centrífuga inducida por su rotación. Al adherirse hielo a estas superficies, se causa un inevitable desbalanceo en el sistema, lo cual produce fricción, vibraciones y disminución de la propulsión. También suele perderse la sincronía con los motores, se aumenta el peso y se disminuye la eficiencia aerodinámica.

Para combatir el hielo en las hélices es muy común encontrar sistemas *anti-icing* y *de-icing* dependiendo de si actúan antes o después de la formación del hielo. Un completo análisis del funcionamiento de estos sistemas en las hélices puede ser consultado en López (2012).

8.6.3 Engelamiento en el carburador

120

El engelamiento en el carburador es especialmente peligroso porque puede provocar un fallo y apagado del motor por hielo en el motor. Puede llegar a presentarse por:

Impacto en la entrada de aire del motor. Se produce cuando las gotas logran filtrarse directamente en el carburador, afectando gravemente al sistema de mezcla.

Evaporación del combustible. Al evaporarse el combustible, se absorbe calor para generar un equilibrio térmico que tiene como consecuencia un descenso de la temperatura. Al descender la temperatura, se produce saturación y la humedad presente puede convertirse en hielo, el cual queda atrapado dentro del carburador.

Se puede intuir formación de hielo en el carburador mediante una súbita pérdida de potencia y un mal funcionamiento del motor. En aviones con hélices de paso fijo, el mal funcionamiento se notará en la caída de las revoluciones por minuto (rpm), mientras que en hélices de paso variable (de velocidad constante) puede verse con la caída de presión del colector²¹.

8.6.4 Formación de hielo en el tubo Pitot

La formación de hielo en el tubo Pitot causa una incorrecta medición de la presión dinámica del flujo de aire, lo cual afecta directamente la información suministrada por el velocímetro. La mayor parte de las aeronaves cuentan con un sistema de calentamiento en el tubo Pitot que les permite activarlo cuando se vuela en zonas de baja temperatura.

8.6.5 Incidentes causados por engelamiento en la FAC

Las tripulaciones han sufrido el engelamiento de una forma silenciosa; normalmente no lo reportan y superan el fenómeno usando los sistemas *anti-ice*. Los datos estadísticos provienen de accidentes graves donde la vida de los tripulantes se ha visto comprometida. Se destacan los siguientes casos:

AC-47T FAC1650 (30/AGO/1988). La aeronave se encontraba cerca de la intersección ANAME en la ruta Apiay (Meta) – Neiva vía A-301, W-16 con 16 000 ft de altitud, cuando la tripulación informó al controlador de Apiay del mal tiempo y formación de hielo. La aeronave fue encontrada en el Páramo de las Mercedes (04 07 00 N 73 58 00 W), departamento de Cundinamarca, totalmente destruida.

SR-560 FAC 5763 (15/JUL/08). Saliendo del aeródromo Los Cedros (Antioquia) y realizando un vuelo de reconocimiento, la tripulación informa que están bajo una condición de engelamiento a 40 000 ft de altitud y la palanca de potencia está paralizada.

SR-560 FAC 5747 (7/SEP/10). La aeronave despegó del aeródromo El Dorado (Bogotá) a las 22:24 horas con el fin de realizar un vuelo de reconocimiento a 21 000 ft de altitud.

²¹ Instrumento encargado de regular la mezcla de aire-combustible en el motor.



A las 23:03 horas entra en pérdida habiendo mencionado con antelación que tenían presencia de hielo. La aeronave es encontrada en el Cerro Gramalote (Meta) completamente destruida.

La figura 53 corresponde a la situación meteorológica de ese día y hora, en la cual se evidencia que en la ruta de la aeronave y el patrón de reconocimiento ejemplificado con círculos de 5, 10 y 15 NM, presentaban nubes en las capas bajas y medias de la atmósfera con gran contenido de humedad. Aunque la tonalidad de color amarillo representa las formaciones convectivas más fuertes, las condiciones meteorológicas de la zona y la continua rotación de la aeronave sobre un mismo punto y nivel pudieron contribuir con el trágico accidente.

121

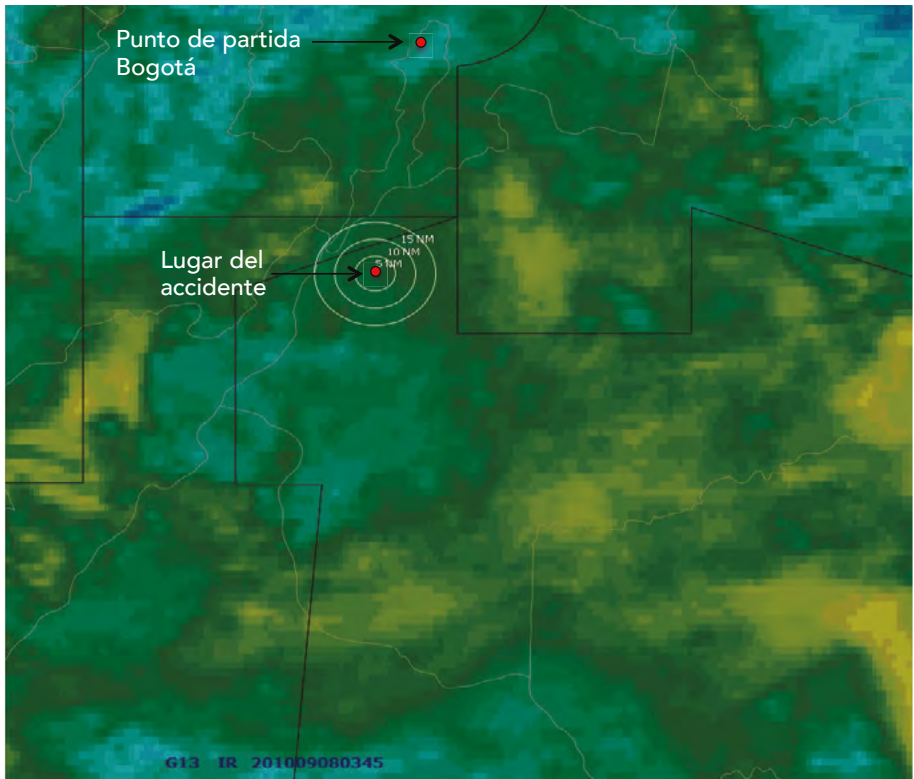


Figura 53. Imagen infrarroja que muestra las condiciones atmosféricas del 5/SEP/10 a las 22:45 horas y la ruta de vuelo del FAC 5747.

Fuente: elaboración propia. La imagen satelital fue tomada del Sistema de Información Meteorológico de la FAC y modificada para mostrar el punto de partida y lugar del accidente aéreo.

Con el fin de evitar posibles nuevos accidentes por causas relacionadas con engelamiento, el 23 de septiembre de 2010 la FAC emitió la alerta 17 con las siguientes instrucciones para las tripulaciones:

- Activar las botas desheladoras apenas se encuentren con condiciones de engelamiento, a menos que el manual de vuelo específicamente lo prohíba.

- *Si el manual del avión o su equivalente especifica que se debe esperar a la acumulación de hielo antes de activar las botas desheladoras, los pilotos deberán mantener una vigilancia estrecha de los cambios en velocidad y cualquier cambio de las características del vuelo.*
- *Mientras las condiciones de hielo existan, los pilotos deberán operar continuamente las botas desheladoras, ya sea automática o manualmente.*
- *Apague o use de manera limitada el piloto automático para detectar rápidamente los posibles cambios en las características de vuelo de la aeronave.*

En la misma alerta, la FAC describe algunos de los factores propicios para que se presente el engelamiento y realiza una descripción del problema. Aquí se relacionan algunos de ellos:

La presente ALERTA se origina como resultado de accidentes aéreos por la aplicación de juicios incorrectos durante la operación de las aeronaves, por condiciones de inseguridad, estrés, personalidad, ego o temperamento, sumiendo riesgos innecesarios durante la operación aérea.

Una cantidad tan pequeña como 6,35 mm de acumulación de hielo en el borde de ataque puede incrementar las velocidades de pérdida entre 25 y 40 kt; el peligro radica en que esta acumulación es mínima y puede ocasionar una falsa confianza en los pilotos.

La pérdida de control súbita es posible con una acumulación de 6,35 mm de hielo en el borde de ataque a las velocidades de aproximación típicas.

El uso del piloto automático puede enmascarar los cambios en las características de vuelo de los aviones y puede ser un precursor de la pérdida de control o de la entrada en pérdida.

Muchas aeronaves requieren aún hoy en día que el piloto reconozca visualmente la formación de hielo en las alas y su grosor para determinar la activación de los sistemas de control, a pesar que puede ser difícil observarlo desde la cabina.

