

8. MANEJO DE CENIZAS EN OTROS AEROPUERTOS Y AEROVÍAS DEL MUNDO

Carlos Valdés González y Esteban Ramos Jiménez

8.1 RIESGO PARA LA AERONAVEGACIÓN

La naturaleza abrasiva de la ceniza, presenta un riesgo para cualquier sistema electrónico, de comunicaciones, de generación de electricidad y de aviones en vuelo. El comportamiento anómalo de operaciones en tierra por efecto de ceniza, incluye, aviones, computadoras, cortos circuitos, transformadores, y la red de distribución de electricidad. Lo ideal es prevenir fallas o comportamiento anómalo de estos sistemas.

8.2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

8.2.1 Efecto de la ceniza en aeronaves en vuelo

De acuerdo con el *United States Geological Survey* (USGS), los siguientes volcanes han sido responsables de la emisión de ceniza que ha afectado aeronaves en vuelo:

Pinatubo, Filipinas
Sakurajima, Japón
Pacaya, Guatamala
Galeras, Colombia
Spurr, (Alaska) Estados Unidos
Lascar, Chile
Galunggung (Java), Indonesia
Manam, Papua Neva Guinea
Redoubt, (Alaska) Estados Unidos de América
Augustine, (Alaska) Estados Unidos de América
Nyamuragira, República Democrática del Congo
Sheveluch, Rusia

Desafortunadamente, el peligro por ceniza no sólo se localiza en las inmediaciones del volcán, ya que este material puede esparcirse a distancias considerables del volcán. Por ejemplo, la nube de ceniza que produjo la erupción del volcán Pinatubo en junio de 1991, se elevó hasta 35 km y viajó hasta 8,000 km en menos de 3 días. En el caso de la erupción del volcán Santa Elena, se considera que produjo 540 millones de toneladas de ceniza, que cayeron sobre 56,000 km².

8.2.2 Daño en vuelo

Cuando un avión moderno viaja a alta velocidad y encuentra una nube conteniendo fragmentos de ceniza volcánica, puede ocurrir una amplia variedad de daños y consecuencias, las cuales son evidentes inmediatamente. Comúnmente, la ceniza volcánica está compuesta de una mezcla de fragmentos agudos y angulares, de vidrio volcánico, así como también de fragmentos de roca y minerales, cuyo tamaño va de polvo fino a fragmentos de 3 mm de diámetro. Los fragmentos típicamente incluyen minerales de feldespato, cuarzo y piroxena. La ceniza es dura y fácilmente puede rayar y desgastar el vidrio, el plástico y los metales. Cualquier superficie de los aviones, tal como ventanillas, cubiertas de luz de aterrizaje, ejes de las alas y el fuselaje pueden ser dañadas. Debido a su tamaño minúsculo, la ceniza también puede penetrar en orificios externos del avión, incluyendo las tomas de aire de los instrumentos de vuelo, tales como los tubos pitot.

La ingestión de ceniza volcánica por las turbinas puede causar un serio deterioro en el funcionamiento de las mismas o aún provocarle una falla. De 1980 a la fecha, al menos han ocurrido siete encuentros de aviones con nubes de ceniza, que han provocado fallas temporales en las turbinas. Los procesos de deterioro que han ocurrido en las turbinas son dos principalmente: erosión de las partes móviles de las turbinas, tales como el compresor y las hojas de las turbinas así como la acumulación de ceniza parcialmente fundida en las zonas calientes de las mismas. La erosión de las hojas del compresor reduce la eficiencia de compresión de la turbina, pero aún no ha sido probado que cause falla en la misma. Los depósitos de ceniza en las secciones calientes de la turbina, incluyendo las tomas de combustible, el carburante, y la turbina, reducen la eficiencia del mezclado de combustible y restringe el paso del aire a través de la turbina. Esto causa un *surging* o incendio y pérdida inmediata de potencia de la turbina. Esta es la causa principal de la falla de turbina.

El aire que entra a la cabina del avión es tomado de la turbina. Los generadores de potencia del aire y de los sistemas neumáticos a lo largo del avión suministran el sistema de aire para los pasajeros. Este aire pasa a través de un sistema de control ambiental y es llevado por ductos a las partes apropiadas del avión. Las partículas de ceniza pueden corroer el sistema de ductos así como también ocluir el sistema de filtros diseñado para remover el polvo del aire.

Lo más difícil es evaluar el daño que ocurre por la larga exposición a las nubes de gas y también del gas derivado de las partículas que permanecen en la estratósfera. Para grandes erupciones, como las del Chichón, México en 1982 y del Pinatubo, Filipinas en 1991, los gases permanecieron suspendidos en la estratósfera por años, mucho después de que las partículas sólidas se habían asentado. El dióxido de azufre en las nubes absorbe vapor de agua y es convertido en gotitas de ácido sulfúrico (aerosoles). Cuando un avión vuela en una estratósfera contaminada con aerosoles volcánicos, estas gotitas ácidas se adhieren a las ventanillas y fuselaje del avión y pueden penetrar por las micro-fisuras de los mismos. Esto puede ser observado más fácilmente en las ventanillas de acrílico,

donde las nubes y el ácido atacan el contorno de las mismas, lo cual es evidente al momento de reemplazarlas (Rogers, 1984, 1985; Bernard y Rose, 1990).

Otros daños de corrosión en plásticos y hules usados en sellos y lubricantes, así como también en componentes metálicos usados en la estructura, no son fácilmente identificables. La identificación de daños en estos componentes puede requerir programas de inspección y mantenimiento a largo plazo. Aún mas, la corrosión debida a la contaminación volcánica puede ser difícil identificarla de otra causada por contaminación ambiental, tal como aquella debida a la sal originada por el rocío marino o gases ácidos en una zona urbana contaminada.

Como las turbinas generalmente son inspeccionadas y reconstruidas con más frecuencia que el resto del avión, los problemas de corrosión en las turbinas debidos al gas volcánico pueden ser más fácilmente identificados y corregidos durante el mantenimiento regular. Sin embargo, la estructura y fuselaje del avión son los más susceptibles a impactos de largo plazo, debido a repetidas exposiciones a las nubes volcánicas durante los vuelos. Los científicos e ingenieros aún no han estimado los efectos a largo plazo de la corrosión por componentes ácidos en nubes volcánicas.

8.2.3 Casos históricos de encuentros de aeronaves con ceniza volcánica

En 1989, el volcán Redoubt en Alaska entró en actividad eruptiva. Las erupciones mayores ocurrieron el 15 de diciembre, a las 01:40, 03:48 y 10:15 h; las dos primeras duraron aproximadamente una hora y las tres generaron grandes columnas y nubes de ceniza. Aproximadamente a las 03:50 h, un Boeing 737 fue el primer avión en encontrar una nube de ceniza del Redoubt cuando se aproximaba a Anchorage en la oscuridad en un vuelo procedente de Kotzebue, Alaska. El encuentro ocurrió cuando el avión descendió 17,000 pies de altitud con las turbinas puestas en "vuelo sin potencia". El encuentro duró 17 s y consistió en olor a gas y azufre y la aparición del Fuego de San Elmo, debido a la carga de los parabrisas de la cabina del piloto, por las partículas de ceniza. La ceniza desgastó y embotó los parabrisas, pero no redujo visibilidad significativamente. También se desgastaron ligeramente los bordes de ataque de las alas. El avión continuó su descenso para hacer un aterrizaje normal en Anchorage donde fue inspeccionado por daño. Las turbinas fueron examinadas, pero no mostraron daño y no se reemplazaron. Los parabrisas de la cabina del piloto, fueron reemplazados. La erupción mas vigorosa del 15 de diciembre, de las 10:15 a las 11:00 h aproximadamente, envió una columna de ceniza a 40,000 pies (> 12 Km). Los vientos en el nivel superior de 100 nudos transportaron esta nube de ceniza al noreste. Aproximadamente a las 11:00 h, la nube se movió por encima de las comunidades a lo largo de la carretera de los Parques al norte de Anchorage y las partículas de roca volcánica mayores que el tamaño de la arena, cayeron en Talkeetna, 225 km al nor-noreste del volcán Redoubt. Al mismo tiempo, algunos aviones se encontraban en esta vecindad y observaron la nube de ceniza en un área restringida. Un Boeing 727 de pasajeros, que había despegado del Aeropuerto Internacional de Anchorage para Betel, Alaska a las 11:25 h, encontró la nube de la erupción de las 10:15 h, mientras ascendía de 15,000 a 18,000 pies de altitud. A los 18,000 pies, el piloto informó que

había encontrado una nube de ceniza y regresó a Anchorage. No hubo ningún informe de daño por este encuentro. Al mismo tiempo, un nuevo avión de pasajeros 747-400 del vuelo 867 de KLM estaba entrando en el espacio aéreo de Anchorage por el norte.

El vuelo 867 de KLM se originó en Ámsterdam, con rumbo a Tokio. Durante el pre-vuelo, la tripulación fue informada en Ámsterdam de la erupción de la 01:40 h en el volcán Redoubt. Debido a esta erupción, se cargaron 5,000 galones adicionales de combustible al avión, en caso de ser necesaria una desviación a otro aeropuerto. El vuelo 867 partió de Ámsterdam a las 03:20 (AST) y fue programado para aterrizar en Anchorage a las 12:10 h. A bordo iban 231 pasajeros y una tripulación de 14 personas. El vuelo 867 simplemente había pasado por encima de Fairbanks a 39,000 pies en la ruta J-436, a las 11:32 h, cruzando a una velocidad de unos 490 nudos, cuando el avión empezó su descenso rumbo a Anchorage. Las transcripciones de comunicación de voz entre la Administración Federal de Aviación (FAA), el Centro de Control de Tráfico de Rutas Aéreas de Anchorage (ARTCC) y varios otros aviones en el espacio aéreo incluyendo el vuelo 867, indicaban un conocimiento del volcán Redoubt y su reciente actividad. En la vecindad del vuelo 867 de KLM, había al norte un DC-10 y un DC-8 al sur. El DC-10 se localizó aproximadamente a 30 millas náuticas (55 km) al sur de la ubicación donde el vuelo 867 encontraría la nube de ceniza. EL DC-8 se localizó aproximadamente a 12 millas náuticas (22 km) al norte de la situación del encuentro. El DC-10 estaba al norte de Anchorage sobre la ruta aérea V-438 (vía aérea de baja altitud) subiendo a 17,300 pies cuando su tripulación informó a las 11:39 h de la presencia de la nube de ceniza por encima del avión. El DC-10 continuó al norte, alcanzando 24,000 pies a las 11:45 h e informó que estaba bajo el borde norte de la nube de ceniza y a punto de pasar a un cielo claro. A las 11:41 h la tripulación del DC-8, volando al sur en la ruta aérea J-438, radió que ellos podían ver una nube al sureste a 37,000 pies. El DC-8 fue autorizado para ascender sobre la nube y a las 11:43 h habían alcanzado una altitud de 39,00 pies. Las comunicaciones entre la torre de control de tráfico aéreo de Anchorage y la tripulación del vuelo 867 durante y siguiendo los reportes de los aviones DC-10 y DC-8, dieron como resultado que el vuelo 867 virara al sureste de su ruta del vuelo normal para evitar la nube de ceniza que aún no podían identificar visualmente. A las 11:41 h, el avión de KLM fue autorizado para comenzar su transición al sureste. Aproximadamente 40 millas náuticas (75 km) después, a las 11:46 h, el vuelo 867 entró en la nube de ceniza a una altitud de aproximadamente 25,000 pies. Al entrar en la pluma, la tripulación del vuelo actuó inmediatamente para subir por encima de la nube aumentando la potencia de los reactores. Un minuto y medio después, ellos habían subido 2,900 pies más, a aproximadamente 27,900 pies, antes de que los cuatro reactores se “ahogaran”. Después de perder potencia las turbinas, el piloto viró de 140 grados en el compás magnético a 120 grados. Entre las 11:47 h y las 11:51 h, el avión se deslizó sin potencia a una altitud de aproximadamente 17,200 pies antes de que las turbinas 1 y 2, se pusieran a funcionar de nuevo con éxito. Con las turbinas 1 y 2 funcionando, el avión continuó descendiendo a 13,300 pies antes de que las turbinas 3 y 4, reiniciaran también su funcionamiento a las 11:55 h. La elevación del terreno en el área de estas maniobras tenía entre 7,000 y 11,000 pies. Después de reiniciar el funcionamiento de las turbinas, el vuelo 867 reasumió la potencia del vuelo a Anchorage e hizo un aterrizaje exitoso a las 12:25 h, 15 minutos después de la

llegada programada. El avión de KLM casi encontró directamente el borde de ataque de la nube de ceniza producida por la erupción que empezó a las 10:15 h del 15 de diciembre de 1989. En el momento del encuentro a las 11:46 h, el vuelo 867 de KLM estaba a 150 millas náuticas (280 km) al norte-noreste del volcán Redoubt. El encuentro con la nube de ceniza ocurrió 91 minutos después del comienzo de la erupción. Los vientos superiores durante la mañana del 15 de diciembre estaban previstos en 60 nudos a 24,000 pies a 210 grados; 98 nudos a 30,000 pies a 230 grados; 97 nudos a 34,000 pies a 230 grados; y 75 nudos a 39,000 pies a 230 grados. La posición del borde de ataque de la nube de ceniza estaba acorde con las velocidades de viento previstas.

8.2.3.1 Naturaleza del encuentro-reacción de la tripulación de vuelo

El plan de vuelo fue provisto por el capitán y dos pilotos más. Cuando el avión empezó su descenso aproximadamente a las 11:32 h, la tripulación reportó capas delgadas de nubes blancas al sur. Su ruta aérea (Y-436; en dirección 164 grados) los llevó al sur suroeste hacia donde sale el sol. La salida del sol en Anchorage el 15 de diciembre fue a las 10:14 h. Así, la nube de ceniza como también cualquier nube de temporal se habrían iluminado por detrás por el sol creciente. Al entrar en la nube, la tripulación informó visibilidad muy reducida y pérdida temporal de la mitad de la instrumentación de la cabina del piloto cuando las turbinas fallaron (AWST, 1990; NTSB, 1991).

Inmediatamente antes del encuentro, la tripulación informó que estaba entrando en una nube que era "un poco más café que una nube normal." Justamente después de entrar en la nube, informaron que se había ahumado la cabina del piloto y el "ambiente exterior se había vuelto negro oscuro y había partículas encendidas que parecían luciérnagas en la oscuridad." El primer oficial informó que durante el descenso del avión de 35,000 a 25,000 pies: "Debajo de nosotros había capas delgadas de nubes blancas y a aproximadamente 26,000 pies nosotros descendimos en una de aquéllas. El ambiente cambió de blanco al negro en unos segundos. El humo entró en la cabina del piloto y nosotros nos pusimos nuestras máscaras para oxígeno". El otro primer oficial observó: "Aproximadamente a 26,000 pies, descendiendo el avión, entró en lo que parecía ser una capa normal de nubes. Sin embargo, inmediatamente después de la entrada, penetró humo en la cubierta de vuelo. Las máscaras para oxígeno fueron utilizadas de inmediato y como el piloto estaba conduciendo, comencé una subida brusca para dejar la nube de ceniza."

8.2.3.2 Naturaleza del encuentro-reacción del personal de cabina

El periódico y la televisión reportaron el encuentro del KLM 867 con la nube de ceniza e incluyeron entrevistas con los pasajeros y la tripulación del avión. Estos informaron que la cabina se llenó de humo y que había un fuerte olor a azufre. Pocos minutos después de la pérdida de potencia, la actitud del avión cambió de un ascenso a una velocidad de aproximadamente 1,500 pies por minuto a un descenso por pérdida de potencia a una velocidad de aproximadamente 1,620 pies por

minuto. Inicialmente, esto causó que los objetos flotaran ligeramente en la cabina en un estado de pérdida de peso, cuando el piloto del avión maniobró para mantener la velocidad de vuelo. El interior de la cabina se puso oscura y un sentido general de miedo parecía afectar a los pasajeros y tripulación de la cabina. Varios pasajeros experimentaron náusea, que ellos atribuyeron a una combinación de olor de gas de azufre, ansiedad y la incomodidad asociada con el descenso rápido de la aeronave. No se informó de golpes u otras señales de turbulencia. Estas reacciones fueron similares a aquéllas reportadas durante el encuentro de un British Airways 747 con una nube de ceniza del volcán de Galunggung, Indonesia en 1982 (Tootell, 1985).

8.2.3.3 Daño al avión

El vuelo 867 planeó dentro de la nube de ceniza durante aproximadamente 5 minutos a una velocidad de unos 490 nudos. Durante este tiempo, la ceniza volcánica fina pudo penetrar tanto en la cabina como en las turbinas. La ceniza depositada en las turbinas, compartimiento de equipaje y cabina del avión estaba compuesta de partículas que van de menos de 1 micra hasta 100 micras en diámetro. Los filtros para el sistema del manejo aéreo ambiental no permitieron el paso de partículas mayores de 5 micras en la cabina. Las partículas colectadas en la parte externa del avión mostraron un amplio rango de tamaños (mostró) con una población sustancial de 100 micras. Las partículas obtenidas del sumidero de combustible que contuvo ceniza menor, generalmente estaban en el rango menor a 20 micras; el sistema hidráulico generalmente contuvo ceniza moderada menor a 30 micras; y el aceite de la turbina generalmente contuvo contaminación de ceniza pesada con partículas menores a 60 micras (T.M. Murray; Cía. Boeing, comunicación personal, 1990).

Las muestras de ceniza de las erupciones del 15 de diciembre colectadas en tierra, debajo del espacio aéreo del encuentro, tuvieron una masa por unidad de área de aproximadamente 500 gramos por m^3 (W. McGimsey, comunicación personal, 1990). La mayoría de las partículas en esta localidad fueron de menos de 200 micras de diámetro con aproximadamente 75% de las partículas con un diámetro medio menor a 20 micras. La ceniza estaba compuesta predominantemente por fragmentos de mineral, incluyendo el feldespato de plagioclasa, dos piroxenos (hiperstena y augita), hornblenda y óxidos de Fe-Ti, así como fragmentos de vidrio y de roca vítrea fresca y roca vieja del domo de lava pre-existente y del cuello del volcán. La roca y los fragmentos de mineral resultaron de forma angular, en bloques y típicamente cubiertos con una película delgada de vidrio volcánico vesiculado.

Debido a la naturaleza abrasiva de la ceniza, el exterior del avión y sus cuatro reactores resultaron dañados. Como se dijo antes, el daño principal a los reactores incluyó la abrasión de las hojas del compresor, acumulación de ceniza en el combustor, y acumulación de ceniza refundida a la entrada de la sección de turbina (Casadevall et al., 1991; Przedpelski y Casadevall, 1991) que eventualmente causó que fallaran todas las turbinas. Después del aterrizaje exitoso en Anchorage, el avión se mantuvo en tierra durante dos meses, para efectuar las reparaciones

necesarias. Todas las turbinas fueron reemplazadas antes de que el avión volara de nuevo.

Además de las turbinas, los instrumentos y sistemas eléctricos del avión se dañaron y también se reemplazaron numerosos componentes (Campbell, 1991a). La abrasión por la ceniza también dañó los parabrisas de la cabina del piloto y las ventanas de la cabina delantera, los bordes de ataque de las alas, el timón de cola, los cowlings de las turbinas, las cubiertas de fibra de vidrio para los tornillos de los alerones y el cono de nariz del radar. Las cubiertas para las luces de navegación y aterrizaje también resultaron muy desgastados. El sistema de tubo pitot, para medir la velocidad del avión mientras esta en vuelo, también fue tapado por la ceniza. Se contaminaron con ceniza el aceite de los motores, el fluido hidráulico, el suministro de agua potable, el sistema de control ambiental y los ductos de ventilación, por lo cual fueron reemplazados. Los accesorios de la cabina, el alfombrado, las cubiertas de los asientos y los cojines también fueron contaminados, por lo que tuvieron que ser limpiados.

El costo total por daños a este casi nuevo avión 747-400 fue estimado inicialmente entre 50 y 80 millones de dólares (AWST, 1990; Steenblik, 1990).

8.2.3.4 Causa probable del encuentro según la NTSB (National Transportation Safety Board)

Debido a que el vuelo 867 de KLM perdió potencia en sus reactores mientras volaba, el piloto fue exigido a archivar un informe del incidente con la FAA y con la Junta Nacional de Seguridad del Transporte (NTSB) para investigar y determinar la causa probable del incidente. El NTSB encontró la causa probable y la hizo pública en julio de 1992 y se cita aquí literalmente:

“La Junta Nacional de Seguridad del Transporte (NTSB) determina que la(s) causa(s) probable(s) de este accidente/incidente fue: Un encuentro inadvertido con una nube de ceniza volcánica, la cual dio como resultado un daño extraño (objeto extraño) y como consecuencia el compresor de las turbinas dejó de funcionar. Un factor relacionado con el accidente fue: la falta de información disponible sobre la nube de la ceniza a todo el personal involucrado.”

8.3 EFECTO DE LA CENIZA EN AEROPUERTOS

Los aeropuertos son instalaciones complejas, de gran tamaño y con responsabilidades jurídicas de muchos niveles. En cualquier aeropuerto hay varias instancias de autoridad y responsabilidades, que al momento de una crisis pueden traslaparse y en algún momento, hasta entrar en conflicto.

Un factor importante que hay que considerar es la jurisdicción de los servicios. Por ejemplo, todo lo que tiene que ver con aterrizajes, es controlado por una institución, mientras que cada aerolínea tiene sus propios sistemas de cómputo y controla todo su apoyo y servicios de mantenimiento. Con respecto a una contingencia por

presencia o caída de ceniza, debe reconocerse que existen todos estos servicios y que se debe tener un plan de contingencia que ayude a los diversos grupos a actuar juntos.

El problema de la ceniza en aeropuertos, no es nuevo, ha existido desde hace muchos años. Actualmente representa un riesgo mayor, debido a la cantidad de aeronaves que vuelan diariamente. A continuación se muestra una tabla con algunos de los aeropuertos afectados por ceniza volcánica en el mundo.

Aeropuertos Afectados por Caída de Ceniza Volcánica

Fecha	Ciudad/ Aeropuerto	Volcán	Cantidad de ceniza	Días cerrado	Comentario	Referencia
24/05/24	Kilauea	Kilauea	Bloques	?		Blong, 1984
22/03/44	Nápoles	Vesuvio	?	?	88 aviones dañados	Lloyd, 1990
21/01/51	Port Moresby	Lamington	?	?		Taylor, 1958
09/07/53	Anchorage	Spurr	3-6 mm	4-7		Juhle y Coulter, 1955; Wilcox, 1959
17/03/63	Surabaya	Agung	<10 mm	1		Jennings, 1969; Suryo, 1981
09/09/71	Kagoshima	Sakurajima	3 mm	<1		Kamo, 1993
23/01/76	Anchorage	Augustine	Traza	cancelaciones		Kienle y Swanson, 1985
03/08/79	Catania	Etna	Traza	1-?		Guest, 1980
18/05/80	Spokane, Yakima, Pullman, Grand Country, Missoula, MT	Mt. St. Helens	0.5-1 cm 0.5-1 cm 1 cm 7-9 cm 1-2 cm	3 7 7 15 varios		Schuster, 1981,83 Warrick, 1981
25/05/80	Portland	Mt. St. Helens	Traza (<0.1 cm)	Cancelaciones		Schuster, 1983
12/06/80	Pórtland	Mt. St. Helens	2-3 mm	Varios	Algunas compañías continuaron operando	Schuster, 1983
1982	Bandung	Galunggun g	Varios	Varios, incluyendo del 4 al 21 de junio	Cerrado por reducción de visibilidad	De Neve, 1986
03/10/83	Miyake-Jima	Miyake- Jima	10 cm	4		Blong, 1984
1984	Anchorage	Augustine	Traza	Cancelaciones		Kienle y Swanson, 1985
15/12/89 y 21/02/90	Anchorage	Redoubt	Traza	Cancelaciones	Ceniza en el espacio aéreo y varios encuentros	Casadevall, 1993

Fecha	Ciudad/ Aeropuerto	Volcán	Cantidad de ceniza	Días cerrado	Comentario	Referencia
08/01/90	Kenai, Alaska	Redoubt	5 mm	Varios		Casadevall, 1993
11/03/90	Kagoshima	Sakurajima	2 mm	<1		Kamo, 1993
16/04/91	Colima, México	Colima	< 5 mm	Varios		Bull. Global Vol. (1991, v16, n4)
15/06/91	Manila Sagley Pt. Cubi Pt. Clark Basa Legaspi Pt. Princesa	Pinatubo	0.5-1 cm 0.5-1 cm 15-20 cm 15-20 cm 15-20 cm traza traza	Varios		Casadevall
Ago-Dic, 1991	Argentina: Pto. Deseado y Stanley, Islas Flakland	Hudson	Variable		Principal problema, ceniza en el aeroespacio	Manzanares, 1991
24/10/91	Medan	Lokon	Sin ceniza	Varios	Ceniza en aeroespacio	Pardyanto, 1991.
06/06/92	Kagoshima	Sakurajima	<1 mm	1		Kamo, 1993
18/08/92	Anchorage	Spurr	<5 mm	3		AVO, 1993
18/04/93	Argentina: Salta, Jujuy y Cordoba	Lascar	Varios	Varios	Ceniza en Asunción	Pequeño, 1993.
07/06/93	Pasto	Galeras	Traza	<1	NOTAM a las 12:15pm	Bull. Global. Vol (v.18, n5)
30/07/97	Cd. de México	Popocaté- petl	Traza	< 1	Ceniza en pistas	

8.4 MANEJO DE CENIZAS EN OTROS AEROPUERTOS DEL MUNDO

Debido a que la erupción del volcán Redoubt (1989-1990) en Alaska, fue muy bien documentada, se ha tomado del artículo de Thomas J. Casadevall los siguientes puntos como un caso típico del cual se pueden aprender varias lecciones.

8.4.1 Efectos en las operaciones aeroportuarias en la región de Anchorage y Kenai

Las nubes de ceniza del volcán Redoubt interrumpieron el funcionamiento de los tres más grandes aeropuertos que sirven en el área Anchorage. Debido a los diferentes tipos de aviación y servicios ofrecidos en cada aeropuerto, la severidad del impacto en el funcionamiento del aeropuerto por la actividad del Redoubt varió de aeropuerto a aeropuerto. Es importante recordar que no hubo ningún espesor significativo de ceniza caída en Anchorage durante las erupciones del Redoubt en 1989-1990, en contraste con la erupción del Mt. Spurr en 1953 que depositó de 3 a 6 mm de ceniza en Anchorage y causó que los aeropuertos de Anchorage y Elmendorf cerraran durante varios días (Juhle y Coulter, 1955).

Una lluvia ligera de ceniza cayó en Anchorage el 15 y 16 de diciembre de 1989 y el 28 de febrero de 1990; la ceniza cayó en un área al sur de Anchorage el 21 de febrero de 1990. Así, la ceniza no cayó en los aeropuertos, pues tendrían el mayor impacto sobre las operaciones de vuelo, pero esta flotó y contaminó el espacio aéreo de la Región de Información de Vuelo de Anchorage. El aeropuerto de Kenai, localizado en la Península de Kenai, 43 millas náuticas (80 km) al este del volcán Redoubt, estaba cerrado por caída de ceniza de la erupción del 8 de enero y permaneció cerrado durante varios días.

8.4.2 Campo Merrill, Anchorage

El Campo Merrill en Anchorage es operado por la Municipalidad de Anchorage y maneja la mayoría de la aviación general basada en tierra y el tráfico aéreo de fletes en el área del Anchorage. Un volumen más pequeño de tráfico privado y de fletes se maneja en Lake Hood, que es una instalación para hidroaviones y esquí, inspeccionada por el Aeropuerto Internacional de Anchorage. Aproximadamente 950 aviones tienen su base en el Campo Merrill y había unas 230,000 operaciones aéreas en este campo durante 1989 (B. Myers, Municipalidad de Anchorage, comunicación personal, 1990). Éstos incluyen a la vez aviones de ala fija y helicópteros que usan pistón o reactores de turbohélice. Otra suspensión temporal de algunos servicios durante mediados de diciembre incluyeron los servicios de renta aérea fletada a Beluga, 35 millas náuticas (65 km) al oeste de Anchorage. Aquí fue despreciable el impacto sobre las operaciones del Campo Merrill debido a las erupciones del Redoubt. La ceniza que cayó en el Campo Merrill y en Lake Hood molestaba principalmente a los operadores de aviones pequeños ya que tenían que cepillar la ceniza de las superficies de sus aviones. Muchos dueños evitaron el problema cubriendo sus aviones simplemente con cubiertas antes de que cayera la ceniza.

8.4.3 Base de la Fuerza Aérea en Elmendorf, Anchorage

La base de la Fuerza Aérea en Elmendorf, Anchorage, maneja una variedad de aviones militares que va desde los aviones de combate a reacción hasta los de carga y transporte de tropas y aviones de turbohélice. Los reportes de periódico (Anchorage Times 12/24/89) indican que durante diciembre la base aérea usó un avión turbohélice (C-12) para monitorear la actividad volcánica y el movimiento de la pluma, agregando aproximadamente 12 salidas en operaciones normales diarias. Éste avión sólo voló durante el día mediante Condiciones de Vuelo Visual (VFR) y suministró información de clima y reportes del piloto para las operaciones militares. Las operaciones del avión de combate a reacción fueron limitadas durante el 15 y 16 de diciembre y 12 salidas fueron canceladas. Durante diciembre, aproximadamente se desviaron 90 vuelos militares de carga a Fairbanks o a la Base Aérea de la Guardia Nacional en el Aeropuerto Internacional de Anchorage (AIA). Se cancelaron aproximadamente 45 vuelos militares de avión de turbohélice en diciembre de 1989 debido a la actividad volcánica.

8.4.4 Aeropuerto Internacional de Anchorage

El Aeropuerto Internacional de Anchorage es la principal instalación aeroportuaria en Alaska. Desde el advenimiento del avión de pasajeros con motor a reacción hace más de 30 años, Anchorage ha llegado a ser una parada importante para recargar combustible y cambiar tripulaciones en las rutas aéreas transpolares del gran-círculo entre América del Norte y Europa con el Oriente. Además, hay un uso creciente de Anchorage como un depósito de carga aérea y como un destino para el tráfico turístico internacional, sobre todo en los meses de verano. AIA es operado por el Departamento de Transporte e Instalaciones Públicas del Estado de Alaska y maneja la mayoría del tráfico aéreo doméstico e internacional del Estado, incluyendo las operaciones de pasajeros y carga. En 1989, el aeropuerto de Anchorage daba servicio a 26 aerolíneas, incluyendo 14 internacionales y 12 domésticas.

En diciembre de 1989 y en enero de 1990, los aviones de pasajeros y los operadores de carga aérea disminuyeron significativamente su funcionamiento debido a las erupciones de volcán Redoubt. Sus efectos incluyeron la cancelación de vuelos, cambios de rutas de vuelo, pérdida de rentabilidad por cuotas de aterrizaje, recorte de tarifas, de tarifas de carga de combustible y cuotas por el uso del área de aduanas de los Estados Unidos, y pérdida de cuotas por concesión para tiendas libres de impuestos y servicios de restaurante. El total de desembarcos internacionales y domésticos en el AIA en diciembre de 1989 estaban por debajo aproximadamente 10% comparado con diciembre de 1988. La pérdida de rédito resultante a partir de las operaciones recortadas en el Aeropuerto Internacional de Anchorage durante varios meses después de la erupción, fue estimada en aproximadamente \$2.6 millones de dólares (K. Burdette, Aeropuerto Internacional de Anchorage, comunicación personal, 1990).

8.4.5 Información del Observatorio Vulcanológico de Alaska

El monitoreo de la actividad de los volcanes de Alaska es responsabilidad del Observatorio Vulcanológico de Alaska (AVO), establecido en 1988 como un programa cooperativo del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), del Instituto Geofísico de la Universidad de Alaska-Fairbanks y de la División Alaska del Servicio Geológico y Geofísico en Fairbanks. La oficina en Anchorage de AVO es el componente principal de AVO que actúa recíprocamente con agencias de aviación. Esto facilita las comunicaciones con el FAA, con el Centro Regional de Mando de Tráfico Aéreo (ARTCC), con el Servicio Nacional del Clima (NWS), con el Consejo de Seguridad de Transporte Nacional, así como con las 26 líneas aéreas que utilizan la AIA. En la región de Alaska, el NWS y FAA-ARTCC proporcionan oportunamente informes de clima y comunicación a los pilotos, considerando la actividad eruptiva. Durante la erupción, representantes de más de la mitad de las compañías transportistas, así como los miembros de las agencias Federales y de las comisiones del Congreso, frecuentemente visitaron la oficina de AVO en Anchorage para tener sesiones de información sobre la erupción y para ver qué información confiable podrían recibir de AVO. Este contacto directo entre la aviación interesada y los científicos de AVO fue importante para encuadrar la información de

comunicación a las necesidades de la comunidad de aviación, en términos del contenido de mensaje, idioma utilizado y frecuencia de actualización. Las discusiones con los despachadores de la aerolínea y las encuestas de investigación de las compañías indicaron que la comunicación oportuna de información verdadera sobre el estado del volcán Redoubt era el elemento más importante para definir una respuesta al aviador, respecto de las erupciones.

Para informar a las agencias gubernamentales, al público, y a la comunidad de aviación, fueron desarrollados cuatro tipos de información sobre el estado del volcán Redoubt por el Observatorio Vulcanológico de Alaska durante la actividad de 1989-1990. Esta información se envió directamente a la FAA, al NWS, y a los oficiales del Aeropuerto Internacional de Anchorage y de la base aérea de Elmendorf. Inmediatamente después de comenzar la actividad en diciembre de 1989, el AVO empezó a emitir una declaración impresa, con la actualización de la actividad del volcán, la cual fue emitida una o más veces por día y donde se describe el estado del volcán, sus erupciones, actividad sísmica y los eventos volcánicos relacionados con flujos de lodo y avenidas de agua. En enero de 1990, se proyectó un Mapa de Trayectorias de Pluma donde se muestra cómo una nube de ceniza podría ir durante las próximas 24 h, el cual fue incluido con la actualización de la actividad del Volcán (Murray et al., 1991). Estos mapas se produjeron en AVO utilizando datos de predicción de vientos proporcionados por el Servicio Nacional del Clima. En febrero de 1990, AVO complementó la actualización con un Código de Colores para indicar el nivel de inquietud basado principalmente en la actividad sísmica y en observaciones de campo. El sistema de Código de Colores fue introducido para describir más fielmente el estado del volcán cuando una erupción estaba en marcha o cuando estaba a punto de ocurrir (AVO, 1990; Brantley, 1990). El código usó cuatro colores que fueron verde (volcán en reposo o dormido = nivel bajo de inquietud), luego amarillo, posteriormente naranja, y al último rojo (erupción en progreso = nivel alto de inquietud) para representar la inquietud o preocupación sobre el comportamiento del volcán.

Se publicaron la actualización de la actividad del volcán, el Mapa de Trayectorias de Plumas y el Código de Colores regularmente cada mañana durante la erupción. Podrían emitirse cambios en esta información a cualquier hora durante las 24 horas del día, dependiendo de la actividad del volcán. Una vez que una erupción era identificada, la nueva información se emitía como una Notificación de Alerta de Evento y era comunicada inmediatamente por teléfono a la FAA, al NWS, a la Sección de Servicios de Emergencia de Alaska y a la Fuerza Aérea Norteamericana. Para apresurar la transmisión de la Notificación de Alerta de Evento, AVO, la FAA, y las compañías de transporte acordaban la siguiente breve declaración.

“Ésta es una notificación de erupción del Observatorio Vulcanológico de Alaska. Los datos sísmicos indican que una (Pequeña, Moderada, Grande) erupción del volcán Redoubt comenzó a las -AST (-Z) el - (fecha). El nivel del código de inquietud es rojo” .

El Aeropuerto Internacional de Anchorage y las aerolíneas normalmente recibieron información de AVO a través de la FAA y ARTCC. Simultáneamente, una revisión

actualizada fue enviada por facsímil telefónico a una amplia comunidad de usuarios. Para manejar la gran cantidad de llamadas telefónicas en la oficina de AVO-Anchorage, se establecieron “hot lines” con mensajes grabados. Los números de teléfono separados eran para los medios de comunicación y para la comunidad de aviación. Se pusieron al día los mensajes grabados en las “hot lines” con la situación del volcán cuando cambiaba. Las personas que llamaban para pedir información adicional dejaban un mensaje grabado que era contestado por miembros del personal de AVO cuando el tiempo y su trabajo se los permitía.

El Evento de Notificación de Alerta normalmente requería de todos los responsables de las aerolíneas para comenzar su contestación a una erupción. Cada uno trató de informar sobre el volcán de una manera diferente. Algunos vuelos cambiaron de ruta en el aire; otros usaron sus propios datos de viento-velocidad para calcular trayectorias de la pluma y alteraron su curso de acuerdo con ello; otras compañías con vuelos en los límites de Alaska cargaron combustible extra para anticiparse a la posible desviación y otros más confiaron en los directores de la FAA para recibir sus consejos respecto de las acciones a seguir.

8.4.6 Procedimientos adoptados por las aerolíneas

Durante las erupciones de 1989-1990 en el volcán Redoubt, cada una de las 26 compañías de transporte en el Aeropuerto Internacional de Anchorage adoptaron procedimientos para tratar con la situación cambiante presentada por el volcán. Estos procedimientos fueron desde la cancelación de todas las operaciones de vuelo para períodos de varios días hasta varias semanas, al cambio de ruta del tráfico aéreo en el Gran-Círculo para hacer escalas en Fairbanks y Vancouver, Canadá, para cambiar las rutas y volar por encima del espacio aéreo ruso y evitar el área de riesgo. Los vuelos domésticos con base en Alaska, tales como Aerolíneas de Alaska, Reeve Aleutian, y Markair continuaron operando en sus horarios normales, sólo con cambios menores. Las compañías con base fuera de Alaska y servicio menos frecuente, fueron más conservadoras. Ellas, normalmente evitaron el espacio aéreo de Anchorage hasta que estuvieran bastante seguros de que el volcán no presentaría ningún problema.

Como la actividad del Redoubt continuó hasta 1990, los procedimientos de operación de la aerolínea evolucionaron en respuesta a un mejor entendimiento sobre el volcán, al mejor monitoreo del volcán y a la mejor comunicación de información sobre las erupciones. Los cambios de procedimiento normalmente comenzaron mediante reuniones abiertas entre representantes de las aerolíneas, de las agencias de operaciones aéreas (AIA, FAA, NWS, USAF) y científicos del AVO.

Desde los comienzos de la actividad a mediados de diciembre de 1989 y hasta febrero de 1990, el flujo de información hacia las compañías aéreas sobre el volcán siguió un protocolo normal. Típicamente, la oficina del Observatorio Vulcanológico de Alaska en Anchorage proporcionaba la notificación de la erupción a la FAA (ARTCC) y al Servicio Nacional del Clima (NWS) en Anchorage. Esta información fue retransmitida por estas agencias a las líneas aéreas a través de los

procedimientos del NOTAM (Aviso a Aviadores) y SIGMET (Evento Meteorológico Significativo) (ver Servicios de Clima para Aviación, 1985). Sin embargo, como los NOTAMs requirieron la aprobación previa antes de la emisión, se retardaron en llegar al usuario hasta por más de 90 minutos. Las líneas aéreas estuvieron inconformes con esta pérdida de tiempo en la información en las regiones ya mencionadas para esta asesoría, por lo que ya en diciembre, ellos comenzaron a desarrollar sus propias vías de acceso para tratar con el problema de la ceniza volcánica (Haeseker, 1991). Compañías individuales tales como Alaska Airlines y Markair establecieron esquemas de rastreo confiando en las actualizaciones de AVO y en las notificaciones telefónicas de AVO a través de la FAA. Siguiendo la notificación del evento, varias aerolíneas desarrollaron métodos para rastrear el movimiento de las nubes de ceniza utilizando la información sus propios pilotos (PIREPS) más la de otras compañías. Estos procedimientos ganaron popularidad con las líneas aéreas y para el 2 de marzo de 1990 las compañías aéreas y la AIA formalizaron este sistema como un respaldo a los procedimientos normales de FAA-NWS. Dos compañías, Markair representando a las líneas aéreas domésticas y Japan Airlines representando a las internacionales, fueron elegidas por el consejo de operadores del AIA para tomar la responsabilidad de informar a las otras compañías sobre la actividad del volcán Redoubt.

8.4.7 Aerolíneas de Alaska

En diciembre de 1989, Aerolíneas de Alaska, con la mayor frecuencia de operaciones en el Aeropuerto Internacional de Anchorage, operó aproximadamente 48 vuelos de pasajeros por día, o aproximadamente el 20% del total de vuelos domésticos. Con las erupciones del 15 y 16 de diciembre, Aerolíneas de Alaska, y todas las demás compañías cancelaron temporalmente todos sus servicios en el AIA. Para el 17 de diciembre, Aerolíneas de Alaska evaluó su situación de cancelación de vuelos y determinó si podrían reasumirlos con poco o ningún riesgo. Para el 19 de diciembre, esta aerolínea había reanudado su horario normal (Haeseker, 1991).

Los oficiales de Aerolíneas de Alaska indicaron que su descontento con la información disponible para el funcionamiento aérea los llevó establecer su propio sistema de sentido común por tratar con el problema de la ceniza volcánica. Primero, ellos encontraron que los datos de predicción de vientos eran ocasionalmente incorrectos con respecto a la dirección y velocidad. Así, para sus propósitos, proyectando el movimiento de la nube de ceniza con base en los datos de viento no eran suficientemente confiables. Segundo, ellos fueron escépticos respecto de los NOTAMs y SIG-METs sobre la actividad volcánica ya que esta información no tenía fecha y a menudo permanecía "en el sistema" hasta por 36 horas, luego de que un evento volcánico había terminado. Tercero, ellos llegaron a vacilar en aceptar informes de los pilotos, recibidos a través de los cauces normales de la FAA, ya que esto no se hacía de una manera uniforme. Cuando la erupción ocurrió desde mediados de diciembre a principios de enero, era claro que para un piloto era una "erupción mayor" y para otro era una "nube de vapor".

Para aclarar esta situación, las Aerolíneas de Alaska desarrollaron su propio sistema basado en el concepto de “equipo en su sitio” (Haeseker, 1991). Los elementos clave que hicieron del sistema un éxito en Alaska Airlines fueron: 1) comunicaciones verbales claras y directas entre el personal de operaciones de vuelo en Anchorage; 2) informes directos de los pilotos de Aerolíneas de Alaska en el aire; 3) reuniones cuidadosas con las tripulaciones aéreas recién llegadas y con las que iban a iniciar el vuelo. Este procedimiento normalmente comenzó con la información actualizada recibida del AVO, respecto de la actividad diaria del Redoubt. Antes del 2 de marzo, esta actualización llegó normalmente de AVO vía la FAA, y después de esta fecha, también llegó de AVO, pero vía el AIA. Las preguntas respecto de la actividad fueron normalmente resueltas mediante una llamada telefónica de las Aerolíneas de Alaska a las oficinas de AVO en Anchorage. Los materiales visuales en el Centro de Operaciones de las Aerolíneas de Alaska en Anchorage, incluyeron una carta aeronáutica de la región, resaltando de forma prominente las rutas aéreas y la posición de la nube de ceniza y su movimiento esperado. La compañía desplegó datos de velocidad de viento y se discutieron los informes de sus pilotos por personal de operaciones de vuelo, incluyendo a las tripulaciones y despachadores.

8.4.8 Sistema Ordenador del Transporte

En respuesta a la necesidad de diseminar más rápido la información entre las líneas aéreas en el Aeropuerto Internacional de Anchorage, el Sistema Ordenador del Transporte entró en vigor el 2 de marzo de 1990. El propósito de este sistema era asegurar la diseminación rápida de información relativa al volcán a todas las líneas aéreas que operan en el Aeropuerto Internacional de Anchorage. El inicio de este sistema comenzó con una notificación inicial de evento por el Observatorio Vulcanológico de Alaska, la FAA, o el Servicio Nacional del Clima al AIA, el cual a su vez notificó a dos representantes de compañías en el AIA, que a su vez notificaron a cada una de las compañías de transporte en el aeropuerto de Anchorage. El Sistema Ordenador del Transporte era similar en muchos aspectos al “equipo en su sitio” desarrollado por Aerolíneas de Alaska y era confiado para rastrear visualmente la nube de ceniza volcánica a través de los reportes de los pilotos. Sin embargo, en contraste con el sistema de Alaska Airlines, la información recogida por el sistema ordenador fue compilada por Markair y Japan Airlines en informes concisos que fueron enviados inmediatamente por teletipo a las otras compañías y demás interesados de aviación utilizando el sistema de comunicación SITA (Sociedad Internacional de Telecomunicación Aeronáutica). El informe también fue a los destinatarios seleccionados en la Red de Telecomunicación Aeronáutica Fija (AFTN), un sistema de comunicación mundial manejado por la Organización Internacional de Aviación Civil para comunicación entre las instalaciones de control del tráfico aéreo, incluyendo a las instalaciones militares de los Estados Unidos. El sistema ordenador continuó en operación hasta que la nube de ceniza se movió más allá del área de tráfico aéreo o cuando el contenido de ceniza de la nube disminuyó de tal manera que el rastreo visual ya no era posible. En la práctica esto significó un periodo de vigilancia de aproximadamente cuatro a seis horas, durante las cuales se podrían emitir unos 10 mensajes sobre la actividad.

8.4.9 Discusión y Recomendaciones Recomendaciones como resultado de la actividad del volcán Redoubt

Debido a una única combinación de rutas aéreas ocupadas, proximidad a un aeropuerto internacional grande y a un extenso periodo de actividad eruptiva, las agencias de aviación en Anchorage desarrollaron una gama de esquemas de respuesta durante las erupciones de volcán Redoubt en 1989-1990. Éstos señalaron serias limitaciones en la manera de monitorear los volcanes; modos en que las nubes de ceniza son detectadas y rastreadas; maneras en que la información crucial es comunicada y finalmente las formas en que los pilotos manejan esta información cuando su avión se encuentra dentro de una nube de ceniza. Muchas de las limitaciones, problemas técnicos y lecciones aprendidas en el volcán Redoubt fueron discutidos en un Simposio Internacional sobre Ceniza Volcánica y Seguridad de Aviación, realizado en Seattle, Washington en julio de 1991 (Casadevall, 1991).

8.4.10 Problemas Técnicos

Una vez que el volcán había hecho erupción, tres agencias se interesaron en encarar el desafío técnico a fin de dar una notificación exacta de las erupciones para propósitos de seguridad aérea. Éstas son: (1) verificación de que la nube eruptiva lleva ceniza, (2) determinación de altitud de los techos de las nubes de ceniza; y (3) predicción de trayectorias de las nubes de ceniza y sus proporciones.

Irónicamente, aunque la comprobación de que las nubes eruptivas llevan ceniza y la determinación de sus techos son problemas que han sido resueltos durante las erupciones de los últimos 25 años, estos métodos no estaban disponibles para aplicarse en el volcán Redoubt en 1989. Por ejemplo, durante las erupciones de 1965-1968 en este volcán, se obtuvieron alturas exactas de la nube eruptiva utilizando un sistema de radar para clima de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, localizado en Kenai (Wilson et al., 1966; Wilson y Forbes, 1969). Actualmente en Alaska no hay instalaciones que proporcionen servicios de radar para clima, del tipo y calidad anterior, como el de la instalación de Kenai. Análogamente, en el Monte Santa Helena en 1980 y 1982, el radar para clima de la FAA instalado en el aeropuerto de Portland se adaptó con éxito para definir las plumas eruptivas (Harris et al., 1981; Harris y Rose, 1983).

8.4.11 Techos de la nube de ceniza

Durante la actividad del Redoubt de 1989 a 1990, los informes de los pilotos fueron la fuente principal de información sobre la altitud máxima de los techos de las nubes de ceniza; éstos iban de los 40,000 a los 45,000 pies. Para varias erupciones del Redoubt, las imágenes de infrarrojo de un satélite militar con órbita polar registraron la temperatura mínima de los techos de la nube. Con este instrumento se suministró y previno que los datos del perfil temperatura-altitud de la atmósfera local podrían usarse para determinar la altitud del techo de la nube. Sin embargo, tales datos del satélite de infrarrojo estaban disponibles para sólo unas cuantas erupciones.

conviene aclarar que y el perfil temperatura-altitud para la atmósfera de Alaska, en tiempo invernal, típicamente incluye una inversión de temperatura a aproximadamente 37,000 pies, una altitud donde opera la mayor parte del tráfico aéreo con motor a reacción. La inversión de temperatura llevó a alguna ambigüedad en la determinación de techos de nube. Por ejemplo, el 8 de enero, la temperatura del techo de la columna eruptiva fue de -56 grados centígrados, que era equivalente a una altitud de 37,000 pies o 30,000 pies, dependiendo de si la nube eruptiva estaba arriba o abajo de la inversión en el perfil de temperatura-altitud. Independientemente, un avión de investigación voló brevemente debajo de la nube el 8 de enero después de la erupción y detectó los bordes de la nube a aproximadamente 37,500 pies utilizando un lidar a bordo. Sin embargo, como la nube de ceniza era tan densa, la señal del lidar no pudo penetrar y descubrir el techo máximo de la nube (Hobbs et al., 1991).

8.4.12 Ceniza en las nubes volcánicas

Durante las erupciones del volcán Redoubt en 1989 a 1990, el mal tiempo y la oscuridad a menudo evitaron la observación directa de las erupciones. En estas ocasiones se utilizaron las señales sísmicas de los sismómetros ubicados en el volcán para indicar cuándo estaba ocurriendo una erupción. Sin embargo, los registros sísmicos no permitieron a los científicos determinar si el evento sísmico había producido una nube de ceniza.

Los observadores de las nubes de ceniza, producidas durante las erupciones de mediados de diciembre y del 2, 8 y 16 de enero, informaron de la ocurrencia de relámpagos en estas nubes. La acumulación de carga eléctrica en las nubes de ceniza; es una característica común de muchas erupciones volcánicas, aunque se ha efectuado poca investigación respecto de estos fenómenos (Gilbert et al., 1991). El aumento de carga ocurre al parecer cuando las partículas chocan entre sí dentro de una nube eruptiva turbulenta. Combinando el monitoreo con la detección de relámpagos, ofrece la posibilidad de detectar nubes ricas en ceniza y distinguirlas de las emisiones simples de vapor, las cuales normalmente están libres de ceniza. En 1990, un sistema de detección de relámpagos operado en Alaska por la Oficina para el Manejo de Tierras para monitorear los incendios forestales, fue adaptado con éxito para el rastreo de las nubes de ceniza del volcán Redoubt.

8.4.13 Trayectorias de las nubes de ceniza

Es de gran importancia tanto para los servicios aéreos como para los municipales de tierra, incluyendo el transporte de superficie, hospitales, y medios militares, contar con un sistema de advertencia temprana de caída de la ceniza. Para predecir la trayectoria de la nube de ceniza, se desarrolló un procedimiento simple usando datos de pronóstico de vientos para las erupciones del Monte Santa Helena en 1980 (Smith, 1980; Miller et al., 1981), el cual se adaptó para usarse en el volcán Redoubt en 1990 (Murray et al., 1991). Las gráficas de predicción de trayectorias tienen la ventaja de que están disponibles antes de una erupción, sin embargo, ellas no proporcionan información sobre el contenido de ceniza de la nube ni de la

proporción que va dejando en su trayectoria. Los modelos de trayectoria de ceniza preparados por el Laboratorio de Recursos del Aire del NOAA para el volcán Redoubt que usó datos precisos de pronóstico de viento en el momento de las erupciones de diciembre, indicaron la posición y tiempo cuando la nube pasó por encima del oeste de Estados Unidos y por el occidente de Texas (Heffter et al., 1990).

Las imágenes de satélite, sobre todo las de las plataformas geoestacionarias, se han utilizado para rastrear las nubes de ceniza y para medir su proporción de movimiento horizontal (Hanstrum y Watson, 1983; Malingreau y Kaswanda, 1986; Sawada, 1987, 1989). Sin embargo, aún es difícil distinguir entre nubes de ceniza y de vapor de agua usando imágenes de satélite convencionales (Sawada, 1989). Un problema adicional para la región de Alaska es que sólo están disponibles satélites de órbita polar para vigilancia.

8.4.14 Comunicaciones

Las nubes de ceniza pueden viajar lejos de su fuente y a menudo por encima de límites internacionales, es esencial tener comunicación rápida entre las Regiones de Información de Vuelo, respecto de los riesgos volcánicos. La nube eruptiva del 15 de diciembre de 1989 del volcán Redoubt flotó por encima del este de Alaska, por el oeste de Canadá y finalmente se disipó por encima del oeste y sur-central de los Estados Unidos y norte de México (Heffter et al., 1990; Schnetzler et al., 1994-este volumen), viajando a través del espacio aéreo de tres países diferentes y en al menos cinco diferentes Regiones de Información de Vuelo.

Tres fuentes esenciales de información sobre la actividad volcánica y nubes de ceniza incluyen observaciones de tierra para alertar y verificar de una erupción; de los pilotos a través de sus informes sobre la actividad eruptiva y las nubes de ceniza; y de las observaciones de satélite para descubrir y rastrear nubes de ceniza. Ninguna fuente individual de información es completamente confiable, por lo que la retroalimentación entre las tres es esencial para una comunicación más completa y exacta. Para la aviación de tierra o la que está en ruta hacia una nube de ceniza potencialmente riesgosa, las comunicaciones entre los controladores de tráfico aéreo, los despachadores de vuelo y los pilotos, normalmente llevan a una estrategia de evasión exitosa de la nube, que significará llevar combustible adicional o la planeación de rutas alternas para evitar el espacio aéreo contaminado.

8.4.15 Reportes de Pilotos

El tráfico aéreo tiene una tradición de confiar en los reportes del piloto (PIREPS) para indicar la naturaleza de las condiciones encontradas por ellos mientras vuelan. Éstos, usualmente son confiables para los fenómenos de tiempo que normalmente están ocurriendo, pero han demostrado ser menos fiables para la actividad infrecuentemente observada como las erupciones volcánicas. Una forma de reporte utilizada cuando una erupción volcánica es descubierta o se sospecha de ella, fue

desarrollada (Fox, 1988) para asegurar que las tripulaciones aéreas hicieran reportes uniformes de los eventos volcánicos precisos y completos considerando la ubicación, tiempo y naturaleza del mismo. Frecuentemente, un piloto que sale de una área de Anchorage cubierta por una nube, podría pasar a través de las nubes en un cielo claro y luminoso, ver la quietud, la pluma de vapor libre de ceniza en el volcán Redoubt e informar al ARTCC de Anchorage que él estaba viendo una nube eruptiva con ceniza. Estos informes fueron ampliamente supervisados por otros pilotos y aerolíneas y frecuentemente dieron como resultado una ola de llamadas telefónicas a AVO-Anchorage para solicitar la verificación de los reportes de los pilotos. Típicamente, estos informes fueron de la pluma de vapor persistente.

8.4.16 NOTAMs y SIGMETs

NOTAMs (Aviso a los Aviadores) y SIGMETs (Información Meteorológica Significativa) son las dos formas comunes de reportes rápidos emitidos por el FAA y el Servicio Nacional del Clima a los pilotos. Son numerosas las reglas y tradiciones que gobiernan la preparación y emisión de estos informes (Servicios de Clima para la Aviación, 1985). Como los informes del piloto, estos reportes generalmente son confiables para proporcionar información respecto de los fenómenos climáticos que están ocurriendo. Sin embargo, tienen varias limitaciones cuando se aplican a eventos volcánicos que son a menudo efímeros y donde el tiempo es crítico. Primero, la emisión de SIGMETs normalmente requiere la aprobación en Washington DC, seguido por la autorización del Centro Nacional del Clima en la ciudad de Kansas. Normalmente esta aprobación y la emisión ocurre dentro de la primera media hora de preparación inicial del informe por el Centro del Vuelo local. Segundo, los informes frecuentemente omiten el tiempo del evento observado y el tiempo del informe del piloto sobre un evento. Como las erupciones volcánicas son a menudo eventos efímeros que duran de unos pocos minutos a varias horas, y como las nubes de ceniza normalmente se dispersan rápidamente desde su origen, es importante para los usuarios de estos informes conocer la historia de tiempo de tal información. En el volcán Redoubt, se emitieron NOTAMs que estuvieron activos por más de 36 horas después de una erupción ocurrida. Como los NOTAMs llevaban una declaración alarmante sobre los riesgos potenciales de la ceniza, las compañías que supieron de estos informes fueron perdiendo gradualmente la confianza de tales reportes (Haeseker, 1991).

Cada NOTAM y SIGMET deben claramente establecer el tiempo en que ocurrió el evento o en que se informó, como fue recomendado por la norma de procedimientos para reportes (Servicios del Clima de Aviación, 1985). Esta información permitiría a los pilotos y otros usuarios evaluar las condiciones y tomar decisiones independientes respecto de las condiciones de vuelo, lo cual es el intento de tales notificaciones (Servicios del Clima de Aviación, 1985).

8.4.17 Educación y Conocimiento

No hay ninguna manera completamente segura de volar a través de una nube de ceniza sin dañar un avión. La única manera de garantizar la seguridad del avión es

evitarla. Puesto que no pueden detectarse las nubes de ceniza utilizando la generación actual de radares aerotransportados, las comunicaciones inmediatas al piloto sobre una amenaza volcánica potencial son esenciales para evitar su encuentro con éxito. Evitar una nube de ceniza puede ser difícil o incluso imposible para un avión en vuelo, especialmente por la noche. Como semejante encuentro casi seguro producirá algún daño al avión, dependiendo del contenido de ceniza de la nube y de la duración del encuentro, existen procedimientos que las tripulaciones deben ejecutar para reducir y minimizar el daño de semejante encuentro (Campbell, 1991b). Estos pasos incluyen la reducción en la potencia de las turbinas y virar el avión en 180 grados para escapar la nube de ceniza. Tales acciones requieren que los pilotos estén bien informados sobre la naturaleza de las nubes de ceniza y que estén bien entrenados de antemano sobre los procedimientos recomendados para minimizar el daño. Para aviones aún en tierra o en ruta hacia una nube de ceniza potencialmente riesgosa, la comunicación entre controladores, despachadores y pilotos, normalmente pueden llevar a una estrategia para evitar el encuentro con éxito.

8.4.18 Nubes de ceniza con trayectorias lejanas

Los encuentros en el oeste de Texas el 17 de diciembre de 1989 indicaron que las nubes de ceniza con trayectorias lejanas también pueden amenazar la seguridad de un avión. Por tanto, las pautas siguientes deben seguirse si el piloto, despachador o controlador de vuelo creen que la ceniza volcánica podría ser encontrada.

- Si una nube de ceniza es visible a un piloto, debe evitarse la entrada en dicha nube.
- Como la visibilidad requiere luz del día, una extensión de esta regla debe ser que si los informes del piloto, los NOTAMs y SIGMETS, y el análisis de imágenes de satélite y/o predicción de trayectorias de nubes de ceniza indican que ésta podría estar presente en un espacio aéreo, éste último debe ser evitado hasta que pueda ser determinado y estar seguro de poder entrar.

8.5 CONCLUSIONES

8.5.1 En aeropuertos:

- Para espesores pequeños de ceniza, el problema principal es la alteración de los itinerarios normales de vuelos. No hay daños permanentes si las aeronaves se mantienen inmóviles y los equipos apagados.

En aerovías:

- No hay ninguna manera completamente segura de volar a través de una nube de ceniza sin dañar el avión. La única manera de garantizar la seguridad del avión es evitar la nube de ceniza.

- Es indispensable conocer los siguientes datos:
 - Verificar que la nube lleva ceniza.
 - Determinar la altitud de los techos de nubes de ceniza.
 - Predecir la trayectoria de las nubes de ceniza y sus proporciones.
- Es importante contar con un sistema rápido de información verdadera y oportuna entre; el centro de monitoreo volcánico, los sistemas de rastreo de las nubes de ceniza y los pilotos de aviones.
- Bastaron menos de 5 minutos dentro de una nube de ceniza fina, que se encontraba a 280 Km del volcán, para que un Boeing 747-200 sufriera daños que requirieron del reemplazo de los 4 motores y muchas componentes y equipos.

8.6 RECOMENDACIONES

En cualquiera de los aeropuertos designados, Texcoco o Tizayuca:

- Establecer un enlace de alta velocidad para datos, voz y video, entre el centro de monitoreo volcánico (CENAPRED) y las autoridades aeroportuarias para la oportuna y adecuada información en caso de que el Popocatépetl o alguno de los volcanes monitoreados por el CENAPRED, presente nubes de ceniza.

Aclaración:

La siguiente información ha sido traducida de algunos artículos, reportes o boletines sobre incidentes de encuentros de ceniza volcánica en otros lugares del mundo. Los artículos se mencionan en la bibliografía.

8.7 BIBLIOGRAFÍA

Bernard, A., and W.I. Rose, Jr., 1990. The injection of sulfuric acid aerosols in the stratosphere by El Chichón Volcano and its related hazards to the international air traffic: Natural Hazards, v. 3, pp. 59-67

Blong, R. J., 1984. Volcanic Hazards, a source book on the effect of eruptions: Academic Press, p. 424.

Brantley, S.R. (ed), 1990. The eruption of Redoubt Volcano, Alaska, December 14, 1989-August 31, 1990: U. S. Geological Survey Circular 1061. p. 33.

Casadevall, T. J. (ed), 1991. The first International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety, Programs and Abstracts: U. S. Geological Survey Circular 1065, p. 58.

Casadevall, T. J., 1994. The 1989-1990 Eruptions of Redoubt Volcano, Alaska: impacts on aircraft operations: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. v. 62 (1-4), pp. 301-316.

Fox, T., 1983. Global airways volcano watch is steadily expanding: *ICAO Bulletin*, April pp. 21-23.

McClelland, L., T. Simkin, M. Summers, E. Nielsen, and T. C. Stein, 1989. *Global Volcanism 1975-1985*: Prentice-Hall Inc., p. 655.

PVOT (Pinatubo Volcano Observatory Team), 1991. Lessons from a major eruption: Mt. Pinatubo, Philippines: *Eos*, v. 72, pp. 545, 552-553, 555.

Rogers, J.T., 1984. Results of El Chichón: Premature acrylic window crazing: *Boeing Airliner* (April-June), pp. 19-25.

Rogers, J.T., 1985. Results of El Chichón-part II: Premature acrylic window crazing status report: *Boeing Airliner* (April-June), pp. 1-5.

Rose, W. I., 1987. Interaction of aircraft and explosive eruption clouds: A volcanologist perspective: *Aerospace Industries Association of America Journal*, v. 25, pp. 52-58.

Smith, W. S., 1983. High-altitude conk out: *Natural History*, v. 92, no. 11, pp. 26-34.

Steenblik, J. W., 1990, Volcanic ash: a rain of terra: *Air Line Pilot*, June/July 1990. pp. 9-15, 56.

Tanaka, M., and N. Hamada, 1991. The eruption cloud of Mt. Pinatubo observed by Geostationary Meteorological Satellite: (abs) *Programme and Abstracts*, *Volcanological Society of Japan*, no. 2, p. 159.

Tootell, B., 1985. All 4 engines have failed: the true and triumphant story of flight BA 009 and the Jakarta incident, *Hutchinson Group Ltd.*, Auckland, p. 178.

Wright, T. L. and T. C. Pierson, 1992. *Living With Volcanoes- The U. S. Geological Survey's Volcano Hazard Program*: U. S. Geological Survey Circular 1073, p. 57.

9. DETECCIÓN Y SEGUIMIENTO DE NUBES DE CENIZA

Enrique Guevara Ortíz, Roberto Quaas Weppen, Carlos Valdés González y Servando de la Cruz Reyna

El sistema de monitoreo del volcán Popocatepetl, en particular el del monitoreo sísmico, permite en primera instancia, detectar señales relacionadas con emisión de cenizas causadas por exhalaciones o por explosiones. Cuando las condiciones atmosféricas permiten tener visibilidad hacia el volcán con las cámaras de video, se confirma la salida de material e inmediatamente se procede a informar al SENEAM las características iniciales de la emisión: hora de inicio, altura estimada y dirección inicial, además de dar un seguimiento del evento.

Por su parte el SENEAM da aviso al CENAPRED de los informes de las aeronaves que sobrevuelan la zona, confirmando la altitud y dirección de la nube de ceniza.

Los datos que proporciona el Servicio Meteorológico Nacional sobre la dirección y velocidad del viento, son útiles para en un momento dado prever la caída de ceniza en ciudades y aeropuertos.

9.1 EMPLEO DE SATÉLITES PARA DETECCIÓN DE CENIZAS VOLCÁNICAS

Con el lanzamiento de nuevos satélites y los nuevos desarrollos en las técnicas de percepción remota, actualmente se han ampliado las posibilidades de monitorear a los volcanes usando los satélites. Otra técnica es el uso de radares hidrometeorológicos también para detectar y dar seguimiento a emisiones de ceniza. Estas nuevas técnicas complementan en forma importante a los sistemas de monitoreo.

En el caso de los satélites, los sensores detectan la energía electromagnética que es absorbida, reflejada, radiada o dispersada por la superficie del volcán o por el material expulsado en una erupción.

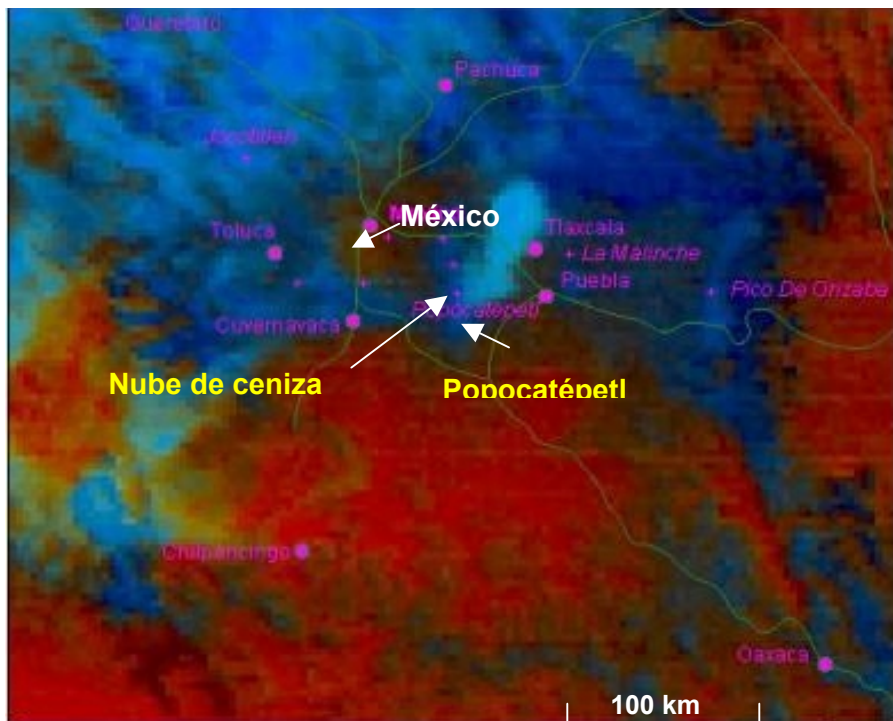
Existe una variedad de sensores que miden diferentes longitudes de onda o bandas, inclusive más allá del espectro visual, como son ondas ultra-violetas e infrarrojas. Las cenizas volcánicas son detectadas por sensores visibles e infrarrojos lo que permite tener información no sólo en el día, sino también durante la noche. Además, la banda de infrarrojo nos proporciona datos de la temperatura de la pluma de ceniza, que relacionada con información de las radiosondas de los satélites, puede ser usada para estimar la altitud de la pluma. Los datos en el infrarrojo sirven también para determinar anomalías térmicas en el sitio de la erupción, con ciertas restricciones y limitaciones. Para diferenciar las emisiones de

ceniza de fenómenos meteorológicos se emplean diferentes técnicas que mezclan dos bandas o una diferencia de ellas. Los datos del espectro ultravioleta también pueden ser usados para determinar la presencia de aerosoles que incluyen ceniza volcánica y bióxido de azufre.

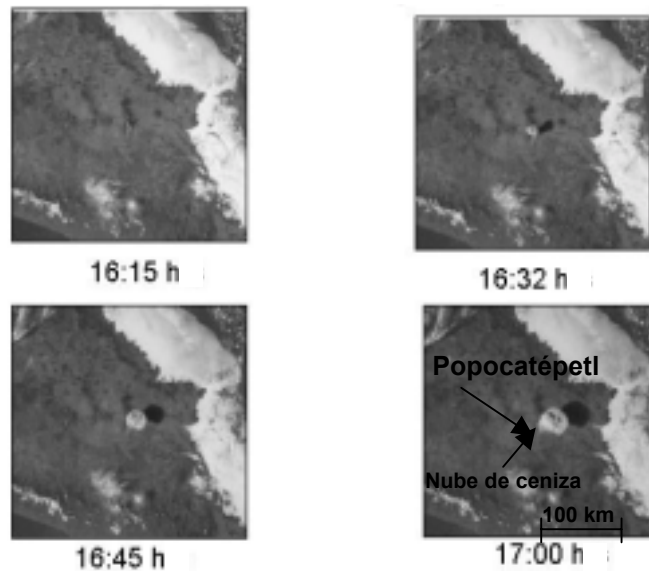
Para dar seguimiento a las emisiones del volcán Popocatépetl, se tienen disponibles a través de Internet, una serie de imágenes ya procesadas de diferentes satélites, que ha permitido, en la mayoría de los casos, dar seguimiento de las emisiones de ceniza.

Entre éstas, se encuentran disponibles las imágenes de los satélites geoestacionarios NOAA GOES 8 y GOES 10 procesadas en la Universidad de Hawai por investigadores del Instituto de Geofísica y Planetología, las cuales son actualizadas cada 15 minutos. Esto permite una observación casi en tiempo real de puntos calientes y el movimiento de las nubes cuando las condiciones atmosféricas así lo permiten. (<http://hotspot.pgd.hawaii.edu/goes/popocatepetl/latest.shtml>)

En las siguientes figuras se muestran algunas de las imágenes de satélite obtenidas cuando el volcán ha presentado alguna actividad.



Exhalación del 12 de diciembre de 2000 a las 16:01. Imagen del satélite GOES (infrarroja) con la nube de ceniza



Dispersión de la nube de ceniza producida por el volcán Popocatépetl el día 22 de enero de 2001. Imágenes del satélite GOES, U. de Hawaii

En forma complementaria a los satélites geoestacionarios existen dos satélites conocidos como de Observación Infrarroja con Televisión Avanzada, que continuamente circulan la tierra, obteniendo datos en promedio cada 6 h. Estos satélites llevan a bordo un radiómetro avanzado de muy alta resolución (AVHRR), que de igual forma a los geoestacionarios permiten detectar las nubes volcánicas y distinguirlas de la meteorológicas utilizando la técnica de substracción de bandas de las imágenes de infrarrojo térmico.

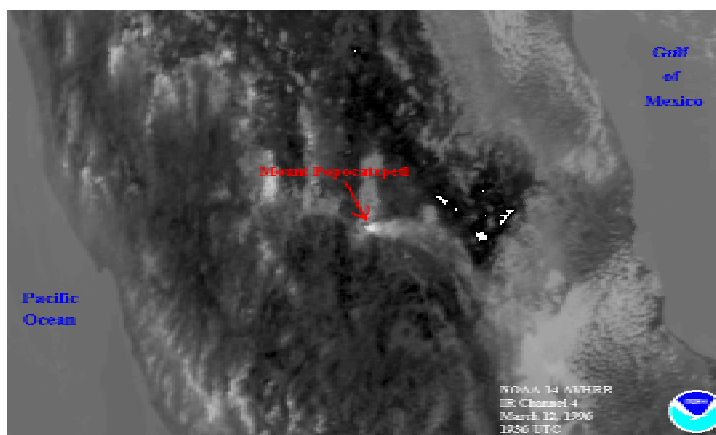


Imagen AVHRR infrarroja de la actividad del Volcán Popocatépetl del de 12 de marzo de 1996

La información recolectada de las imágenes de satélite son utilizadas para dar aviso y alertar a las aeronaves. Esto se realiza a través de nueve Centros Asesores de Ceniza Volcánica (VAAC's) alrededor del mundo: Anchorage, Buenos Aires, Darwin, Londres, Montreal, Tokio, Toulouse, Washington DC y Wellington. Estos centros tienen la tarea de monitorear las plumas de ceniza volcánica dentro del espacio aéreo asignado a cada uno y emitir los comunicados correspondientes (VAAS) cuando ocurre algún evento.

Para el caso de México y del volcán Popocatépetl le corresponde al Centro de Washington, DC, en los Estados Unidos. La información relacionada con las emisiones del volcán Popocatépetl se encuentran disponibles a través de su página en Internet. Tienen a disposición las últimas imágenes de los satélites GOES en las bandas visible e infrarroja así como los últimos avisos de alertamiento (<http://hpsd1en.www.noaa.gov/VAAC/popo.html>)

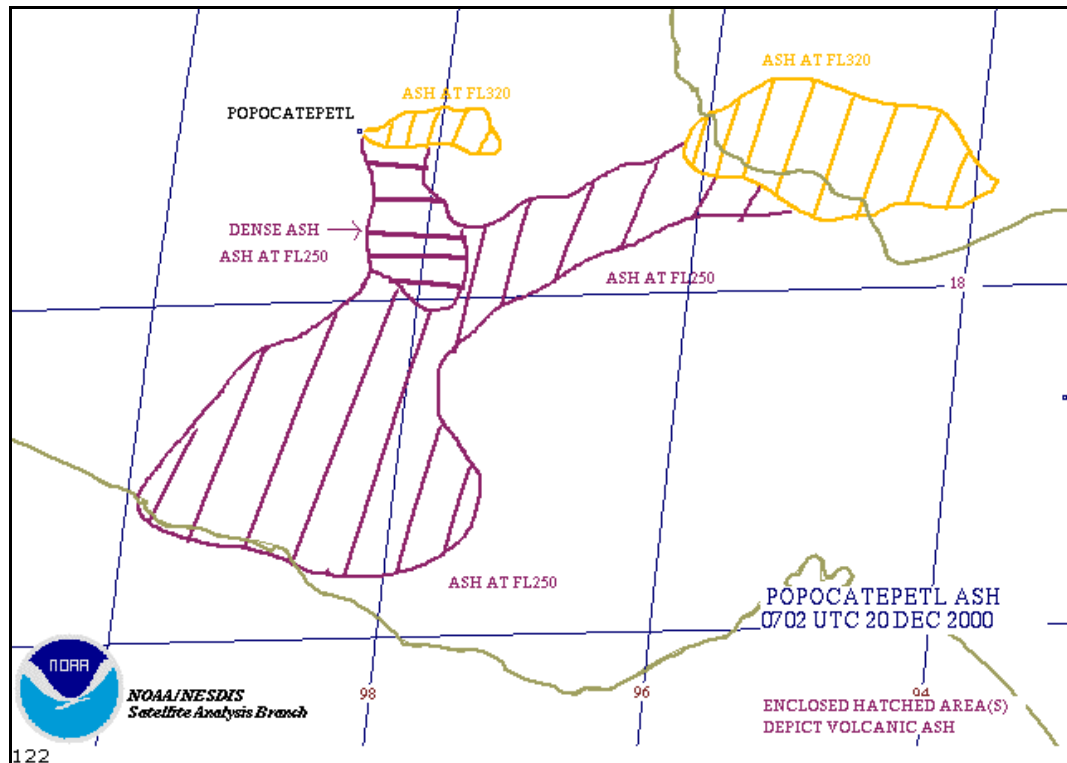


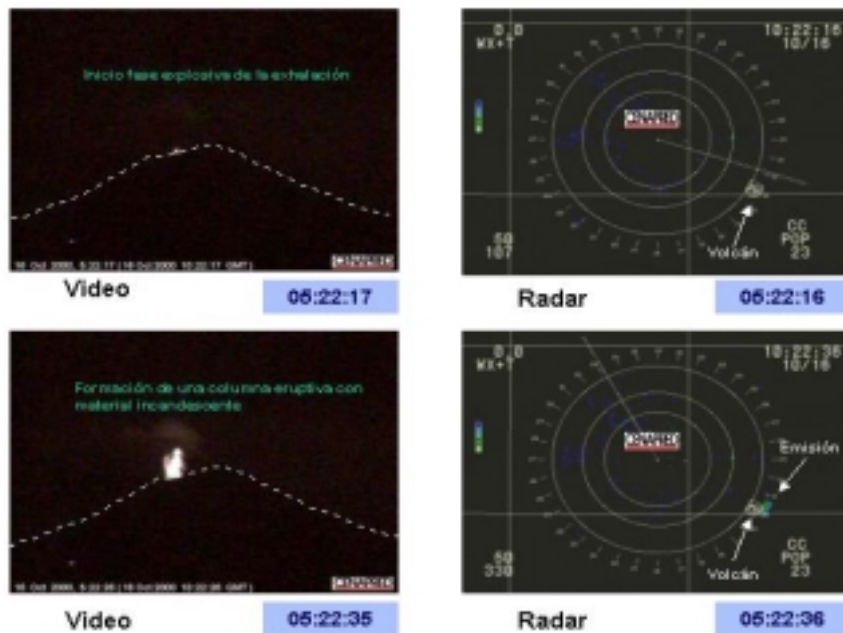
Figura de la presencia de la nube de cenizas del 20 de diciembre de 2000 reportada por el VAAC de Washington

9.2 EJEMPLO DE RADARES HIDROMETEOROLÓGICOS PARA DETECCIÓN DE CENIZAS

El radar es una manera muy especial de usar señales de radio y su principio consiste en la transmisión de un pulso de una señal de radio, transformación del pulso en un haz enfocado con gran precisión y la recepción de los reflejos que regresan de los blancos con los que el haz tuvo contacto. Para el radar meteorológico, el blanco usado es la precipitación – gotas de lluvia, granizo, copos de nieve, entre otros-, aunque también sirven para la localización de ceniza volcánica, así como para su seguimiento.

El CENAPRED contó hasta noviembre de 2000 con un radar Doppler ubicado en sus instalaciones que permitía detectar emisiones de ceniza o material expulsado por el volcán aún cuando no se tuviera confirmación visual. Dicho radar fue donado por el Servicio Geológico Norteamericano (USGS) y se instaló en 1997. La mayoría de las veces fue posible detectar estas emisiones, convirtiéndose así en una importante herramienta para el alertamiento a las autoridades de aeronavegación. A continuación se muestran imágenes del radar durante la exhalación del 16 de octubre del 2000.

Exhalación del 16 de octubre de 2000 a las 05:20 hrs **CENAPRED**



Exhalación del 16 de octubre de 2000 y cómo fue detectada por el radar meteorológico del CENAPRED



Explosión del 17 de diciembre de 1998 y la imagen de radar correspondiente

9.3 DETECCIÓN Y ALERTAMIENTO DE CENIZAS EN AEROPUERTOS

El aeropuerto internacional de Kagoshima, en Japón, se encuentra muy cerca del volcán Sakurajima. La actividad del volcán es cuidadosamente monitoreada y el aeropuerto es informado continuamente sobre la situación volcánica. Los Drs. Jennie Gilbert y Steve Lane, han trabajado en el desarrollo de sistemas con técnicas electrostáticas, para medir y detectar nubes de ceniza volcánica. Ellos se basan en el principio de que, como las tormentas, las nubes volcánicas se encuentran fuertemente cargadas eléctricamente y que la perturbación del campo eléctrico de la atmósfera que generan, puede ser detectada. Estas perturbaciones del campo eléctrico atmosférico, pueden ser detectadas al medir el gradiente del potencial eléctrico, usando un medidor electrostático (JCI 121, medidor de campo electrostático). En el Sakurajima, se han instalado 12 de estos instrumentos.

9.4 CONCLUSIONES

Los sistema de monitoreo y vigilancia de volcanes, son una herramienta indispensable, que además de permitir conocer la actividad de un volcán, permiten detectar en forma oportuna emisiones importantes de ceniza. Para el caso del

monitoreo del volcán Popocatépetl se cuenta ya con un moderno sistema, aunque sería recomendable la instalación de más cámaras de video que permitieran hacer un seguimiento visual.

Como complemento a los sistemas de monitoreo, existen nuevas técnicas de percepción remota para dar seguimiento a las nubes de ceniza y alertar a las autoridades de aeronavegación y aeropuertos. Si bien estas técnicas son útiles, también presentan algunas desventajas, con el hecho de que en ocasiones es difícil distinguir las nubes atmosféricas de las nubes de cenizas volcánicas y además no se detectan bajas concentraciones.

Por otro lado el uso de los radares hidrometeorológicos, representan una nueva opción con una mejor resolución y un rastreo continuo de nubes de ceniza en casi cualquier condición de tiempo, sin embargo la inversión y los gastos de mantenimiento son muy altos. Desafortunadamente el CENAPRED ya no cuenta con esta herramienta debido a un desperfecto en la unidad. Es por tanto, necesario buscar los recursos o el financiamiento de un nuevo radar que permita su empleo para la detección, seguimiento y alertamiento de nubes de ceniza.

Finalmente se sugiere el instrumentar algunas medidas para detectar la presencia de ceniza en aeropuertos. Esto proveería de un elemento objetivo para la toma de decisiones.

10. EFECTOS DE LAS CENIZAS DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL EN LA AERONAVEGACIÓN

Hugo Delgado

Las erupciones volcánicas explosivas suelen inyectar ceniza y gases corrosivos en cantidades variables a la troposfera superior y a la estratosfera baja, que son desafortunadamente, las altitudes de operación del tráfico aéreo. En las últimas décadas, más de 60 aeronaves se han visto dañadas por nubes errantes de cenizas que han contaminado rutas aéreas e instalaciones aeroportuarias (Casadevall, 1991). Las plumas pasivas (compuestas fundamentalmente de gas y cantidades menores de ceniza muy fina) no representan una amenaza significativa para la aviación, mientras que las columnas y nubes eruptivas deben ser evitadas.

Las nubes de cenizas poseen la mayor amenaza a la aviación. La mitigación de este tipo de amenazas es muy difícil debido a que estas nubes no pueden ser detectadas por radares convencionales ni visualmente desde un avión, menos aún durante la noche ya que pueden ser oscurecidas por nubes climáticas. Los encuentros de aeronaves con nubes errantes de cenizas han producido incidentes muy serios en los que las turbinas de aviones Boeing 747 principalmente, se han apagado totalmente debido a la fusión de cenizas dentro de las mismas, provocando el desplome de las aeronaves. Hasta el momento, en ningún incidente se han tenido pérdidas humanas, ya que en todos los casos se ha logrado recuperar el funcionamiento de las turbinas nuevamente (para mayores detalles ver capítulo 8).

El costo de reparaciones a las aeronaves ha llegado a alcanzar los 80 millones de dólares americanos (Casadevall, 1991) en incidentes que se han presentado durante las erupciones del Galunggung (Indonesia) en 1982 (Smith, 1983; Gourgaud et al., 1989), Redoubt (E.U.A.) en 1989-1990 (Casadevall, 1994) y Pinatubo (Filipinas) en 1991 (Casadevall et al., 1993).

Durante las erupciones del Monte Santa Helena (E.U.A.) en 1980, en el Monte Spurr (E.U.A.) en 1992, y en el volcán Láscar (Chile) por ejemplo, las operaciones aeroportuarias se vieron interrumpidas y numerosos vuelos se cancelaron, pero no sólo las operaciones aeroportuarias locales se vieron alteradas, sino además, otras regiones de los Estados Unidos, y aún, las de otros países se vieron afectadas (Casadevall, 1993).

Muchos aeropuertos del mundo de ciudades medianas y grandes operan cerca de volcanes activos. El aeropuerto de Kagoshima (Japón) se encuentra ubicado a poca distancia del volcán Sakurajima (el volcán más activo del Japón), de manera que durante las erupciones de este volcán, las operaciones aéreas son alteradas, pero

las medidas de seguridad han impedido que ningún incidente se haya verificado aún durante días de gran actividad del volcán.

Aeropuertos mexicanos como el de la ciudad de Puebla, guardan ciertas similitudes con el aeropuerto de Kagoshima, dada su cercanía a volcanes muy activos. Recientemente, con la erupción del volcán Popocatépetl, las operaciones aeroportuarias han tenido que revisar sus estrategias de prevención de accidentes, así como protocolos y actividades relacionadas con emergencias volcánicas.

Los encuentros mencionados de aeronaves con nubes de cenizas habían ocurrido en países tales como los Estados Unidos de América, Japón, Indonesia, Filipinas, etc. y en México comenzaron a ocurrir durante la presente erupción del volcán Popocatépetl, en especial a partir de 1996. Debido a las implicaciones que los encuentros con nubes de cenizas tienen en la seguridad aérea, se hace necesario revisar y analizar algunos incidentes para los cuales existe documentación.

Este trabajo pretende revisar de manera general los efectos de las nubes de cenizas en la aeronavegación y hacer un análisis de algunos de los eventos ocurridos en nuestro país durante la erupción del Popocatépetl.

Esta revisión se hace necesaria por el aumento en las incursiones de aviones en nubes de cenizas a escala global e incluso porque ha sido considerable el número de aeronaves afectadas por la erupción del Popocatépetl (aunque éstas pueden considerarse afectaciones menores en términos de seguridad aunque de alto costo económico). Esto se debe al creciente número de operaciones aéreas. Las afectaciones que las cenizas volcánicas tienen en las actividades aeronáuticas causan temor en las aerolíneas por las implicaciones que tendría un accidente fatal y por el alto costo que implica el desgaste de sus equipos.

No obstante, se hace necesario también guardar las proporciones debidas de los efectos de las cenizas volcánicas en la aeronavegación y no caer en exageraciones que pudiesen implicar gastos aún más cuantiosos de los reales. El análisis de los fenómenos y la reflexión de los eventos ocurridos pueden ayudar a dimensionar los problemas y sus soluciones.

10.1 EFECTOS DE LAS CENIZAS VOLCÁNICAS EN LA AERONAVEGACION

Las nubes de cenizas transportadas por el viento pueden viajar por grandes distancias. Sus efectos en la aeronavegación pueden ser en las aeronaves en vuelo o en las instalaciones aeroportuarias.

Las aeronaves en vuelo que cruzan nubes de cenizas están expuestas, en varias de sus partes, a la abrasión y fusión de las cenizas volcánicas. Particularmente vulnerables son los motores y turbinas, parabrisas, tomas de estática y pitot. Asimismo, los sistemas de comunicación, sensores de temperatura, sistemas de ventilación de combustible y de aire acondicionado.

Las nubes de cenizas afectan seriamente la aeronavegabilidad al ser cruzadas por horas, al extenderse por miles de kilómetros se vuelven indetectables para la instrumentación y a simple vista semejan una nube meteorológica. Cuando las cenizas permanecen por muchas horas dentro de una turbina pueden ser fundidas y taponar los ductos de combustible y aire disminuyendo el funcionamiento de las mismas e incluso detenerlas (Figura 1). Sin embargo, aún cuando las turbinas no lleguen a detenerse, éstas pueden llegar a ser dañadas de manera severa por abrasión, haciéndose necesario su reemplazo. Debido a la estática que producen las cenizas, las comunicaciones se ven afectadas y su presencia en los sensores de temperatura impide el buen funcionamiento instrumental y la toma de decisiones durante el vuelo.

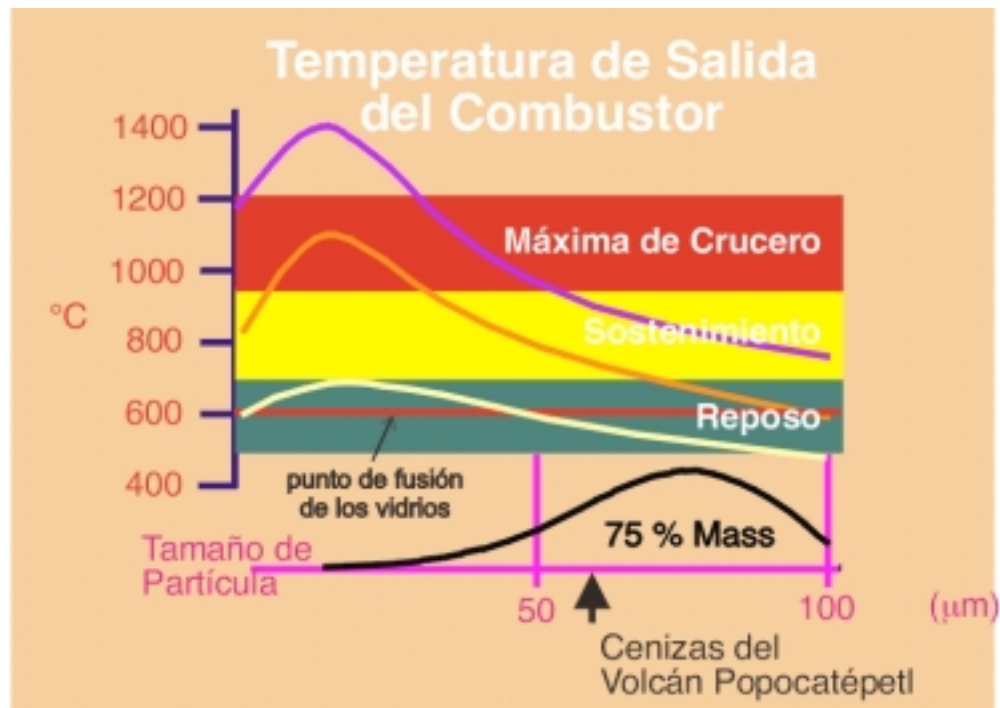


Figura 1. La mayor parte de las cenizas volcánicas se funden a más de 600°C, aunque la temperatura de fusión de los diferentes componentes de las cenizas (fragmentos diminutos de minerales, roca y vidrio) varía de acuerdo a su composición, así como del tamaño de la partícula. En esta figura se muestra que las cenizas finas ($\leq 50 \mu\text{m}$), que representan comúnmente menos del 25 % de la masa, son las más propensas a fundirse a las temperaturas de operación de una turbina. Las turbinas en operación de crucero trabajan normalmente a 1000°C o más, temperatura que está por encima de la temperatura de fusión de los componentes de las cenizas volcánicas. (Modificada de Boeing, 1992).

Las cenizas transportadas por el viento caen eventualmente a la superficie terrestre, cubriendo áreas de infraestructura importantes como los aeropuertos. Siendo las instalaciones aeroportuarias extensiones considerables relativamente, debido a las áreas de rodaje y despegue, los efectos de las cenizas precipitadas durante un evento de lluvia de piroclastos, puede ocasionar daños a las aeronaves y a las instalaciones aeroportuarias, tales como las instalaciones de instrumentos de apoyo a la navegación (radares) o a zonas no protegidas como las áreas de electrónica y cómputo.

Estos efectos pueden ser función de la contaminación de las pistas, calles de rodaje, plataformas, franjas de seguridad, señalamientos, etc. La presencia de cenizas hace que el coeficiente de fricción de las pistas cambie, puede contaminar las tomas de los hidrantes de los combustibles y afectar los bancos de luces, entre otros. Además, se puede llegar a tener afectación de instalaciones estratégicas tales como plantas de emergencia y subestaciones eléctricas, plantas de almacenamiento de combustibles y sus hidrantes, el sistema de radioayuda y en general, los sistemas de comunicaciones y electrónicos.

El cubrimiento y/o sepultamiento de estructuras y edificios puede provocar el colapso de techos de casas y edificios, y destruir líneas de transmisión eléctrica y comunicaciones. La carga que representa una capa de tefra de 10 cm de espesor puede variar entre 40-70 kg/m² (tefras secas) y 100-125 kg/m² (tefras húmedas)(Tilling, 1993). Por esta razón, techos de lámina, techos planos o techos no contruidos para soportar este tipo de cargas, son propensos a colapsarse durante erupciones volcánicas mayores.

Estas afectaciones se dan en el caso de erupciones volcánicas de gran magnitud que producen grandes columnas de cenizas que son transportadas eficientemente por los vientos dominantes para formar una gran nube de cenizas. Aún cuando no todas las erupciones volcánicas son de gran magnitud, es importante observar las mismas precauciones en las erupciones de menor magnitud, en especial cuando las instalaciones aeroportuarias están demasiado cerca de los volcanes (menos de 100 kilómetros), ya que estos casos son más frecuentes que el de las grandes erupciones y, aunque la densidad de estas nubes de ceniza es menor, los efectos pueden presentarse con un impacto importante en el largo plazo por los altos costos de mantenimiento que provocan.

Si bien pocas cenizas volcánicas ingeridas por las turbinas de las aeronaves en vuelo no representan un peligro para la vida humana, pueden tener efectos importantes de carácter económico al acelerar el desgaste de las partes internas de las turbinas. Una mayor cantidad de cenizas, o bien, una permanencia prolongada dentro de una nube de cenizas, pueden ocasionar que las turbinas se detengan y provocar el desplome de una aeronave, constituyendo de esta manera una amenaza para la vida de sus ocupantes, así como de la población en el terreno.

Los efectos de las cenizas en la aeronavegación son una de las motivaciones importantes para reconocer las zonas volcánicas, pues los efectos de las cenizas tienen un impacto económico muy importante y su estudio permite prever las áreas donde con mayor frecuencia se moverían las nubes de cenizas.

10.2 NUBES DE CENIZAS DEL POPOCATEPETL E IMPLICACION PARA LA AERONAVEGACION

Cuando las nubes de cenizas se encuentran cerca de su fuente, es decir, cerca de los volcanes que les dan origen, es fácil distinguirlas (Fotografía 1). Sin embargo, al alejarse de su fuente, y particularmente, a varias decenas, cientos o miles de kilómetros, una nube de cenizas puede parecerse a una nube meteorológica debido a que los tamaños de las cenizas finas pueden ser de sólo algunos micrómetros. Son estas nubes de cenizas las que constituyen una amenaza importante para las aeronaves en vuelo pues no son detectables por los instrumentos convencionales de navegación (Fotografía 2).



Fotografía 1. Nube de cenizas del volcán Popocatépetl producida el 29 de diciembre de 1994. En este tipo de nubes de ceniza es fácil distinguir su fuente de origen.

Las columnas eruptivas del Popocatépetl han alcanzado altitudes máximas de más de 30 kilómetros, aunque las altitudes máximas fluctúan entre 6 y 15 kilómetros de altitud. Las nubes de cenizas resultantes se caracterizan por ser de moderada a pobremente densas. Es decir, poseen concentraciones bajas a moderadas de material piroclástico. Aún cuando no se tienen estimaciones de densidad, ésta se infiere por los casi imperceptibles (y de hecho difíciles de medir) espesores de cenizas en la vecindad del volcán (en poblaciones de entre 16 y 50 kilómetros de distancia al cráter del volcán).



Fotografía 2. Nube de cenizas del volcán Popocatépetl producida el 21 de marzo de 1997. Este tipo de nubes de ceniza se confunde con las nubes meteorológicas a más de 100 km del volcán.

El mayor componente de las nubes de cenizas, además del material fragmentado, son los gases volcánicos. El volcán Popocatépetl ha emitido cantidades muy importantes de gases a lo largo del periodo que se ha encontrado en erupción y ha sido posible medir tasas de emisión récord en el ámbito internacional. No obstante, los gases volcánicos tienen un efecto menor en la aeronavegación, prácticamente insignificante conforme la distancia aumenta a más de 10 kilómetros de distancia al cráter.

En general, el alcance horizontal de la lluvia de cenizas por nubes errantes, ha sido muy restringido. La mayoría de las precipitaciones de ceniza se llevan a cabo en los primeros 30 km alrededor del cráter. Adicionalmente, las lluvias de ceniza se han verificado en la ciudad de México (parte sur) y en la ciudad de Puebla, debido a los patrones de viento preferenciales en las direcciones noreste y este en noviembre a mayo y hacia el poniente y norponiente entre junio y octubre. Los aeropuertos Internacional de la Ciudad de México (a 60 km del cráter en línea recta) y de Puebla (a 50 km), han sufrido los efectos de caída de cenizas leves. Los aeropuertos de Cuernavaca y de Toluca han sufrido en menor grado o nada la lluvia de cenizas

10.3 LAS CENIZAS DEL POPOCATÉPETL

El tamaño promedio de las cenizas del volcán Popocatépetl a 50 km de distancia del cráter, es entre 50 y 100 μ m. El tamaño promedio de las cenizas a 4 km (y ocasionalmente a 20 km) del cráter es hasta de 400 μ m. Los tamaños y alcances varían con la magnitud del evento explosivo (para poder alcanzar niveles atmosféricos donde los vientos son más intensos) y con la intensidad del viento. Las cenizas están compuestas fundamentalmente de fragmentos de roca (líticos), vidrio, feldespatos, olivino y pómez (Figura 2).

10.4 EFECTOS DE LA ACTIVIDAD ERUPTIVA DEL POPOCATEPETL EN LA AERONAVEGACION

Durante la presente erupción del volcán Popocatépetl, ha habido varios eventos que han ocasionado trastornos en la aeronavegación de tres maneras: afectaciones a aeronaves en vuelo, a instalaciones aeronáuticas y a las operaciones aeronáuticas por falsas alarmas.

Ha habido varios encuentros de aeronaves con nubes de cenizas en diversas ocasiones y sólo se referirán a continuación algunos de ellos.

Entre el 1o. y 15 de mayo de 1997 cuando menos 17 aeronaves en vuelo fueron afectadas directamente por nubes de cenizas del volcán Popocatépetl. Los aviones afectados provenían de Mérida, Villahermosa, Veracruz, Cancún y Guatemala, cruzando por la zona entre los volcanes Popocatépetl e Iztaccíhuatl a distancias menores de 20 millas náuticas, entre 5000 y 7000 metros de altitud en trayectoria descendente y preparándose para aterrizar.

Las razones por las que se dieron estos encuentros son: la falta de visibilidad (todos los encuentros se llevaron a cabo de noche y bajo condiciones de nubosidad y lluvia), el trazo de la aerovía procedente del oriente del país (de la zona del Golfo de México) que pasa cerca de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatépetl y falta de coordinación (entonces) entre las autoridades de aeronavegación y el observatorio volcánico del CENAPRED.

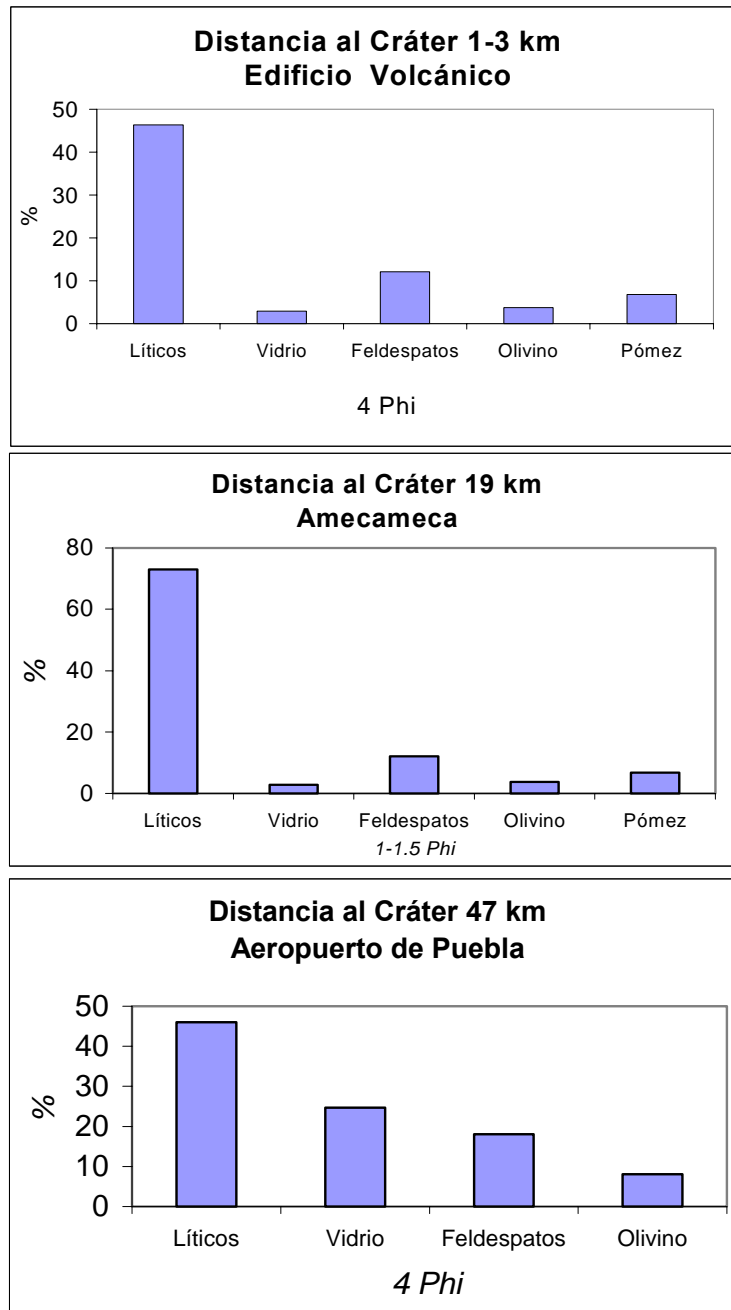


Figura 2. Composición modal de las cenizas. La figura de arriba muestra la composición de fragmentos que componen las cenizas del volcán Popocatepetl en sus cercanías para la fracción 4ϕ (.0625 mm de diámetro). La figura de en medio muestra lo mismo para la fracción 1.5ϕ (0.25 mm) a 20 km del volcán, mientras que la figura de abajo muestra las cenizas de tamaño 4ϕ a 50 km de distancia del cráter.

Las afectaciones más importantes fueron abrasión de partes diversas de las turbinas y destrucción parcial o total de los parabrisas por abrasión debida a las cenizas volcánicas. Todos los parabrisas (en pares), excepto en un sólo caso tuvieron que ser reemplazados debido a que los rasguños y fracturas producidos por el impacto de las cenizas, dificultaban o impedían ver a través de ellos (Figura 3; Fotografías 3 y 4).

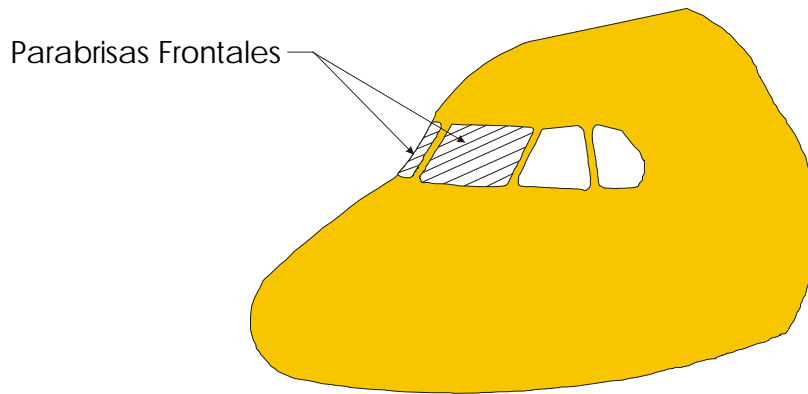
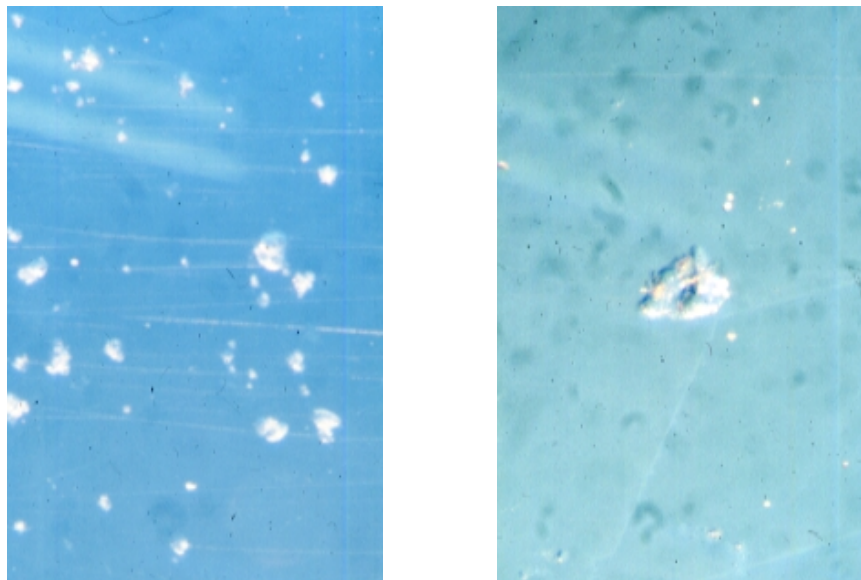


Figura 3. Posición de los parabrisas afectados de las aeronaves que cruzaron por una nube de cenizas el 11 de mayo de 1997, reduciendo la visibilidad fuertemente.



Fotografías 3 y 4. La fotografía 3 (izquierda) muestra un parabrisas afectado por la abrasión producida por cenizas volcánicas observado al microscópico. Las líneas que se observan son rasguños producidos por la abrasión de las cenizas, mientras que las manchas blancas son fracturas. La fotografía 4 (derecha) muestra un detalle de las fracturas conchoideas producidas por el impacto de las cenizas sobre la superficie del parabrisas.

La erupción del volcán el 31 de julio de 1997 emitió cenizas en mayor abundancia, que fueron dispersadas hacia el noroeste del volcán hacia la ciudad de México. El Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México recibió por primera vez cenizas en sus instalaciones (pistas y edificios), obligando a cerrar por cerca de 8 horas sus instalaciones con las consecuentes afectaciones en el retraso de vuelos, desviación de aeronaves, saturación de los aeropuertos alternos, indemnización a viajeros, afectación de sus agendas, etc., además de las dificultades para limpiar las instalaciones del aeropuerto y pistas de rodaje que requirieron de un ejército de barrenderos para remover las cenizas.

Finalmente, ha habido ocasiones en que se han alterado las operaciones aeronáuticas debido a reportes de presencia de cenizas en la región provenientes del VAAC de Washington. En estas ocasiones, los reportes visuales de los pilotos o desde el observatorio del CENAPRED, no han confirmado la presencia de cenizas, por lo que se ha procedido a seguir las indicaciones del VAAC. Los reportes emitidos por el VAAC de Washington se basan primordialmente en imágenes obtenidas por los satélites. En esa perspectiva, es posible confundir una nube de baja concentración de cenizas, rica en gases volcánicos o en partículas de sílice coloidal, con una nube de cenizas que puede tener un efecto importante en la aeronavegación. En este tipo de casos, la prevención puede ocasionar también pérdidas económicas por el desvío de aeronaves e incluso el cierre del aeropuerto. Para evitar esto, es necesario mejorar los sistemas de observación y monitoreo de las nubes de cenizas volcánicas.

10.6 REFLEXIONES SOBRE LOS ENCUENTROS

La amenaza a las instalaciones aeroportuarias cercanas al volcán Popocatepetl poseen la particularidad de que cuentan con muy poco tiempo de respuesta una vez que se confirma un evento explosivo. Si una nube de cenizas es dispersada por vientos de 30 nudos, la distancia a la Ciudad de México será cubierta en cerca de una hora, mientras que a Puebla llegará en cerca de 40 minutos.

Es importante mencionar que las incursiones en nubes de cenizas volcánicas por parte de las aeronaves mencionadas no tuvieron paro de turbinas debido a los tamaños de las cenizas volcánicas a la distancia en que cruzaron la pluma, por las temperaturas de las turbinas durante el proceso de acercamiento al aeropuerto (menores a 1000°C), que no son eficientes para provocar la fusión de las cenizas (ver Figura 1). Además, el tiempo de exposición a los efectos de las cenizas (alrededor de 2 minutos) no fue suficiente para que los efectos fueran de mayor consideración. Las aeronaves que se desplomaron en el Pacífico, mencionadas en la introducción, permanecieron en exposición continua a las cenizas por mucho más de media hora.

Finalmente, una consideración fundamental acerca de la aeronavegación en la región de la Cuenca de México, aún en tiempos en los tiempos previos a la erupción del volcán Popocatepetl, es que los suelos de la región son derivados de rocas volcánicas y contienen viejas cenizas volcánicas. Durante las temporadas de

tolvaneras, el polvo (cenizas, entre otras partículas) flota en el ambiente, de la misma manera que dentro de una nube de cenizas. Esta es una de las razones por las que el desgaste de los equipos es mayor en la Ciudad de México.

10.7 CONCLUSIONES

Las operaciones aeronáuticas se han incrementado a escala global, por ello, ha aumentado la vulnerabilidad de las operaciones aeronáuticas ante la presencia de nubes de cenizas producidas por diversos volcanes. Los efectos de las cenizas en las aeronaves en vuelo pueden ocasionar el desplome de los equipos (en los casos más severos), o bien, un daño a las diferentes partes de los aviones. Las instalaciones aeroportuarias pueden ser afectadas fuertemente en pistas, instalaciones estratégicas, sistemas de comunicación, electrónicos y cómputo.

Las columnas eruptivas del Popocatépetl han alcanzado más de 20 km en forma extraordinaria y las nubes de cenizas que originan al ser transportadas por el viento se han caracterizado por una baja concentración de partículas y una alta concentración de gases. La lluvia de cenizas se concentra principalmente en los primeros 30 km alrededor del volcán y ocasionalmente llegan a más de 50 km, precipitándose en instalaciones aeroportuarias. En promedio, las cenizas volcánicas tienen tamaños entre 50 y 100 μ m a 50 km del volcán y de 400 μ m a distancias entre 4 y 20 km (dependiendo de la explosividad del evento). Las cenizas se componen principalmente de fragmentos de roca, vidrio, feldespatos, olivino y pómez.

Las operaciones aeronáuticas en México se han visto afectadas por las nubes de ceniza del volcán Popocatépetl de tres maneras: afectaciones a las aeronaves en vuelo, a instalaciones aeronáuticas y a las operaciones aeronáuticas por falsas alarmas. Los encuentros de las aeronaves con nubes de cenizas han ocasionado daños a partes diversas, en particular a los parabrisas, pero no han producido fusión de cenizas. Las falsas alarmas se deben a limitaciones en las metodologías para la detección de nubes de cenizas.

Si bien las operaciones aeronáuticas en el valle de México se caracteriza por la presencia de materiales volcánicos permanentemente, durante los eventos explosivos del Popocatépetl se ha observado que las nubes de cenizas implican una amenaza importante debido a la cercanía de las instalaciones aeroportuarias a la fuente eruptiva. La vulnerabilidad del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México es función de esta distancia pues incluso eventos explosivos de baja magnitud (que son más frecuentes y probables que los eventos de gran magnitud) lo pueden afectar pues las cenizas llegarían en una hora o dos, con vientos entre 30 y 15 nudos.

10.8 PERSPECTIVAS FUTURAS

Las instalaciones aeroportuarias deben estar a distancias mayores a 50 km del volcán y preferentemente en una dirección norte o sur, que son las direcciones con menor incidencia de vientos altos (aunque de mayor incidencia de vientos bajos).

Para evaluar mejor los efectos de la actividad eruptiva, es necesario estudiar mejor los casos de encuentros de aeronaves en el espacio aéreo mexicano con las nubes de cenizas. Para ello, es necesario una mayor colaboración de las compañías aéreas.

Asimismo, es importante llevar a cabo estudios que permitan limitar mejor las temperaturas de fusión de las cenizas del Popocatepetl en las condiciones cercanas a las operaciones aéreas y de esta manera reconocer los posibles efectos en las aeronaves.

Finalmente, se considera fundamental invertir en estudios que permitan mejorar e implementar la detección temprana de nubes de cenizas volcánicas, dados los tiempos tan limitados de reacción y activación de planes de emergencia. Esto es porque los satélites actuales reportan información cada 6 horas en el caso de AVHRR y cada 15 minutos en el caso de GOES. En el primer caso, los tiempos de renovación de imágenes excede el tiempo de llegada de nubes de ceniza en condiciones de baja intensidad de vientos (5 horas con vientos de 5 nudos). En el caso de las imágenes GOES es que no tienen la resolución para diferenciar una nube meteorológica de una nube de cenizas (excepto en condiciones favorables de tiempo) y tampoco tiene resolución para diferenciar una nube de cenizas de una nube de gases y bajo contenido de cenizas, razón por la que existe la posibilidad de crearse falsas alarmas. Una de las limitaciones más grandes de estos sensores remotos es que no es posible distinguir las nubes de cenizas en condiciones nocturnas y alta nubosidad durante la época de lluvias y huracanes que abarcan al menos 5 meses al año. Por otra parte, los radares hidrometeorológicos no son capaces de distinguir entre granizo, gotas de lluvia y de ceniza, lo cual dificulta su uso en condiciones nocturnas, de alta nubosidad y presencia de lluvia. Particularmente, son difíciles de aportar información una vez que la nube de cenizas se aleja de la fuente de emisión.

Los estudios requeridos deben estar dirigidos a la aplicación de técnicas que usen instrumentos LIDAR y radares diseñados específicamente para la detección de cenizas, usados conjuntamente con perfiladores de vientos. Los costos de estos recursos tecnológicos es alto, pero la relación costo-beneficio es favorable para hacer la inversión si se toman en cuenta los altos costos de la afectación a aeronaves y instalaciones aeronáuticas, sobre todo, si tomamos en cuenta que su uso permitiría evitar la pérdida de vidas humanas.

BIBLIOGRAFIA

Boeing, 1992, Volcanic Ash Avoidance: Flight Crew Briefing, Customer and training flight operations support.

Casadevall T.J., 1991, Volcanic Hazards and Aviation Safety, FAA Aviation Safety Journal, Volume 2, Number 3, pp. 1-11.

Casadevall T.J., 1993, Volcanic Ash and Airports, Discussions and Recommendations from the Workshop on Impacts of Volcanic Ash on Airport Facilities, Seattle, Washington, 52 pp.

Casadevall T.J., 1994, The 1989-1990 eruption of Redoubt Volcano, Alaska: impacts on aircraft operations, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 62, pp. 301-316.

Casadevall T.J. De los Reyes P. y Schneider D.J., in press, The 1991 Pinatubo eruptions and their impacts on aircraft operations, in Punongbayan, R. and Newhall, C. G., eds., The 1991 Eruption of Pinatubo Volcano, Philippines, U.S. Geological Survey Professional Paper.

Gourgaud A., Camus G., Gerbe M.-C., Morel J.-M., Sudradjat A. y Vicent P.M., 1989, Eruption of Galunggung (Indonesia): A Case Study of Volcanic Hazards with Particular Relevance to Air Navigation, en: Volcanic Hazards, J. H. Latter (Ed.), pp. 151-162.

Smith W. S., 1983, High altitude conk out, Natural History, 92, 11, pp. 26-34.

Swanson S. E. and J. E. Beget, 1994, Melting properties of volcanic ash, USGS Bulletin, n. 2047, pp. 87-92.

11. ALGUNAS RECOMENDACIONES BASADAS EN EXPERIENCIAS DE OTROS AEROPUERTOS

Carlos Valdés González y Esteban Ramos Jiménez

11.1 RECOMENDACIONES

11.1.1 Evaluar técnicas específicas de mitigación

Las técnicas usadas para limpiar una plataforma de un aeropuerto no son las mismas para limpiar un transmisor. Las técnicas usadas para mantener unas computadoras en línea y trabajando, son probablemente las mismas, que se usarían para mantener un receptor VHF operando. De modo que es necesario planear estas estrategias específicas y darse cuenta que la combinación de las estrategias nos dará resultado.

11.1.1 Evaluar experiencias previas

Es importante estar abiertos a nuevas estrategias, sugerencias y recomendaciones, así como crear una biblioteca de información y documentación. Esto permitirá dialogar en formas efectivas así como atacar el problema de la contaminación por ceniza con respecto a sistemas de comunicación electrónica y de generación de electricidad.

11.2 PLAN DE CONTINGENCIAS POR CENIZA EN UN AEROPUERTO

11.2.1 Seguridad en Aeropuertos

La mayoría de los trabajadores en un aeropuerto tienen una credencial de identificación electrónica que les permite moverse dentro del aeropuerto. Estos sistemas son eléctrica o electro-magnéticamente activados. Si hay caída de ceniza y se producen cortes en la energía eléctrica, es muy probable que la gran mayoría de las chapas y cerraduras electrónicas no funcionen o fallen.

Equipo necesario para el personal del aeropuerto

- Es importante planear y tener el equipo adecuado a la mano para la mitigación de los problemas por ceniza. Los equipos necesarios son: aspiradoras,, compresores de aire, cepillos, líquidos o compuestos para limpiar

especialmente componentes electrónicas, filtros especiales para los sistemas de aire, filtros en general. Todo este material debe estar disponible. Además, se debe poseer una capacidad robusta de mantenimiento.

- Es necesario tener disponible equipos extra y portátiles de aire acondicionado, generadores, y sistemas de comunicación operados por baterías. Se necesita tener al personal entrenado para el uso de estos equipos así como gente capacitada para arreglar sistemas de comunicación y de generación de electricidad.

11.2.2 Recomendaciones

Apagar equipos no esenciales

- Si no se necesita, apagarlo. La experiencia ha mostrado que los equipos eléctricos atraen las partículas de polvo fino. Esto es más crítico para ceniza volcánica, ya que a menudo está cargada electrostáticamente.

Cubrir los equipos

- Como hemos oído repetidamente, la ceniza se deposita en los equipos. Se puede prevenir el daño a los equipos, simplemente cubriéndolos, de modo que la ceniza no se deposite o entre en ellos. Cubriendo los equipos, se elimina gran parte del problema de la ceniza.

Planear con anticipación

- Es necesario identificar y dar prioridades para los equipos y recursos necesarios antes de que se manifieste una situación de emergencia. Necesitamos identificar y planear la estrategia de mitigación. Esto significa dar prioridad a la mitigación y las estrategias de limpieza.

11.2.3 Planes de trabajo

Con base en las recomendaciones de un grupo de investigadores y de autoridades aeroportuarias (53 participantes del grupo de trabajo “Volcanic Ash and Airports” , USGS, open file report), se definieron los siguientes grupos y las listas de puntos importantes para diferentes áreas de los aeropuertos, en respuesta a la ceniza volcánica.

Grupo de Trabajo I: **Superficies**

1. Planeación y Organización
 - Identificación de la cadena de comando
 - Establecimiento de un centro de control y de comunicaciones
 - Publicación sobre las propiedades físicas de la ceniza
 - Riesgos a la salud y ocupacionales por ceniza
 - Equipo disponible en el corto plazo
 - Personal disponible
 - Priorización de las áreas que requieren limpieza

- Personal y equipo disponibles en el largo plazo
 - Definición del problema: espesor, extensión, vientos y metas
 - Logística, alimentación, transporte.
2. Limpieza de las pistas primero; movimiento de aviones hacia y de la terminal
- Sacudir o limpiar ceniza (con acumulación menor a 5 milímetros)
 - Uso de barredoras mecánicas, mientras esté seca la ceniza
 - Acumulación (más de 5 milímetros)
 - i. Comenzar en la parte central de la pista
 - ii. Mojar la ceniza y acumularla en montículos o dunas
 - iii. Limpiar las superficies con mangueras de alta presión
 - Para el caso de ceniza seca; mojar la ceniza para controlarla, acumularla en montículos; cargarla y removerla.
 - Usar emulsiones para estabilizar las dunas, montículos y las entrepistas.
3. Mover la ceniza únicamente una vez
- Identificar el sitio final de acumulación (tiradero) de ceniza
 - Documentar el volumen, usarla como agregado en el futuro
 - Aprobar el sitio (tiradero) de acumulación
 - Cubrirlo con emulsión o con suelo; sembrarlo
 - Observar las reglas locales para el manejo y disposición de la ceniza.
4. Equipo
- Palas mecánicas
 - Camiones de volteo
 - Barredoras
 - Bobcats
 - Camiones cisterna
 - Mangueras de bomberos y bombas de alta presión
 - Rociadores de emulsiones
 - Equipo móvil de comunicación
 - Servicios móviles de: combustible, médicos, de alimentación y agua, sanitarios
 - Guantes, máscaras, lentes protectores, combustible, filtros de aire para vehículos, palas, escobas, y bolsas biodegradables.
5. Recomendaciones
- Conozca sus instalaciones
 - i. Pendiente de la pista
 - ii. Patrones de drenaje
 - iii. Cableados y ductos subterráneos
 - Planee; lleve a cabo simulacros de escritorio; replanee
 - Establezca una línea de autoridad fuerte
 - Capacidad de comunicación robusta
 - Identifique los tanques y depósitos de agua, volumen y calidad
 - Incluya las operaciones aeroportuarias en los simulacros de desastres regionales
 - Haga el manejo de ceniza parte de un plan establecido de emergencias
 - Esté dispuesto a cortar burocracia para actuar correctamente

- Documente la limpieza; designe a una persona responsable de la documentación y de las fotografías.
6. Investigue necesidades
- Aspiradoras y barredoras efectivas
 - Procedimientos para lodos
 - Productos emulsificantes
 - Propiedades ingenieriles y físicas de la ceniza, en forma resumida
 - Pruebas de fricción con ceniza en las pistas
 - Mejoramiento en el corto plazo del movimiento observable y predictivo de nubes de agua y de ceniza
 - Modelos predictivos de caída de ceniza
 - Bandas temporales de acarreo, como las usadas en las minas.

Grupo de Trabajo II: **Sistemas Electrónicos y de Comunicaciones**

1. Problemas principales
- Contaminación de componentes (la ceniza es corrosiva, abrasiva y conductora)
 - La abrasión daña las partes que se mueven o que rotan (discos, cabezas, interruptores)
 - Operación anómala de equipo
 - i. Daños en discos duros
 - ii. Caídas de sistemas
 - iii. Problemas con transientes y picos eléctricos.
2. Equipo
- Aspiradoras
 - Sistemas de aire comprimido
 - Cepillos, toallas para limpiar, etc.
 - Componentes o líquidos para limpiar
 - Plástico adherible, bolsas, cinta, etc.
 - Materiales extra consumibles
 - Generadores auxiliares
 - Equipo de comunicación operado por baterías
 - Capacidad de mantenimiento
 - i. Capacidad de un cuarto limpio (instalado o de rápida instalación)
 - ii. Aire acondicionado suplementario.
3. Personal
- Personal extra para limpieza general y mitigación
 - Técnicos electrónicos para limpieza/reparación de equipo
 - Personal adicional, entrenado para limpieza de subestaciones eléctricas, transformadores, etc.
4. Recomendaciones

- Principio general: equipo o sistemas no esenciales, deberán ser apagados y cubiertos con bolsas o plástico
- Planeación con anticipación, es vital
- Identificar los recursos necesarios
- Priorizar equipos o sistemas necesarios
- Pre-almacenar y localizar partes de repuesto y artículos para mitigación
- Identificar y planear la mejor combinación de técnicas de mitigación (dependiendo de las instalaciones, recursos y circunstancias).

Grupo de Trabajo III: **Servicios de Emergencia**

1. Problemas principales
 - Complacencia
 - Poco dinero
 - Equipo no adecuado
 - Personal inadecuado para labores de adiestramiento
 - Disposición final de la ceniza
 - Metodología para la remoción de la ceniza
 - Cuidado de los pasajeros
 - Cuidado del personal
 - Establecimiento de las prioridades
2. Personal y equipo
 - Equipo especial para remoción de ceniza
 - Operadores especiales de equipo
 - Recursos adecuados
 - Equipos de operación simple: palas, escobas, bolsas, mascarar
 - Seguridad del personal, equipo para el cuidado de la salud
 - Espacio para almacenamiento
 - Materiales varios, filtros, lentes de protección, etc.
 - Equipos auxiliares para la generación eléctrica.
3. Resumen
 - La ceniza no es lo mismo que lluvia o nieve
 - Evitar el exceso de agua
 - La ceniza pesa, moverla sólo una vez
 - El riesgo es real, planear anticipadamente y practicar
 - Inventariar sus necesidades – equipo y personal
 - Evaluar el riesgo de su área
 - Ser flexible
 - Si puede: apáguelo, ciérrelo y cúbralo
 - Evalúe los edificios y estructuras.
4. Recomendaciones
 - Agencia coordinadora por área / respuesta amplia a la actividad
 - Recursos competentes por parte de la Agencia de Federal de Transportes
 - Plan por ceniza; Plan escrito para cada aeropuerto
 - Evaluación local del riesgo o situación

- Reuniones para presentar innovaciones a los equipos o procedimientos
- Sistema de respaldo para la energía eléctrica
- Evaluación del riesgo
- Comunicaciones
- Información técnica actualizada
- Respuesta del personal al trabajo
- Demanda múltiple en vehículos de asistencia médica o de incendios
- Disponibilidad de electricidad.

Grupo de Trabajo IV: **Equipos de Apoyo para Operaciones en Tierra y Aviones**

1. Resumen

- Planear con anticipación
- Comunicación
- Operación de equipo para minimizar daños
- Mantenimiento y servicios más frecuentes
- Protección del personal y del equipo
- Limpiar, limpiar y limpiar.

2. Problemas

- Daño a partes móviles
- Falla de equipo
- Equipos de seguridad en riesgo
- Equipos no diseñados para la remoción de ceniza (remoción de nieve vs. remoción de ceniza)
- Accesorios y equipos: partes de repuesto, equipo protector y para limpiar

3. Recomendaciones

Caída inminente de ceniza

- Comunicaciones con respecto a la caída de ceniza (Alertamiento temprano, actualizaciones constantes de la situación)
- Precauciones contra la ceniza – donde comenzar

- Inventario de equipo – recolección de datos
 - i. Qué está trabajando
 - ii. Qué se tiene que cubrir
 - iii. Qué equipo es necesario – agua, aceite, filtros, cinta, plástico
- Mover los aviones fuera del área en riesgo, si es posible
- Colocar aviones en área de riesgo en hangares, si es posible
- Personal
 - i. Llamada automática al personal
 - ii. Comida y equipos para el personal
 - iii. Almacenamiento de equipo, priorizar el sitio, último adentro, primero afuera.

- iii. Contactos para contratar personal, equipos en renta y componentes
- iv. Designación de grupos de trabajo e indicaciones al personal
- Localización de almacenamiento de agua para reabastecimiento
- Equipos
 - i. Inventariar equipo protector
 - ii. Preparar paquetes de plástico adherible y cintas
- Mantenimiento
 - i. Envolver, cubrir y sellar todos los orificios de los aviones que permanecen en el área
 - ii. Estabilizar aviones (i.e. detener por la cola, usar balastas o amarres)
 - iii. Revisar las recomendaciones de los fabricantes
 - iv. Cubrir los equipos / Proteger todo lo que no se usa
 - v. Juntar todos los repuestos y partes de reemplazo
 - vi. Mantenimiento general a todos los equipos que se usaran
 - vii. Servir y reabastecer: agua, aceite, filtros, etc.
 - viii. Revisar equipos (¿El equipo almacenado esta en condiciones adecuadas de operación).

Durante la caída de ceniza

- Ejecutar las acciones recomendadas de caída inminente de ceniza, si no se realizaron previamente
- Proteger al personal (máscaras respiratorias, lentes protectores, equipo de seguridad)
- Mitigar los riesgos de seguridad
- Minimizar el uso de equipo, si se tiene que usar; protegerlo como se pueda (cambiar aceite, filtros, dar servicio)
- Planear y preparar operaciones de seguimiento
- Posicionar el equipo para un uso seguro y conveniente
- Minimizar el uso de aviones
- Se deben considerar criterios de seguridad especiales durante la caída de ceniza (la ceniza mojada es resbalosa y pesada)
- Monitoreo del equipo – revisar los itinerarios de mantenimiento
- Monitoreo del buen funcionamiento de los equipos de emergencia y de generadores
- Monitoreo de daños – reparación de áreas selladas, como sea necesario
- Considerar ideas novedosas para el mantenimiento preventivo
- Considerar la rotación de equipo
- Monitoreo de la cantidad de caída de ceniza en los aviones (limpiar, si es apropiado)
- Evitar la acumulación excesiva de ceniza en los aviones
- No volar aviones cuando esté cayendo ceniza.

Después de la caída de ceniza

- Limpiar de arriba a abajo (techo a piso)
- Evaluar el estado del equipo

- Evaluar el daño
- Localizar equipo necesario – dar prioridad al equipo de apoyo en tierra
- Coordinar el apoyo de equipo con la Administración General del Aeropuerto
- Evaluación constante de la condición de los equipos
- Revisar los itinerarios de mantenimiento
- Revisar los inventarios – qué está trabajando
- Minimizar el uso de equipos
- Seguir las recomendaciones del fabricante
- Hacer énfasis en las consideraciones a la seguridad del personal
- Localizar equipos – coordinar el uso con otras operaciones en el aeropuerto
- Improvisar equipo, como sea necesario
 - i. Uso de tablonces para palear ceniza o para las palas mecánicas, uso de medias de nylon como filtros
- Minimizar movimientos que creen peligro de ceniza o levantamiento de ceniza
- Hacer énfasis en medidas de seguridad, como ceniza mojada resbalosa
- Mantener el equipo no utilizado, envuelto o sellado o darle mantenimiento cuando el riesgo por ceniza haya pasado
- Mover el equipo eléctrico/electrónico fuera de las zonas donde ocurriera caída de ceniza, si es posible
- Seguir las instrucciones recomendadas por los fabricantes
- Aumentar las inspecciones de mantenimiento para operaciones continuas
- Minimizar el soplado o movimiento brusco de la ceniza, cerca de las aeronaves

Grupo de Trabajo V: **Sistemas Electrónicos**

1. Servicios de Cómputo

La táctica más recomendada, es apagar todos los sistemas electrónicos y de cómputo, hasta que la ceniza fuera retirada completamente del área y del equipo. Las cabezas de las computadoras y de los discos – y cualquier circuito de alto voltaje – son especialmente vulnerables a la ceniza y al daño. El limpiado continuo y la protección estricta de los sistemas de cómputo permitirán que las operaciones continúen, en todas, menos en las caídas mas fuertes de ceniza.

Mitigación: La mejor táctica para la mitigación del polvo, es la prevención. Hay que acondicionar y limpiar el aire que rodea los equipos para evitar el polvo. Se ha encontrado que los filtros de tela de algodón (usados en cuartos limpios), funcionan muy bien, sólo que reducen el flujo del aire. Otra solución es el usar ventiladores grandes, para mantener el flujo de aire necesario. Los equipos montados en gabinetes pueden ser modificados para añadirles un ventilador; los instrumentos o equipos con componentes que incluyan ventiladores requerirán un cambio de diseño para incrementar la capacidad del ventilador. Se pueden usar ventiladores con forma de corneta, para incrementar el área, pero reducen el flujo del aire en sólo un 20 %.

Los circuitos digitales integrados pueden variar entre un 5-10 por ciento en su desempeño (dependiendo del tipo de circuito) y aún así ser aceptables. Es difícil generalizar acerca de otros equipos (por ejemplo, sistemas de suministro de alto voltaje).

Humidificar el ambiente (mojando las alfombras) ayuda a controlar el polvo.

El polvo del equipo puede ser removido con aire comprimido. Si el aire es muy seco, las descargas estáticas podrían dañar equipos o componentes sensibles (por ejemplo, circuitos integrados MOS). Si el aire está demasiado húmedo, el polvo se pegará. La humedad relativa de un 25-30% es la mejor para el uso del aire comprimido.

La limpieza con una mezcla presurizada de agua y detergente, y un enjuague con agua caliente es bastante efectiva. Pero de cualquier manera, este procedimiento requiere de un desensamble parcial.

El polvo en los circuitos digitales no causa mucho problema por el bajo voltaje con el que se trabaja. En cambio, los circuitos de alto voltaje o de alta impedancia son muy vulnerables al daño causado por polvo semi-conductor. El polvo es ácido, conductor y corrosivo.

El polvo debe ser quitado de suministros de poder y CRTs (especialmente los de alto voltaje o de capacitores). El polvo puede tener una carga estática, lo que lo hace difícil de retirar, requiriendo un cepillado para despegarlo.

Hay que usar prefiltros para mejorar el filtrado.

Cambiar a filtros absolutos, lo que evitará todas las partículas de hasta una micra de tamaño.

Mantener encendida la computadora para operar los filtros, pero no accesar los discos.

Mantener la configuración de “un cuarto dentro de un cuarto”; restringir el acceso; recircular el aire; acelerar la limpieza del área.

2. Sistemas de Comunicación

Excepto por los cortos circuitos debido a la conductividad del polvo y la abrasión de partes móviles, son pocos los problemas serios que se han informado con respecto a los radios.

Mitigación: los aislantes de teflón en las antenas de comunicación que han sido o que fueron cubiertos por polvo provocaron cortos. Ha sido difícil limpiarlos, ya que el residuo se adhería. Se requirió el reemplazo con aislantes de cerámica.

Los interruptores de plástico o los de botones se desgastan rápidamente; ha sido necesario reemplazarlos.

Sellar las estaciones repetidoras y otras instalaciones; cerrar las entradas de aire o ventilas; la circulación interna del aire deberá ser suficiente para el enfriamiento.

Usar aire comprimido o aspiradoras para limpiar equipos de radio.

Sellar el equipo que no sea a prueba de agua. Las unidades pequeñas consumen poca corriente y, por tanto, se calientan poco.

Las partículas magnéticas se pegan a los relevadores y hay que quitarlas con aire comprimido.

No se debe permitir que se humedezca el equipo.

Limpiar el equipo diario; Se debe incrementar el uso de papel filtro.

Limpiar los platos de microondas, bocinas y guías de ondas; se pueden utilizar lonas de plástico en caso de emergencia.

Estas técnicas están basadas principalmente en equipos de comunicación comerciales y reflejan las circunstancias de operación civil. Algunos equipos militares difieren en su configuración, en requerimientos de electricidad y de parámetros de operación.

3. Sistemas Ópticos y de Radar

La mayoría de los equipos de radar fueron apagados durante las caídas fuertes de ceniza, de modo que se registraron pocos problemas con estos sistemas, con excepción de la limpieza del polvo y el control del polvo residual. La táctica de mitigación más simple fue detener las operaciones.

Mitigación: Los circuitos de alto voltaje pueden experimentar cortos. Es necesario reparar y limpiar.

Lavar los rotores de las antenas, los baleros; relubricar; y cubrir las partes expuestas.

El polvo en las componentes ópticas deberá ser removido con aire comprimido o lavado con cantidades copiosas de agua. No hay que tallar o cepillar, ya que esto puede rayar las componentes ópticas.

Tener cuidado de no lavar el polvo de las monturas de los equipos ópticos en los aviones (por ejemplo, el sextante). El polvo se meterá en las monturas o bisagras.

Apagar las componentes no esenciales del equipo de radar, para bajar la demanda de enfriamiento y de carga eléctrica.

Reducir los requerimientos de las operaciones de desempeño.

Transferir el cubrimiento de radar a otras instalaciones; combinar sectores.

Remover y reemplazar los baleros de la cámara y limpiar los engranajes.

Proteger los sistemas de video grabado del polvo; el polvo causa brincos o rayones en la cinta.

4. Sistemas de Energía Eléctrica

Los sistemas de suministro de energía, ya sean de fuentes comerciales o por generadores, es esencial para casi cualquier actividad. La caída de polvo o ceniza puede dañar o perjudicar los sistemas de distribución eléctrica, debido a la tierra física causada por el polvo conductivo mojado. Los sistemas de transmisión son menos vulnerables a la contaminación por ceniza, debido a los altos voltajes y a las diferentes configuraciones de aislamiento involucradas. Generalmente hablando, se requiere de una acumulación muy grande de polvo para producir daños significativos con apagones. Los apagones ocurren cuando se utilizan generadores que son bastante vulnerables al daño por polvo.

Mitigación: Usar aire comprimido para limpiar aislantes, conectores, escobillas e interruptores.

Lavado con agua a presión (60-150 psi); si se usa muy alta presión (2000 psi) se usa menos agua, pero tarda mas.

Las líneas y las subestaciones deberán ser de-energizadas antes de ser lavadas. Mojar el piso en la subestación, antes de limpiar las líneas.

Cubrir los aislantes con grasa de silicón; aunque esto requiere de una aplicación manual y de limpieza también manual.

Algunos incidentes (menos del 5 %) de descarga capacitiva cuando los aislantes con silicón fueron cubiertos por polvo.

Será necesario lavar y tallar para remover los residuos.

Golpear o cepillar el polvo suelto de los equipos en las subestaciones o de las estructuras.

Soplar primero el polvo y luego lavar; el polvo que se ha mojado y luego secado es mucho más difícil de quitar.

Instalar un tanque de agua y una bomba en un helicóptero. Se pueden limpiar más estructuras rápidamente. No es necesario de-energizar las líneas.

Usar vientos para limpieza autónoma:

- 25 km/h: 5% de polvo retirado
- 40 km/h: 90% de polvo retirado
- 55 km/h: sólo queda una traza de polvo.

Los compuestos de plástico de los aislantes, que han sido quemados y fundidos por descargas, deberán ser reemplazados por aislantes de cerámica.

Mitigación: (Generadores auxiliares):

Almacenar filtros.

Añadir filtros (30% de eficiencia) a los generadores; cambie frecuentemente.

Instalar mangueras en las tomas de aire; levante las tomas, lejos del nivel del suelo.

Limpiar los radiadores con aire comprimido.

Instalar circuitos de alarmas para advertir de presiones diferenciales excesivas entre los filtros.

Sellar fuera de las entradas de aire, cuando no se usen.

Mantener los generadores en arranque manual y dependa de sistemas in-interrumpibles de corriente lo más que se pueda durante posibles cortes; esto protegerá los generadores con poco o nada de filtros.

Las turbinas de gas deberán ser limpiadas por dentro y por fuera con agua y con detergentes de uso rudo. Los filtros que se lavan con agua deberán ser limpiados periódicamente.

Instale sistemas de tres pasos para los filtros de las turbinas de gas:

- Separador inercial
- Pre-filtro
- Filtro de alta eficiencia; remueve 95 % de partículas de hasta 2 micras.

Expulsión inversa automática para limpiar a una presión diferencial de entre 15 y 23 cm (6 y 9 pulgadas).

Instale circuitos de protección para los filtros en turbinas de gas:

- alarma a 6 pulgadas de presión de vacío
- apagado de turbina a 9 pulgadas de presión de vacío
- los filtros colapsan a 12 pulgadas de presión de vacío.

11.2 BIBLIOGRAFÍA

Casadevall, Thomas, J. "The 1989-1990 eruption of Redoubt Volcano, Alaska: impacts on aircraft operations". Journal of Volcanology and Geothermal Research No. 62, pp 301-316, 1994.

"Volcanic Ash and Airports", Reporte Especial del United States Geological Survey, Open File Report 93-518. 1993.

11.3 ALGUNAS RECOMENDACIONES PARA NUEVOS AEROPUERTOS

- Considerar el diseño estructural de los techos para evitar la acumulación de la ceniza.
- Ductos de entrada a los sistemas de aire acondicionado localizados lejos del piso, con tomas de aire no orientadas hacia arriba y en zonas de poca probabilidad de acumulación de ceniza.
- Sistemas de almacenamiento de agua con capacidad mucho mayor, en caso de que se requiera agua para la limpieza de pistas y de terminales.
- Sistemas de drenaje que puedan contener una mezcla de agua con ceniza, además de tanques de decantación para la eliminación de cenizas.
- Zona de entre-pistas con vegetación o material especial para que permita que la ceniza sea removida de ese sitio de forma fácil, ó que capture la ceniza en forma definitiva, ya que de otra forma la turbulencia generada por los aviones levantará de nuevo la ceniza de esa zona.
- Equipos especiales para la remoción de la ceniza de pistas y zonas de circulación de aviones. Considerar que la remoción de ceniza no es lo mismo que remoción de agua o nieve.
- Considerar sistemas centrales de aspirado para la remoción de ceniza.
- Equipos especiales de suministro de energía en caso de emergencia, que no sean afectados por ceniza.

11.4 CONCLUSIONES

- Lo mejor es apagar, cerrar y cubrir todo el equipo.
- Es necesario prever los escenarios de caídas de ceniza y llevar a cabo simulacros.
- Es muy importante tener almacenado equipo y material para la remoción de la ceniza en las zonas de pistas, andenes, equipos y edificios.
- Tener personal capacitado y especializado en contingencias de ceniza volcánica.
- Considerar la posible eventual presencia de ceniza volcánica en el diseño del nuevo aeropuerto tanto en Texcoco como Tizayuca, para mitigar su efecto.

12. SUMARIO

Las operaciones aeronáuticas se han incrementado a escala global y, por ello, han aumentado su vulnerabilidad ante la presencia de nubes de cenizas producidas por diversos volcanes. Los efectos de las cenizas en las aeronaves en vuelo pueden dañar de manera severa diferentes componentes de las aeronaves. Las instalaciones aeroportuarias pueden ser afectadas fuertemente, particularmente las pistas, instalaciones estratégicas, así como sistemas de comunicación, electrónicos y de cómputo.

En México, las nubes de ceniza del volcán Popocatépetl han afectado a las aeronaves en vuelo, a las instalaciones aeronáuticas y a las operaciones aeronáuticas por emisiones importantes y también por falsas alarmas (las cuales se deben a limitaciones en las metodologías para la detección de nubes de ceniza). Los encuentros de las aeronaves con nubes de cenizas han ocasionado daños a partes diversas, en particular a los parabrisas, pero no han producido daños severos a turbinas.

Con base en lo anterior, en este documento se ha abordado la problemática de las cenizas volcánicas del Popocatépetl, así como sus efectos en la aeronavegación y en la infraestructura aeroportuaria de la zona.

Para entender el comportamiento del Popocatépetl, se ha incluido una descripción de los episodios de actividad desde el siglo XIV hasta el presente. De ella se puede concluir que si el tipo de actividad que se desarrolla en la actualidad es de la misma naturaleza que la desarrollada en los 12 episodios previos reportados desde el siglo XVI, es posible que las emisiones actuales puedan mantenerse por un períodos de varios meses a varios años, sin generar mayores consecuencias. Sin embargo, debe tenerse siempre presente que el potencial de que se desarrolle una erupción magmática explosiva de mayor magnitud existe, y que si bien la probabilidad de ocurrencia de tal desarrollo es relativamente menor a la del evento fumarólico, el riesgo que representa requiere sea considerada seriamente en los planes de preparación y en cualquier otro plan de desarrollo nacional o regional. Es, bajo esta lógica, que resulta importante considerar al fenómeno de las cenizas volcánicas en la aeronavegación e infraestructura aeroportuaria de la zona vecina al Popocatépetl.

Se ha señalado que dos de las manifestaciones de la actividad del Popocatépetl son los fragmentos balísticos y la emisión de ceniza. Sobre los primeros, a partir de las altitudes calculadas de su alcance, se desprende que las aeronaves no deben sobrevolar el cráter a una altitud, sobre el nivel medio del mar, menor a 8 km.

Por lo que respecta a la ceniza, se señaló que las nubes hasta el momento y con algunas excepciones, se han caracterizado por una baja concentración de

partículas y una alta concentración de gases. La lluvia de cenizas se han concentrado principalmente en los primeros 30 km alrededor del volcán y ocasionalmente llegan a más de 50 km, precipitándose en instalaciones aeroportuarias. En promedio, las cenizas volcánicas tienen tamaños entre 50 y 100 micras a 50 km del volcán y de 400 micras a distancias entre 4 y 20 km (dependiendo de la explosividad del evento). Además, como resultado de grandes erupciones pasadas se han encontrado espesores de varios cm de ceniza caída hasta 100 km de distancia. En contraste, en erupciones pequeñas como las actuales, estos espesores se reducen a milímetros. Las cenizas actuales del volcán Popocatépetl son rocas volcánicas pulverizadas, de tipo andesítico, compuestas principalmente de fragmentos de los domos, algunos cristales y en pocas ocasiones pómez. Para definir las características específicas de los sitios en los cuales se ha encontrado ceniza, se ha recomendado llevar a cabo un estudio de campo y laboratorio más detallado, de mapeo y muestreo con control estratigráfico.

Puesto que la caída de ceniza depende, entre otros factores, de la dirección del viento en la cercanía del volcán, se discutieron los patrones del viento en la zona. Se presentaron las tendencias de los vientos superficiales y superiores, así como la posible distribución geográfica de la tefra y del material piroclástico.

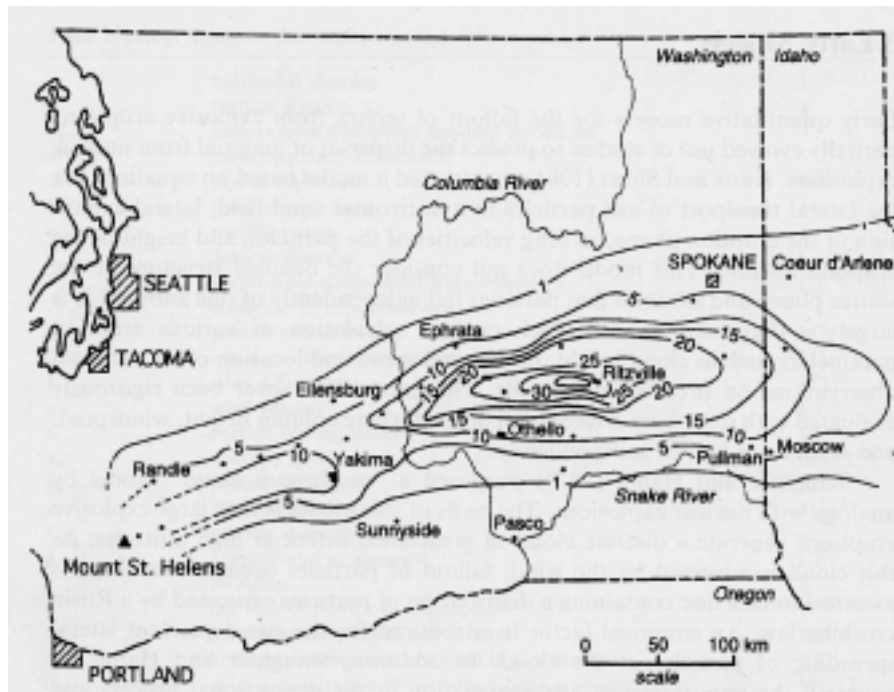
Los sistemas de monitoreo y vigilancia de volcanes son una herramienta indispensable que, además de permitir conocer la actividad de un volcán, permiten detectar, en forma oportuna, emisiones importantes de ceniza. Para el caso del monitoreo del volcán Popocatépetl se cuenta con un moderno sistema que fue descrito en su oportunidad. Si bien este sistema ha proporcionado información muy útil para la toma de decisiones, se ha recomendado la instalación de más cámaras de video que permitan hacer un seguimiento visual de mayor alcance y posición.

En el documento se destaca la importancia de los radares hidrometeorológicos en el rastreo continuo de nubes de ceniza en casi cualquier condición de tiempo. Desafortunadamente el CENAPRED ya no cuenta con esta herramienta debido a un desperfecto en la unidad que temporalmente se operaba conjuntamente con el USGS. Es, por tanto, necesario buscar los recursos o el financiamiento para un nuevo radar con características idóneas para detectar, seguir y alertar sobre nubes de ceniza a la aeronavegación de la zona. Asimismo, se ha considerado conveniente mejorar e implementar la detección temprana de estas nubes, dados los tiempos tan limitados de reacción y activación de planes de emergencia. Se propone desarrollar estudios dirigidos a la aplicación de técnicas que usen instrumentos LIDAR.

Un objetivo central de este trabajo fue el análisis de posible escenarios de formación de depósitos de ceniza producto de erupciones del Popocatépetl. Para ello se utilizó un modelo numérico que, si bien ha demostrado su capacidad de reproducir escenarios de depósitos producidos por erupciones de diversos volcanes, no puede reproducir todos los procesos que controlan el desarrollo, dispersión y caída de las partículas que conforman una nube volcánica. No obstante esta limitación, se considera que pueden sustraerse algunas conclusiones acerca de los escenarios de acumulación de ceniza que podrían esperarse en las

regiones de interés para diferentes tipos de potenciales erupciones del volcán Popocatepetl. Estas son:

- En todos los casos de escenarios de relativa mayor probabilidad (alturas de columna menores de 15 km sobre el nivel del mar), los máximos espesores de ceniza depositada esperados no cambian en forma muy significativa en el rango de distancias de la región de estudio que incluye a los dos lugares propuestos para la construcción del nuevo aeropuerto.
- En los casos de relativamente menor probabilidad, correspondientes a erupciones de gran escala (i.e., alturas de columna mayores de 15 km sobre el nivel del mar), los espesores esperados en ambos sitios de interés para construir el nuevo aeropuerto impedirían por completo cualquier operación aeronáutica. En situaciones de este tipo, puede incluso presentarse una distribución completamente distinta de los espesores de los depósitos obtenidos del modelo, dado que efectos, como la agregación de partículas, no están incluidos en éste. Este tipo de efectos podría producir dos o más máximos de espesor a distancias variables del centro eruptivo. Este tipo de efectos se observaron claramente en los depósitos resultantes de la erupción del 18 de mayo de 1980 del volcán Santa Elena, en el estado de Washington, en los Estados Unidos de América. En la figura siguiente¹ (Carey y Sigurdsson, 1982) se muestra una distribución bimodal, en la que se forma un segundo máximo del espesor de los depósitos a una distancia aproximada de 300 km del volcán.



¹Fig. 1. Mapa de isopacas (líneas de igual espesor de ceniza depositada) de la erupción del volcán Mt. St. Helens del 18 de mayo de 1980. Los contornos están en mm. Nótese el segundo máximo a unos 300 km al ENE del volcán.

REFERENCIAS

Carey S, Sigurdsson H. (1982) Influence of particle aggregation on deposition of distal tephra from the May 18, 1980 eruption of Mount St. Helens volcano. *J. Geophys. Res.* 87: 7061-7072.

González Mellado A.O. (2000). Modelo Semiempírico de Depósitos de Caída en Volcanes. Tesis MC. UNAM. 230. pp

Para precisar la probabilidad de ocurrencia de este tipo de situaciones alrededor del volcán Popocatépetl se ha recomendado realizar estudios geológicos de los depósitos de materiales volcánicos de erupciones pasadas en el área de interés.

Finalmente, en este documento se ha hecho una revisión de la literatura sobre las experiencias en el manejo de cenizas en otros aeropuertos de mundo. Al respecto, se presentaron algunas recomendaciones para la operación y construcción de aeropuertos. La lista de recomendaciones no pretende ser exhaustiva y sólo debe ser considerada como indicativa del tipo de precauciones, acciones y procedimientos en la materia. En este sentido, se ha recomendado implantar un sistema de intercambio de información sobre eventos que involucren cenizas entre las líneas aéreas que operan en México y los fabricantes de aeronaves, así como realizar estudios para conocer las temperaturas de fusión de las cenizas del Popocatépetl.

Se considera que este documento es un primer acercamiento a la problemática planteada y se refuerza la conveniencia de desarrollar los estudios que han sido propuestos.