



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN TRADUCCIÓN

TRABAJO FINAL DE LA ESPECIALIZACIÓN EN TRADUCCIÓN CIENTÍFICA Y TÉCNICA

TEXTO ASIGNADO:

Satellite detection of hazardous volcanic clouds and the risk to global air traffic.

Autor: A. J. Prata. Texto publicado en: *Natural Hazards* (2009) 51:303–324.

Trabajo final presentado por Trad. Jorgelina M. Brasca

Directora: Mgtr. María Josefina Díaz (UNC)

Fecha de presentación: junio 2017



Licencia Creative Commons

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.

INTRODUCCIÓN

El proceso traductor requiere diversas competencias y abarca tareas que, muchas veces, representan desafíos y dificultades. Entre otras, estas tareas incluyen la primera lectura del texto original (TO), la definición del tipo y género textuales, la identificación del público meta, la búsqueda terminológica, la debida documentación, la solución de problemas de distinta índole y la aplicación de técnicas de traducción. Con frecuencia, todos estos procesos se realizan en forma inconsciente. El recorrido por las materias de la carrera de Especialización en Traducción Científica y Técnica nos ayudó a generar esa conciencia, es decir, a identificar y sistematizar los procesos que llevamos adelante ante un encargo de traducción, así como a fortalecer estrategias, emplear herramientas y, en suma, mejorar el trabajo profesional.

La traducción del artículo científico *Satellite detection of hazardous volcanic clouds and the risk to global air traffic* (Prata, 1989) generó un sinnúmero de situaciones que requirieron reflexión profunda y toma de decisiones cruciales de distinta naturaleza. En este informe se presenta una exposición de algunos aspectos clave involucrados en dicho proceso, cuya fundamentación constituye un aporte tanto a nuestra formación académica y profesional como al campo de la traducción en sí.

La primera sección de este trabajo incluye el marco teórico en el que se fundamentan las decisiones. En las siguientes secciones, se realiza el análisis textual, en el que se describe el tipo y género textual del TO, se analizan las técnicas empleadas para lograr la equivalencia y se describen los principales problemas de traducción encontrados y las estrategias aplicadas para solucionarlos. Se hace especial énfasis en el análisis de los sintagmas nominales extensos, dada la complejidad y alta frecuencia de estas estructuras en el TO, y en el tratamiento de la voz pasiva en el texto traducido (TT) mediante la técnica de modulación. Finalmente, se explica el proceso de gestión terminológica, la búsqueda de textos paralelos y

la consulta a expertos. En Anexo, se incluye un glosario bilingüe con las unidades terminológicas más relevantes para la comprensión del TO y ejemplos del uso de cada una de ellas en contexto.

MARCO TEÓRICO

Ante un encargo de traducción, es necesario identificar el tipo y género a los que pertenece el TO. García Izquierdo (2002) define el género textual como una “forma convencionalizada de texto que posee una función específica en la cultura en la que se inscribe y refleja un propósito del emisor previsible por parte del receptor” (p. 15), y lo diferencia del tipo textual, ya que este se refiere a las estructuras lingüísticas y no incluye el contexto sociocultural.

Por otro lado, para identificar el método, las estrategias y las técnicas de traducción empleadas, nos basamos en Hurtado Albir (2001), quien analiza un vasto repertorio de temas desde la perspectiva de distintos autores y propone sus propios aportes. Así, la autora distingue entre el método traductor, las técnicas de traducción y las estrategias de traducción. El método se refiere al proceso determinado por unos principios en función del objetivo del traductor e involucra todo el texto; las técnicas afectan unidades menores del texto y están relacionadas con la búsqueda de equivalencia; las estrategias están vinculadas a los mecanismos empleados para solucionar problemas de traducción. En la traducción de textos científicos en general, siguiendo a la autora, se emplea el método interpretativo-comunicativo, mediante el cual se busca conservar la misma finalidad del TO, con lo que el TT produce el mismo efecto en el receptor, manteniendo la función y el género textual (Hurtado Albir, 2001).

Respecto de los textos especializados en particular, Cabré (2002) aporta un detallado análisis que resulta pertinente retomar. Según la autora, la especialización de un texto está determinada por el tratamiento del contenido y no por el tema que trata. Este tipo de textos se caracteriza por ser el producto de especialistas y por estar dirigido a especialistas; y cuenta

con una organización general específica de las estructuras y una selección particular de las unidades de nivel léxico. Los productores controlan la estructura conceptual y el valor de los conceptos expresados por los términos dentro de un campo de conocimiento; el receptor es un sujeto con expectativas de aprendizaje. El texto especializado es preciso (usa el mayor número posible de unidades terminológicas fijadas en el campo del conocimiento), conciso (las unidades terminológicas condensan el conocimiento especializado) y sistemático (usa unidades fijas, hay reducción en la variación denominativa), tiende a la polifonía como refuerzo de la objetividad, es impersonal. Según Cabré (2002) “el valor especializado de las unidades léxicas corresponde al ‘sentido situado’, es decir, al uso específico que se hace de estas unidades en un campo de especialización preciso” (p. 11). Como se describe más adelante, el TO reviste estas características.

Entre los elementos lingüísticos que contribuyen al carácter conciso y preciso de los textos en cuestión, se encuentran los sintagmas nominales especializados extensos en los textos en inglés. Weffer & Suárez (2014) citan la definición de Quiroz (2008) de sintagma nominal extenso especializado como “una frase nominal, definida o indefinida de tres o más tokens (dos premodificadores o posmodificadores y un núcleo)” (p. 22). De acuerdo con las autoras, estos sintagmas presentan un problema de tipo interpretativo, ya que muchas veces las relaciones semánticas entre los componentes del sintagma no son claras. La resolución de las correspondencias de este tipo de sintagmas, indican las autoras, requiere integrar un saber lingüístico (análisis sintáctico) a un saber extralingüístico (sobre un dominio específico), mediado a través del conocimiento terminológico y un análisis de relaciones semántico-conceptuales. Por su parte, Ramón García (2006) señala una relación implícita entre los premodificadores y el núcleo en los sintagmas nominales en inglés. La necesidad de explicitar estas distintas relaciones semánticas en español representa una dificultad adicional para la traducción de las estructuras con premodificación múltiple. En el análisis de los problemas

lingüísticos de traducción, se presentan algunos ejemplos de estos sintagmas para plasmar los procedimientos lingüísticos empleados, que pueden contribuir a la reflexión sobre el proceso necesario para comprender las relaciones semánticas entre los elementos de un sintagma nominal extenso.

Para el análisis de la alta frecuencia del uso de la voz pasiva que caracteriza el texto científico, y que prácticamente domina el TO, se toma como referencia el artículo de Piñeiro & García (2002). En dicho trabajo, las autoras analizan la construcción de la voz pasiva en inglés y el uso frecuente en traducciones de la voz pasiva participial en español debido a la influencia del idioma inglés. Las autoras indican que el español cuenta con muchas alternativas eficaces para matizar la pasividad del sujeto, o para dar relieve al objeto, como la forma pasiva refleja o el uso de otras construcciones. Teniendo en cuenta los numerosos ejemplos que brindan las autoras, reformulamos la voz pasiva participial en español en la mayoría de las construcciones de este tipo que hay en el TO, para darle más espontaneidad al enunciado. Estos ejemplos se presentan como ilustración en el apartado correspondiente a las técnicas de traducción, específicamente, como ejemplos de modulación.

ANÁLISIS TEXTUAL

El TO responde a las características mencionadas por Cabré (2002) para los textos especializados. En efecto, el productor es un especialista (Dr. A. J. Prata, del Norwegian Institute for Air Research), que cuenta con numerosas publicaciones científicas, además de ser uno de los editores invitados para ese número especial de la revista donde se publicó el artículo. Por lo tanto, se puede afirmar que el productor controla la estructura conceptual y los valores expresados por los términos. Los destinatarios directos son los lectores de esa revista, es decir, pares (investigadores, científicos, profesores). Un indicador de que el destinatario es receptor del contenido especializado es que hay algunas abreviaturas cuyo significado no se

explícita (por ej. *VEI* –iniciales en inglés de índice de erupciones volcánicas–, y *NOx emissions* –emisiones de NOx u óxidos de nitrógeno–).

Para determinar el género al que pertenece el TO, se evaluaron las formas convencionales que lo caracterizan (García Izquierdo, 2002). Se trata de un artículo científico de revisión. Si bien esta categoría no se explicita mediante un título, hay algunos indicadores de que se trata de este tipo de artículo. En primer lugar, el TO está publicado en una revista especializada (*Natural Hazards*) de alto factor de impacto, de una editorial reconocida mundialmente (Springer), en un número especial sobre los peligros que presentan los volcanes a la aviación. Según consta en la nota editorial de ese número de la revista¹, el objetivo de ese número especial es describir y sintetizar el estado actual del conocimiento sobre el tema. En segundo lugar, tal como lo expresa en el artículo, el autor presenta el estado de la ciencia acerca del uso de sensores satelitales, algoritmos y técnicas para la detección de cenizas y gases desde una perspectiva histórica. En tercer lugar, el autor no presenta resultados de una investigación, y el texto no cuenta con las secciones propias del artículo de investigación: introducción, materiales y métodos, resultados, discusión, etc..

El destinatario de la traducción podría ser un par, quizás un profesor universitario que quiera usar este artículo como ejemplo de la aplicación de las imágenes satelitales a un campo específico (la detección de nubes de cenizas volcánicas) o el mismo autor, cuyo artículo será publicado en español.

Según la Nomenclatura para los campos de las ciencias y las tecnologías de UNESCO², el texto pertenece al campo de las ciencias de la tierra y del espacio, disciplina Geología, subdisciplina Teledetección. El TO trata sobre el análisis de imágenes satelitales para detectar nubes de cenizas volcánicas que presentan un peligro a la aviación. Es decir, si bien la

¹ El artículo editorial de ese número de la revista se puede consultar en <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-009-9415-y>

² Consultado en el sitio web SKOS Nomenclatura de Ciencia y Tecnología de la UNESCO (<http://skos.um.es/unesco6/?l=es>)

subdisciplina principal es la teledetección, el trabajo es de ciencia aplicada, ya que se aborda un problema que involucra la geología, la aviación, la meteorología, el manejo de desastres naturales. De todos modos, el foco se hace en la interpretación de imágenes satelitales y en modelos de predicción.

El artículo se estructura en las siguientes secciones: resumen; palabras clave; secciones numeradas, incluyendo la introducción, reseña histórica y tres secciones en las que desarrolla los temas propiamente dichos; conclusiones; un apéndice con la lista de acrónimos empleados en el texto; referencias bibliográficas; tablas y figuras. La función predominante es la que caracteriza a los géneros de textos científicos: la función expositiva con función secundaria argumentativa.

En el TO predomina el tiempo presente, con excepción de la Reseña histórica, en la que se emplea el tiempo pasado. Al describir los resultados de los modelos que se generaron para predecir las trayectorias de las nubes considerando el tráfico aéreo futuro, utiliza verbos modales como *may*, *could* y expresiones como *it is likely that*, lo que evidencia la naturaleza especulativa de estos datos.

Predomina el uso de la voz pasiva como rasgo de objetividad; solo en contadas ocasiones el autor usa la primera persona del plural, pero también, en cierto modo, despersonalizando la opinión, ya que él es el único autor. Al tratarse de un artículo de revisión, es muy alta la frecuencia de citas bibliográficas (polifonía). También hay referencia a los elementos extratextuales (tablas y figuras).

El TO es de elevado nivel terminológico, correspondiente a la clasificación de Hoffmann (1987), expuesta en Cabré (2002) “lenguaje natural con terminología especializada y sintaxis muy controlada” (p. 13). Hay una alta frecuencia de uso de sintagmas nominales extensos, repeticiones, acrónimos, símbolos de elementos químicos, coordenadas geográficas, etc. Por ello, podemos afirmar que el TO es preciso y conciso (en cuanto al uso muy frecuente de

unidades terminológicas especializadas y la condensación del conocimiento que ellas brindan) y sistemático (hay muchas repeticiones de unidades terminológicas y de estructuras).

TÉCNICAS DE TRADUCCIÓN

Durante el proceso traductor, es necesario recurrir a técnicas de traducción para lograr la equivalencia. Las técnicas que se mencionan en este trabajo pertenecen a la taxonomía presente en Hurtado Albir (2001). Las que se utilizaron con mayor frecuencia son la ampliación (uso de un mayor número de unidades lingüísticas), la transposición (cambio de categoría gramatical) y la modulación (un cambio de punto de vista, de enfoque o de categoría de pensamiento en relación con la formulación del TO), y con menor frecuencia, la compresión (síntesis del sentido del TO). A continuación se presentan fragmentos del TO con la correspondiente traducción a modo de ejemplificación de cada técnica. Seguidamente, se realiza una justificación específica para cada caso respecto de las decisiones tomadas en dicho proceso.

Ampliación

TO	TT
<i>Hazardous volcanic clouds</i>	nubes volcánicas que presentan una amenaza

Se tradujo el adjetivo *hazardous* utilizando una ampliación (oración subordinada de relativo) con el fin de explicar que en el contexto de este trabajo, el adjetivo *hazardous* hace referencia a una fuente que puede causar un daño o catástrofe (en este caso, la nube de ceniza como fuente de peligro para un avión). En español, siguiendo a la RAE (2001), el adjetivo “peligroso” significa “que tiene riesgo o puede causar daño”, lo que en inglés también puede ser *risk* (la posibilidad de que un *hazard* produzca daño).

TO	TT
<i>The unpredictability of volcanic eruptions (both in timing and in location)</i>	La naturaleza impredecible de las erupciones volcánicas (tanto en cuanto al momento como al lugar en que ocurren)

En este caso la ampliación brinda mayor naturalidad al texto traducido (TT); en el primer caso, *unpredictability*, para dar idea de que es una característica de las erupciones y evitar el uso de un sustantivo derivado de una nominalización; en el segundo caso, debido a la falta de un equivalente unívoco para expresar el significado de *timing* en este caso.

Compresión

TO	TM
<i>New and improved systems have been developed for ash detection and monitoring</i>	Se desarrollaron sistemas mejores para la detección y el monitoreo de las cenizas.

Se sintetizó el sentido del TO mediante la eliminación del adjetivo *nuevo*, ya que *desarrollar nuevos y mejores sistemas* era redundante, en cuanto a que el verbo *desarrollar* implica la generación de un nuevo resultado.

Transposición

TO	TM
<i>Another development of concern is the proposed introduction of high-speed civil transport (HSCT) aircraft</i>	Otro avance que preocupa es la propuesta de introducir transporte civil de gran velocidad/supersónico (HSCT)

En este caso, la estructura participio pasado como premodificador [*proposed* + sustantivo *introduction*] pasa a ser el sustantivo núcleo del sintagma [*propuesta* + sintagma preposicional *de introducir*], con la característica particular que hay una inversión de funciones: el adjetivo en inglés pasa a ser el sustantivo en español y el sustantivo en inglés pasa a ser el complemento en español.

TO	TM
<i>there is an increasing trend towards 2-engine jets, away from 4-engine aircraft</i>	hay una tendencia creciente hacia el uso de los aviones de dos motores, que desplaza los de cuatro.

En inglés se emplea un adverbio seguido de preposición (*away from*) para indicar de dónde se aleja la tendencia; en la traducción, se reemplazó por la oración subordinada de relativo explicativa “que desplaza”.

Modulación

Como mencionamos anteriormente, en el TO predomina el uso de la voz pasiva. Siguiendo lo expuesto por Piñeiro & García (2002), se intentó evitar en el anglicismo de frecuencia, en este caso, uso de la voz pasiva participial allí donde no es necesario y que puede ser reemplazada por construcciones de pasiva refleja u otras construcciones que responden a la tendencia idiomática del español de preferir la construcción verbal dinámica.

TO	TM
<p><i>Visible light has also been used to infer the presences of volcanic debris in the atmosphere.</i></p> <p><i>More than 30 cases of ash/aircraft encounters have been documented.</i></p>	<p>También se empleó la luz visible para inferir la presencia de detrito volcánico en la atmósfera.</p> <p>Se documentaron más de 30 casos de encuentros de cenizas y aviones.</p>

En este caso, en lugar de usar la voz pasiva participial (*la luz visible fue usada...*) por la refleja con “se”, alternativa más natural en nuestra lengua.

TO	TT
<p><i>The theoretical basis for using infrared satellite imagery to discriminate volcanic ashclouds from meteorological clouds was provided in articles by Prata (1989a, b), and later extended by Wen and Rose (1994).</i></p>	<p>En su artículos de 1989, Prata (1989a, b), plantea la base teórica que sustenta el uso de imágenes satelitales infrarrojas para discriminar las nubes de ceniza volcánica de las meteorológicas; luego Wen y Rose (1994) la amplían.</p>

Se reemplazó la voz pasiva del TO por la voz activa en español. Además, se realizó transposición: en el TT, el sujeto es Prata y Wen y Rose, que, en el TO, forma parte de un sintagma preposicional que no es complemento agente en el primer caso (*in articles by Prata*), y que sí es complemento agente en el segundo caso (*Wen and Rose*).

TO	TT
<p><i>The operations of the VAACs are improving all the time</i></p>	<p>Las operaciones de los VAAC se encuentran en un proceso de mejora permanente</p>

Se cambió de punto de vista en cuanto a trasladar lo que implica el tiempo verbal con aspecto progresivo en inglés a un sustantivo seguido de una frase preposicional (*proceso de mejora*);

lo mismo aplica a la frase adverbial de tiempo *all the time*, reemplazada por un adverbio de modo (*permanente*).

TO	TM
<i>The ash hazard is depicted using shades of yellow to red, with red suggesting more dense ash and greater hazard</i>	En este caso, el peligro de ceniza se indica con tonalidades de amarillo a rojo; el rojo indica ceniza más densa y mayor peligro.

En este caso, el verbo *suggest* se tradujo como *indica*, ya que consideramos que en una escala de colores de una figura, una tonalidad no sugiere, especialmente uno de los colores de los extremos de esa escala.

TO	TM
<i>See the Appendix for a full list of all acronyms used in this article.</i>	En el Apéndice <i>se encuentra</i> una lista completa de todos los acrónimos usados en este artículo.

Se cambió de modo verbal (del imperativo en inglés a modo indicativo en español).

PROBLEMAS DE TRADUCCIÓN

Problemas instrumentales: el primer problema que surgió fue que el archivo que del TO estaba en formato pdf. La transformación a archivo de procesador de texto (Word) provocó modificaciones en muchos caracteres, que fue necesario controlar estrictamente. Además, las figuras contenían títulos internos que no se podían modificar sin contar con los archivos; entonces tomamos la decisión de incluir en nota al pie la frase en inglés seguida de su traducción. Por otro lado, tras la lectura previa del TO, decidimos que no era necesario utilizar una memoria de traducción, ya que prácticamente no hay repeticiones en el texto.

Problemas textuales:

Uso de las siglas/acrónimos: en el texto original no se evidencia una línea coherente, ya que algunas se definen dos veces (por ej. VAACs), otra se usa una sola vez (IR) y se la incluye en la lista de acrónimos. El artículo incluye un apéndice con siglas y acrónimos, que no fueron traducidos ya que los documentos en español consultados para la gestión terminológica

mantienen las siglas correspondientes a los sensores y satélites en inglés. Solo se tradujeron aquellas siglas que no corresponden a nombres de satélites o sensores.

Errores del autor: el TO tiene varios errores (por ej., de concordancia de sujeto y verbo, ortográficos en los nombres geográficos), que causaron interferencia en el desarrollo de la traducción. Por ejemplo, la falta de un sustantivo (el núcleo del sintagma) en: “*a low-level gas (predominantly SO₂ and H₂O) from Ambrym volcano*”, donde falta el sustantivo *plume*, que pudimos dilucidar al traducir una leyenda de figura que repetía esa información.

Sintagmas nominales extensos: Dado el tipo de texto de alta especialidad, este artículo cuenta con un sinnúmero de sintagmas nominales extensos. A continuación se incluyen algunos ejemplos:

TO	TM
<i>infrared satellite techniques</i>	técnicas satelitales que usan la banda del infrarrojo

Se aplicó la técnica de ampliación mediante una frase subordinada para traducir *infrared*, que en español es un sustantivo.

TO	TM
<i>15-min infrared data</i>	datos del infrarrojo tomados cada 15 minutos

En este caso fue necesario buscar información para comprender que los 15 minutos se refieren a la frecuencia con que el satélite toma los datos.

TO	TM
<i>inter-continental passenger jet travel</i>	vuelos intercontinentales de aviones de pasajeros

El sustantivo núcleo del sintagma tiene tres premodificadores.

TO	TM
<i>GOES and NOAA AVHRR satellite data</i>	datos satelitales de GOES y de AVHRR de NOAA

En este caso el problema fue dilucidar si *GOES* modificaba a *AVHRR satellite data* o a *satellite data*. La búsqueda en el corpus nos ayudó a entender que *AVHRR* es un sensor que está a bordo de los satélites de la serie *NOAA* y que *GOES* es otra serie de satélites. *NOAA* es el acrónimo en inglés de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos y los satélites de esa administración llevan su nombre.

Problemas extralingüísticos: un problema de esta índole está relacionado con la falta de textos paralelos, ya que los documentos sobre imágenes satelitales están en su mayoría en inglés. Además, son pocos los trabajos en español que abordan la aplicación de la teledetección a las nubes de cenizas. De hecho, los textos en español sufren de cierta interferencia de la lengua inglesa en sus estructuras. Los textos que formaron el corpus incluyen tesis de maestría, un manual generado desde un ministerio y algunos artículos científicos.

GESTIÓN TERMINOLÓGIA

Como se mencionó, una de las características del texto especializado es la presencia de unidades terminológicas. Según apunta Cabré (2004), las unidades terminológicas constituyen la representación conceptual de la especialidad y sirven para transmitir el conocimiento. En tal sentido, para garantizar la transmisión del conocimiento en la lengua de llegada, luego de identificar las unidades terminológicas del texto original, se recopilaron documentos para armar un corpus textual (tesis de maestría, artículos científicos publicados en español, documentos de clases de carreras de grado, un manual de teledetección); también se realizó consulta a expertos, que fueron fundamentales para determinar la equivalencia en algunos casos así como para detectar algunos errores del TO. Así, se consultó a la Lic. Erika López (geóloga), Dra. Laura Bellis y Dr. Gregorio Gavier (biólogos especialistas en aplicación de

imágenes satelitales a los recursos naturales) y Dr. Raúl Mercado (geógrafo). En Anexo se incluye un glosario con las unidades terminológicas más relevantes.

CONCLUSIONES

El proceso llevado a cabo para realizar la traducción del artículo resultó sumamente enriquecedor, ya que requirió una profunda reflexión así como la revisión de los conceptos abordados durante el recorrido de la carrera. Concientizarnos sobre las actividades que muchas veces realizamos de manera relativamente automática es de suma importancia para reforzar nuestras competencias traductoras y poder superarnos como profesionales constantemente.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente a mi directora, Magister María Josefina Díaz, por su valiosísimo apoyo y excelente orientación. A los especialistas, E. López, L. Bellis, G. Gavier y R. Mercado, cuyos aportes me ayudaron a entender algunos conceptos y a solucionar problemas terminológicos. A la Dra. Liliana Tozzi, por alentarme para realizar esta carrera.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cabré, M. T. (2002). Textos especializados y unidades de conocimiento: metodología y tipologización. En J. García Palacios & M. T. Fuentes (Eds.), *Texto, terminología y traducción* (pp. 15-36). Salamanca: Ediciones Almar.
- Cabré, M. T. (2004). La terminología en la traducción especializada. En C. Gonzalo García & V. García Yebra (Eds.), *Manual de documentación y terminología para la traducción especializada*. Madrid: Arco/Libros S.LR.
- García Izquierdo, I. (2002). El género: plataforma de confluencia de nociones fundamentales en didáctica de la traducción. *Discursos, Série Estudos de tradução*, 2, 13-21.

- Hurtado Albir, A. (2001). *Traducción y Traductología. Introducción a la Traductología*. Madrid: Ediciones Cátedra.
- Piñero, G. & García, M. J. (2002). La construcción pasiva en inglés y en español: dos normas en conflicto en el proceso de la traducción. *Babel*, 48(3), 217-234.
- Prata, A. J. (2009). Satellite detection of hazardous volcanic clouds and the risk to global air traffic. *Natural Hazards*, 51, 303-324.
- Ramón García, N. (2006). Multiple modification in English and Spanish NPs. A corpus-based contrastive study. *International Journal of Corpus Linguistics*, 11(4), 463–495.
- Real Academia Española (2001). *Diccionario de la lengua española* (23ª ed.). Madrid, España: Autor. Recuperado de: <http://www.rae.es/rae.html>.
- Weffer, E. & Suárez, M. M. (2014). Traducción de sintagmas nominales extensos especializados (SNEE) en un corpus de cambio climático. *Lenguaje*, 42(1), 125-142.

Detección mediante satélites de nubes volcánicas que constituyen un peligro y riesgo para el tráfico aéreo en el mundo

A. J. Prata

Recibido: 9 de febrero de 2008 / Aceptado: 13 de junio de 2008 / Publicado en línea: 30 de julio de 2008
©Springer Science+Business Media B.V. 2008

Resumen Los instrumentos de teledetección a bordo de plataformas espaciales se usan desde hace alrededor de 30 años para identificar, rastrear y, en algunos casos, cuantificar los componentes de la atmósfera. Los datos que se obtienen resultan ser de suma utilidad para detectar nubes de cenizas y gases (principalmente SO₂) provenientes de volcanes; estas nubes constituyen un peligro y pueden interceptar las rutas aéreas en todo el mundo. La lejanía de los volcanes, la naturaleza esporádica de las erupciones y la capacidad que tienen los vientos presentes en la atmósfera superior de dispersar las cenizas y los gases hacen de la teledetección una herramienta clave para desarrollar sistemas de alerta frente a peligros. La capacidad de estos instrumentos para detectar peligros es ampliamente reconocida; sin embargo, todavía no se desarrolló un sensor específico para este uso. Por lo tanto, los investigadores tienen que usar instrumentos y datos diseñados para otros fines. En este artículo se describen, desde una perspectiva histórica, los instrumentos satelitales, algoritmos y técnicas empleadas para la detección de cenizas y gases, con miras a dilucidar su utilidad y sus desventajas. Las nubes volcánicas que están ubicadas en la tropósfera media a superior (a alturas por encima de 5 km) tienen las mayores probabilidades de interceptar rutas aéreas y los vientos dominantes pueden dispersarlas por miles de kilómetros. De esta manera, se aborda la vulnerabilidad del tráfico aéreo mundial a la amenaza que presentan las nubes volcánicas desde distintas perspectivas: la percepción satelital remota, la circulación media de los vientos en la tropósfera superior y la densidad de tráfico aéreo actual y la predicha según un inventario actualizado de emisiones de los aviones. Se concluye que la aviación en el Pacífico asiático será cada vez más vulnerable a encuentros con nubes volcánicas debido al mayor número de volcanes activos que hay en esa región y al progresivo aumento de la tasa de crecimiento del tráfico aéreo. También se indica que si comienza a operar el transporte civil de alta velocidad (HSCT, por sus iniciales en inglés), aumentará el riesgo que constituye el detrito volcánico dispersado lejos de su origen. Esta vulnerabilidad se ilustra por medio del uso de mapas de densidad de tráfico aéreo basados en emisiones de NO_x y en observaciones de la dispersión de nubes volcánicas mediante mediciones satelitales de SO₂.

Palabras clave nubes volcánicas como fuente de peligro; riesgo para el tráfico aéreo mundial; mediciones satelitales

A. J. Prata ✉

Norwegian Institute for Air Research, P.O. Box 100, 2027 Kjeller, Norway
e-mail: fpr@nilu.no

1 Introducción

La naturaleza impredecible de las erupciones volcánicas (tanto en cuanto al momento como al lugar en que ocurren) dio lugar a numerosas catástrofes. En la bibliografía hay referencias a desastres causados por erupciones volcánicas en tiempos históricos contemporáneos, que en algunos casos causaron conmoción social, económica y política. Hasta hace aproximadamente 60 años, los peligros de mayor envergadura provenientes de erupciones volcánicas se localizaban en la región cercana a la erupción. Los efectos de mayor alcance correspondían a erupciones de grandes proporciones que pueden alterar el sistema climático del planeta Tierra en una escala temporal de años. Con el advenimiento de los vuelos intercontinentales de aviones de pasajeros surgió un nuevo peligro derivado de las erupciones volcánicas. Estas erupciones pueden inyectar grandes cantidades de cenizas y gases volcánicos a la atmósfera a zonas que pueden ir desde la cima del volcán hasta alturas de 50 kilómetros en los casos de las erupciones más energéticas (p. ej., el volcán Pinatubo en Filipinas, 15,13° N, 20,35° E, ocurrida entre el 10 y el 15 de junio de 1991). Cuando las cenizas y gases se encuentran a gran altura, los vientos pueden transportarlos rápidamente y en diversas direcciones, según la velocidad y cortante del viento –cambio de dirección del viento en la altura–. Dentro de la corriente en chorro, la velocidad del viento puede alcanzar 100 m s^{-1} (360 km h^{-1}), lo que posibilita el transporte a largas distancias en unas pocas horas. La ceniza puede causar grandes perjuicios a la aeronave, como la detención de los motores, la abrasión de los parabrisas y el daño de las partes delicadas de las unidades aviónicas (Casadevall 1994; Casadevall et al. 1996). Los gases volcánicos, especialmente el SO_2 , también pueden constituir una amenaza para la aeronave; además, como el gas y las cenizas difieren en su gravedad específica, es posible que se separen y desplacen a distintas velocidades y alturas en una atmósfera con cortante de viento (Holasek et al. 1996).

El problema de pronosticar el inicio de las erupciones y rastrear sus desplazamientos se encuentra asociado a la dificultad de diferenciar las nubes volcánicas que presentan un peligro de las nubes meteorológicas, que son más comunes. Aun cuando se tenga pleno conocimiento de que hay una erupción volcánica en desarrollo, las autoridades de las aerolíneas no cuentan con suficiente información como para poder garantizar con certeza la seguridad del avión a reacción. Los desafíos logísticos que enfrenta la aeronavegación son enormes: se sabe que hay más de 70 volcanes activos en el presente; ocurren erupciones en algún lugar del planeta con una frecuencia promedio de una vez por semana; las erupciones son impredecibles; la mayoría de los volcanes se encuentran en lugares remotos y no son controlados en forma habitual; las nubes volcánicas se pueden diseminar más de 1000 km en menos de 3 h y actualmente no es posible detectar este tipo de nubes a bordo (el radar del avión no puede detectar partículas de tamaño de micrones ni gases). Hoy, las aerolíneas cuentan con una flota global de alrededor de 18 000 aviones, y hay una tendencia creciente hacia el uso de los aviones de dos motores, desplazando los de cuatro. Este es un aspecto importante en la evaluación de la seguridad de la aeronave, ya que las cenizas afectan directamente los motores, causando su detención. El hecho de contar con menos motores aumenta el riesgo de pérdida total de potencia y del consiguiente desastre. Otro avance que preocupa es la propuesta de introducir transporte civil de gran velocidad (HSCT, por sus iniciales en inglés) que volará a unos 20 km de altura. A estas altitudes, como veremos, hay mayores probabilidades de toparse con detrito volcánico que se encuentre lejos de su origen. Según los pronósticos, para el 2015 podría haber flotas operando de hasta 1000 aeronaves de HSCT (Wei et al. 2001).

La información satelital brinda un aporte valioso para el funcionamiento de las aerolíneas, hecho que es reconocido desde hace un tiempo (Sawada 1987; Miller and Casadevall 1999). Al principio, se usaban los datos climáticos obtenidos mediante satélite para monitorear el movimiento de las nubes de cenizas, pero más tarde se descubrió que se podía usar una

combinación de ciertas bandas del infrarrojo para discriminar las nubes de cenizas de las meteorológicas (Prata 1989a, b). A partir de estos primeros hallazgos y con los avances en la tecnología de instrumentos satelitales, se desarrollaron sistemas mejores para la detección y el monitoreo de las cenizas. Estos sistemas también se aplican para detectar SO₂, gas de origen volcánico. En este artículo se presenta un panorama general de los avances realizados en el empleo de técnicas satelitales para la detección y el monitoreo de cenizas y gases volcánicos.

El artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: inicialmente se presenta una breve reseña histórica que se remonta hasta 30 años atrás, cuando comienza la era satelital meteorológica, y se describe la manera en que se usaron los instrumentos satelitales para monitorear y detectar nubes volcánicas que constituyen un peligro. Luego se describen las principales técnicas y los avances en detección de cenizas mediante satélite, acompañados de una discusión similar para la detección de SO₂. Se desarrolla un análisis de riesgos sobre la base de la circulación media del viento y una variable de sustitución de densidad de tráfico aéreo para examinar los aspectos vulnerables de la aviación regional y mundial en relación con las nubes volcánicas. Finalmente, se brindan algunas conclusiones sobre la manera en que pueden emplearse los datos satelitales para contribuir a que las aeronaves eviten las nubes volcánicas que representan una amenaza.

2 Reseña histórica

Sawada (1987) fue el primero en presentar un estudio metodológico de nubes y plumas de cenizas volcánicas que se valía de imágenes satelitales. El autor usó imágenes de clima obtenidas mediante satélites de órbita geosíncrona (satélite meteorológico geoestacionario, GMS¹, por sus iniciales en inglés) para documentar erupciones volcánicas y dispersión de nubes de cenizas en la región del Pacífico occidental. Sawada (1996) encontró que la tasa de detección a partir de las imágenes del GMS era de alrededor del 13,7% de todas las erupciones registradas durante el período transcurrido entre finales de 1977 y 1985. Esta tasa aparentemente baja se atribuyó a la interferencia de las nubes meteorológicas, así como a las limitaciones del muestreo espacial (no se detectaban las nubes de menos de 5 km) y espectral (los satélites GMS solamente captaban los canales visible y del infrarrojo). Malingreau y Kaswanda (1986) usaron imágenes satelitales (AVHRR) para estudiar la erupción del volcán Colo, en Indonesia, ocurrida el 28 de julio de 1983, que también es conocida por haber causado problemas a los aviones a reacción que operaban en la región. Hanstrum y Watson (1983) estudiaron las erupciones acaecidas en abril de 1992 en Galunggung, Indonesia, desde una perspectiva meteorológica, y mencionaron la utilidad de los datos satelitales para la detección de plumas de cenizas. Krueger (1983), Krueger et al. (1995) y Krueger et al. (2000) mostraron que las mediciones ultravioletas provistas por TOMS, sensor que fue diseñado para medir ozono, podrían ser usadas para rastrear nubes de SO₂ de origen volcánico. Carn et al. (2004) informó que también podría emplearse TOMS para medir emisiones de SO₂ causadas por actividades humanas.

En sus artículos de 1989, Prata (1989a, b) plantea la base teórica que sustenta el uso de imágenes satelitales del infrarrojo para discriminar las nubes de ceniza volcánica de las meteorológicas; luego, Wen y Rose (1994) la amplían. Los Centros de Avisos de Cenizas Volcánicas (VAACs, por sus iniciales en inglés) actualmente utilizan el método original propuesto por Prata (1989a), o alguna variante. Dicho método se basa en tomar la diferencia entre dos imágenes adquiridas en dos longitudes de onda levemente diferentes dentro de la ventana infrarroja, entre 8 y 12 μm . Las nubes de ceniza están compuestas principalmente de

¹ El Apéndice incluye una lista completa de todos los acrónimos usados en este artículo.

partículas de silicatos que absorben, dispersan y reemiten radiación del infrarrojo de una manera distinta de lo que lo hace el hielo o el agua, los principales componentes de las nubes meteorológicas del “tiempo”. Esta gran diferencia permite distinguir las nubes compuestas principalmente de cenizas de las compuestas eminentemente de agua y hielo. Cuando se mezclan, como sucede invariablemente en la atmósfera turbulenta, la capacidad de discriminarlas se ve proporcionalmente reducida y, en algunas circunstancias, se pierde completamente, por ejemplo cuando las partículas de cenizas están totalmente cubiertas de hielo (Rose et al. 1995). A pesar de que esta técnica de “absorción inversa” tiene algunas desventajas, sigue siendo la forma más eficaz de detectar y diferenciar nubes de cenizas volcánicas a partir de imágenes satelitales.

Simultáneamente con el desarrollo de las técnicas satelitales que usan la banda del infrarrojo, los investigadores encontraron que la porción ultravioleta del espectro electromagnético también podía aplicarse al estudio de las nubes volcánicas. Krueger (1983) fue el primero en reconocer la utilidad de las mediciones satelitales de UV para estudiar la dispersión de SO₂ en las nubes provenientes de la erupción del volcán El Chichón, México, en 1982. Krueger empleó imágenes UV captadas por TOMS para mostrar el movimiento de las nubes de SO₂ alrededor del planeta. TOMS fue diseñado originalmente para medir ozono, y desde hace casi 30 años se lo utiliza para detectar nubes de SO₂ de origen volcánico en todo el mundo.

Krueger et al. (1995) describen los principios que sustentan el uso de UV para medir y cuantificar las sustancias volcánicas (es posible identificar tanto SO₂ como cenizas volcánicas) en relación con el sensor TOMS; más recientemente, Krotkov et al. (2006) lo hacen para el instrumento de monitoreo de ozono (OMI, por sus iniciales en inglés). La recuperación de la información sobre SO₂ se basa en el uso de radiación ultravioleta retrodispersada, que es afectada preferentemente por las bandas de absorción de SO₂ dentro del rango de longitud de onda que oscila entre 280 y 320 nm. El uso de múltiples bandas permite la separación de algunos de los efectos que confunden causados por otras moléculas (p.ej. O₃), reflejos que emite la superficie, dispersión múltiple de Rayleigh y absorción proveniente de aerosoles y nubes. La ceniza volcánica se detecta calculando un índice de absorción de aerosol (p. ej. Torres et al. 1998) basado en el cociente entre dos bandas. Aunque esta técnica no diferencia las cenizas de otros aerosoles que se absorben, el contexto de la medición, generalmente, es suficiente para inferir que la ceniza es el aerosol que causa la absorción.

También se empleó la luz visible para inferir la presencia de detrito volcánico en la atmósfera. Matson (1984) usó datos satelitales de GOES y de AVHRR de NOAA, y Richardson (1984) empleó datos satelitales de AVHRR de NOAA para medir el cambio en la transparencia de la atmósfera originado por las nubes de la erupción del volcán El Chichón.

Estos primeros intentos de utilizar imágenes satelitales para estudiar nubes volcánicas fueron perfeccionados y mejorados luego de las grandes erupciones del volcán Pinatubo, Filipinas, ocurridas en junio de 1991. Se documentaron más de 30 casos de encuentros de aeronaves y cenizas y (Casadevall et al. 1996), que dejaron en evidencia el problema principalmente logístico de brindar alertas a tiempo a los aviones. Luego de los problemas causados por esta erupción, se estableció la red VAAC, que cuenta con nodos en Darwin, Australia; Tokio, Japón; Anchorage, Alaska; Buenos Aires, Argentina; Montreal, Canadá; Toulouse, Francia; Washington DC; EEUU y Londres, Inglaterra. Los VAAC brindan asesoramiento a las regiones que están dentro de su área de cobertura; estas regiones abarcan casi todo el planeta e incluyen las rutas aéreas más importantes. Las operaciones de los VAAC se encuentran en un proceso de mejora permanente; con el advenimiento de los instrumentos satelitales con mejores resoluciones espaciales, temporales y espectrales, y servicios de distribución de datos ampliamente mejorados, gran parte del enfoque pasó de ser

reactivo a ser predictivo y preventivo. La predicción de nubes de cenizas en dispersión se tornó una actividad importante de investigación, y se trata en otro artículo de este número. Guffanti y Albersheim (2008) tratan los problemas logísticos y las operaciones que se realizan en los VAAC y en los aeropuertos, que también son de gran importancia. En este trabajo nos concentramos en la detección de nubes volcánicas mediante información satelital.

3 Detección de cenizas volcánicas mediante satélites

El problema de la detección de nubes volcánicas a partir de satélites es en realidad un problema de diferenciación. Las nubes absorben, emiten y dispersan radiación en las regiones visible, del infrarrojo y de microondas del espectro electromagnético. A longitudes de onda visible, dependiendo de la geometría de iluminación (ya sea del Sol o usando una fuente de luz láser) y la de observación, las nubes pueden aparecer brillantes u oscuras. Tal es el caso de las nubes de agua, hielo, silicatos (ceniza volcánica), polvo transportado por el viento (polvo de desierto), humo (p.ej. proveniente de un gran incendio forestal) o cualquier otra nube de partículas generada naturalmente o por el hombre. A veces resulta muy evidente que el origen de una nube determinada es meteorológico (por ej., una nube de gotas de agua o de partículas de hielo, o una nube de fase mixta), pero con frecuencia esto no es tan evidente. En la Figura 1 a–h se muestran algunas imágenes satelitales de nubes y aerosoles en la atmósfera. Se trata de imágenes de MODIS diurnas que fueron realizadas para brindar una reproducción a “color verdadero” de la escena. En todas las escenas hay nubes meteorológicas y otras de distinto origen: (a) una columna gruesa de ceniza que se eleva por encima del volcán Raung (islas Sangahe, Indonesia, 125,37° E, 2,30° N), (b) una pluma de cenizas y gases emitida hace poco tiempo, desplazándose, proveniente del volcán Karthala en Comoras (11,75° S, 43,38° E), (c) una pluma de bajo nivel de gas (predominantemente SO₂ y H₂O) proveniente del volcán Ambrym, en Vanuatu (16,25° S, 168,12° E), (d) una pluma de cenizas y gases sobre terreno cubierto de nieve proveniente del volcán Kliuchevskoi, en Kamchatka (56,057° N, 160,638° E), (e) una nube de cenizas y gases, proveniente de Kliuchevskoi, pero en verano, (f) una nube nociva generada por un accidente industrial ocurrido al sur de Inglaterra, (g) una nube de polvo desplazándose hacia el oeste sobre las Islas Canarias (28,00° N, 15,58° O) y (h) cenizas transportadas por el viento desde la costa de Islandia. Estos ejemplos ilustran algunos aspectos de la variabilidad que presentan las nubes anómalas cuando se las visualiza mediante imágenes satelitales tomadas de día. Algunas nubes se ven casi totalmente de color negro (Fig. 1 f) o gris oscuro (Fig. 1 h), algunas son tan blancas como las nubes de agua/hielo (Fig. 1 c y d), mientras que otras adquieren varias tonalidades arenosas con tintes marrones y amarillos (Fig. 1 a, b, e y g). Resulta muy difícil diferenciar con exactitud las nubes de cenizas de otras nubes mediante el análisis objetivo que incluya sólo imágenes visibles tomadas de día. Durante la noche, la tarea es aún más difícil; por esa razón, los datos del infrarrojo se tornan de gran utilidad. En la actualidad hay diversos algoritmos en uso, y otros propuestos, para la detección de cenizas basados en datos satelitales de las porciones del infrarrojo o la visible. En la Tabla 1 se muestra un resumen de los esquemas de detección de ceniza (acompañados de las referencias originales), que se basan principalmente en el uso de canales del infrarrojo.

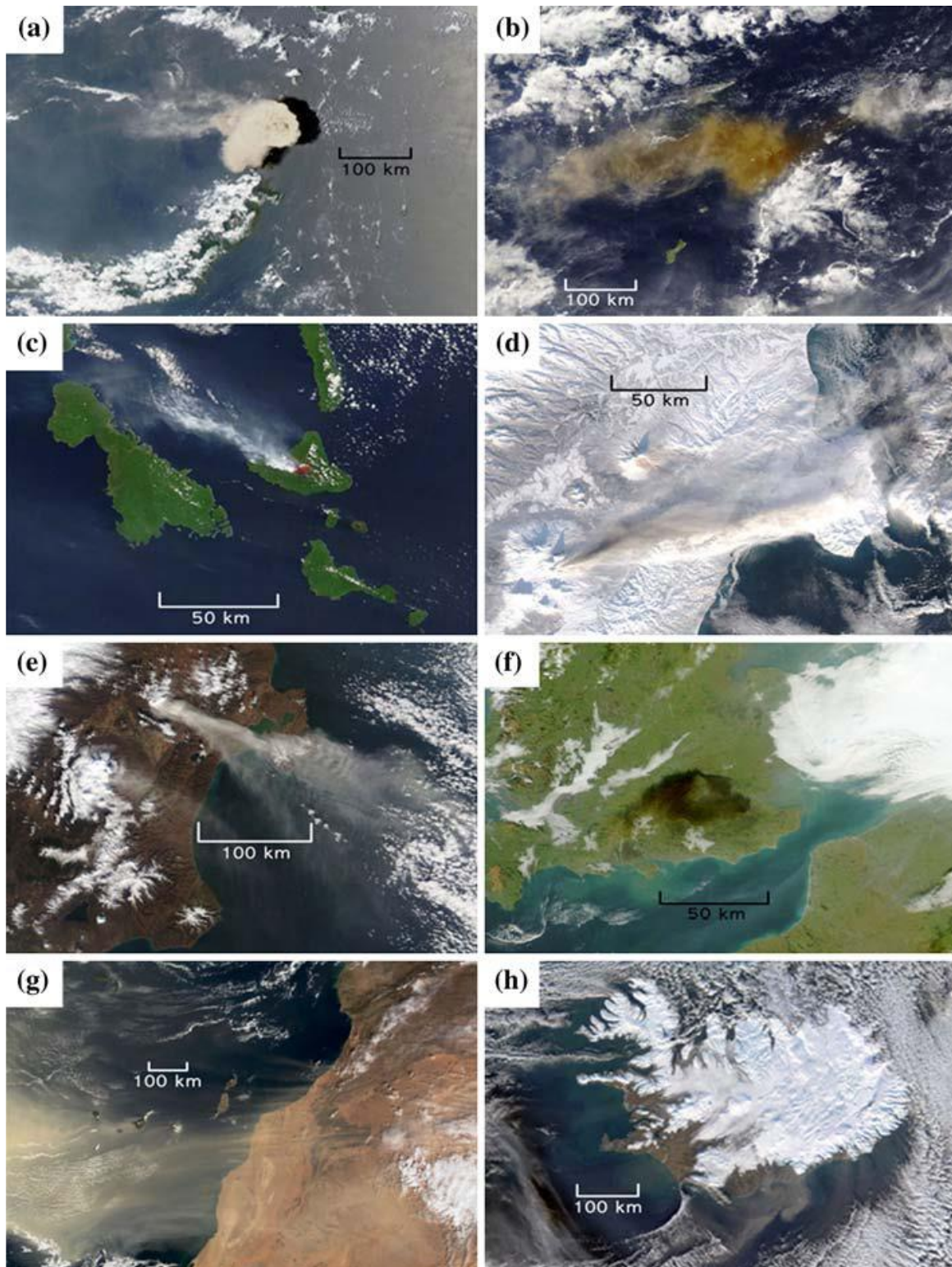


Fig. 1 Escenas diurnas de MODIS que muestran nubes “anómalas”. (a) Columna gruesa de cenizas proveniente del volcán Raung; (b) plumas de cenizas y gases desplazándose del volcán Karthala; (c) pluma de nube con bajo nivel de gas; (d) pluma de gases y cenizas sobre terreno cubierto de nieve (volcán Kliuchevskoi); (e) pluma de gases y cenizas proveniente del volcán Kliuchevskoi durante el verano; (f) nube de gas nocivo originada por un incendio industrial ocurrido en el sur de Inglaterra; (g) nube de polvo sobre las Islas Canarias y (h) flujo de ceniza transportada por el viento desde la costa sur de Islandia.

La técnica de absorción inversa que utiliza dos canales es muy útil cuando la ceniza no es muy gruesa ni está muy dispersa, y es la que se utiliza en los VAAC (Watkin 2003). La Figura 2 ilustra la aplicación de la técnica para la erupción del Karthala (Fig. 1 b). En este caso, el peligro de cenizas se indica con tonalidades de amarillo a rojo; el rojo indica cenizas más densas y mayor peligro. Vale mencionar que las nubes que se ven de color blanco en la imagen de color verdadero (Fig. 1 b) de este evento no son detectadas como una fuente de peligro causado por cenizas. Sin embargo, también debe considerarse que los bordes de varias nubes son detectados como una fuente potencial de peligro, aunque parece más probable que sean nubes meteorológicas. Los problemas y las dificultades derivados de utilizar la técnica de absorción inversa fueron motivo de debate en la bibliografía de investigación (p. ej. Simpson et al. 2000; Prata et al. 2001) y son bien conocidos por expertos en meteorología. El contexto resulta un elemento clave para determinar si una nube particular representa una posible fuente de peligro de cenizas o no; a su vez, los meteorólogos entrenados que tienen la tarea de identificar las nubes de cenizas se valen de numerosas fuentes de información, tales como imágenes satelitales, informes de pilotos, informes de observadores en tierra, trayectorias del viento y antecedentes relacionados con la actividad volcánica en la región y el comportamiento previo.

Tabla 1. Resumen de los algoritmos para la detección de cenizas y las técnicas empleadas con datos satelitales de canales del infrarrojo (IR) y visible.

Nombre	Principio	Referencia
AI	2 bandas del IR (11 y 12 μm)	Prata (1989a, b)
Cociente	2 bandas del IR (11 y 12 μm)	Holasek y Rose (1991)
4 bandas	IR + visible	Mosher (2000)
TVAP	3 bandas del IR (3,9, 11 and 12 μm)	Ellrod et al. (2003)
PCI	Componentes principales aplicado a imagen multibanda	Hillger y Clark (2002a, b)
CVA	2 bandas del IR + corrección de vapor de agua	Yu et al. (2002)
COC	3 bandas del IR (3,5, 11, 12 μm)	Pergola et al. (2004)
3 bandas	3 bandas (IR y visible)	Pavolonis et al. (2006)

AI = Absorción inversa; TVAP = Iniciales en inglés por Algoritmo de tres bandas para producto volcánico; PCI = Iniciales en inglés por Componentes principales; CVA = Iniciales en inglés por Método de corrección de vapor de agua; COC= Iniciales en inglés por Método de cociente

Es posible avanzar un paso más en el análisis del infrarrojo. Wen y Rose (1994) y Prata y Grant (2001) demostraron que al integrar un modelo microfísico de las partículas de cenizas con un modelo detallado de transferencia radiativa se pueden invertir los datos del infrarrojo y, de esa manera, revelar el tamaño medio de la partículas y la opacidad de la nube. Cuando se integran estos parámetros sobre el área cubierta por la nube, es posible inferir la masa total y la carga de masa a partir de los datos. Estos son productos cuantificables que se pueden incorporar a modelos de dispersión a los fines de generar mapas para uso en el ámbito de la aeronavegación. En la Fig. 3 se muestra un ejemplo de este tipo de recuperación, también para la erupción del Karthala. Hay muchos satélites (polares y geosíncronicos) que usan estos canales del infrarrojo, por lo que este producto puede distribuirse en todo el mundo. En la Tabla 2 se detallan algunos de los instrumentos satelitales que pueden proveer la carga de masa de la ceniza.

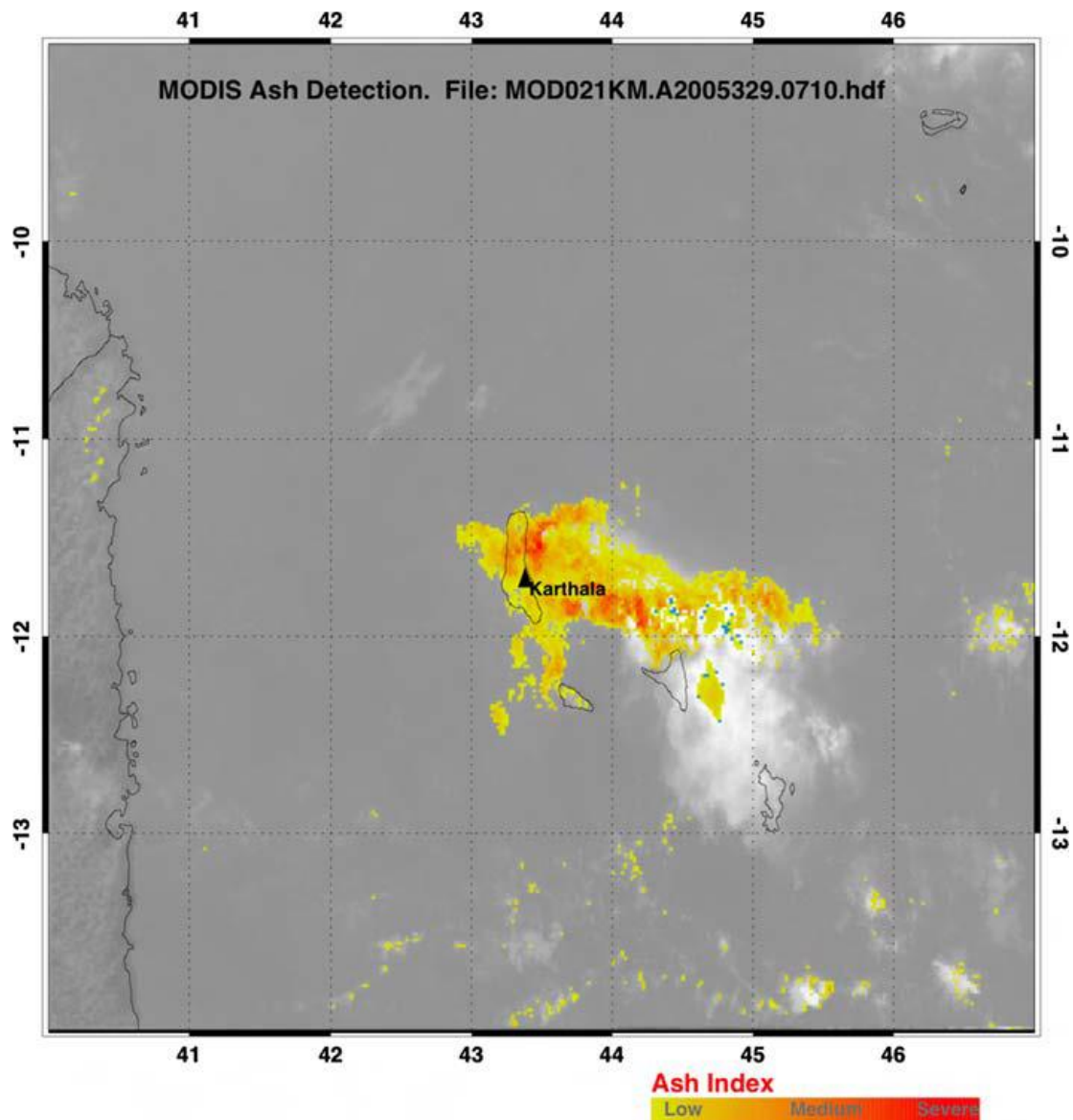


Fig. 2 Mapa de “riesgo” de ceniza correspondiente a la erupción del volcán Karthala que se muestra en la Fig. 1 b, basado en la técnica de absorción inversa, que usa dos bandas del infrarrojo. Las regiones de mayor riesgo aparecen en color rojo. Las regiones en gris supuestamente están “libres de ceniza”.²

Dos de los instrumentos detallados en la Tabla 2 tienen capacidad para medir mucho más que la carga de masa de ceniza. Estos instrumentos, AIRS (Chahine et al. 2006) e IASI (Clerbaux et al. 2007), tienen alta resolución espectral y, al utilizar más canales de medición, permiten inferir algunos aspectos de la mineralogía de la ceniza. En efecto, también es posible diferenciar nubes de polvo (Fig. 1g) y de cenizas transportadas por el viento (Fig. 1h) de nubes y plumas de cenizas provenientes de erupciones volcánicas.

² N. de la T.: Traducción de las frases que están en inglés en la figura: MODIS ash detection: detección de cenizas mediante MODIS; File: archivo; Ash Index: índice de cenizas; Low: bajo; Medium: medio; Severe: severo.

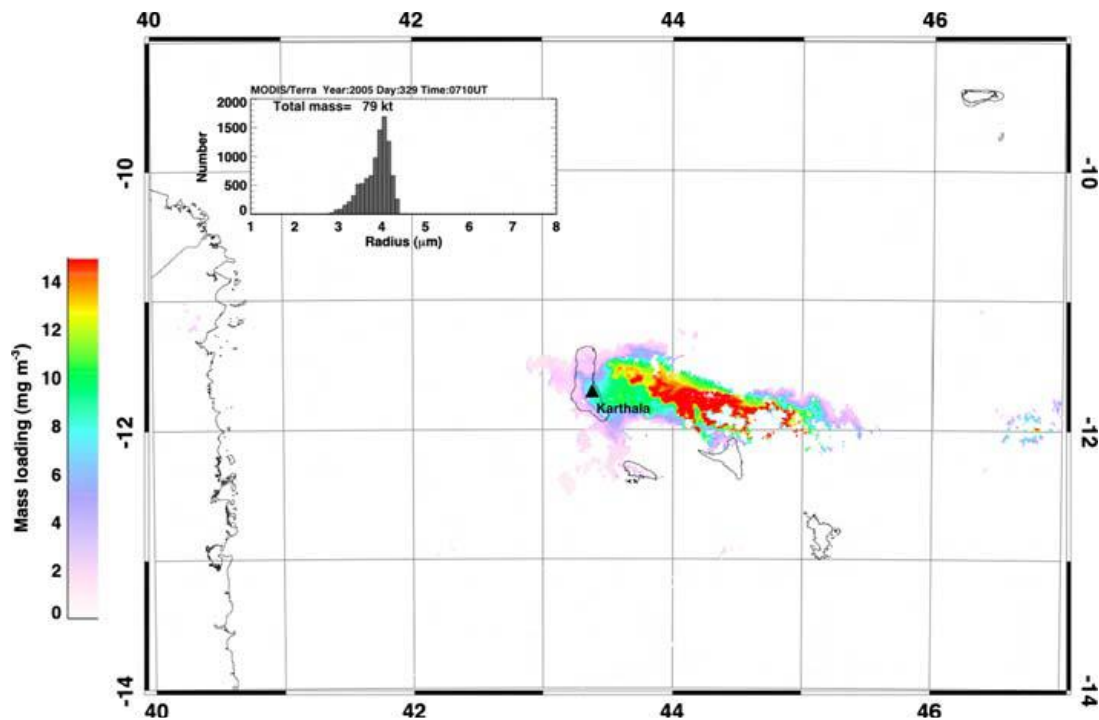


Fig. 3 Recuperación de información de carga de masa de cenizas de la erupción del Karthala que se muestra en la Fig. 1b³

Tabla 2. Características de instrumentos satelitales pasados y actuales que pueden usarse para detectar cenizas y generar mapas de carga de masa de cenizas a partir de mediciones de datos del infrarrojo.

Satélite	Instrumento	Resolución espacial (km x km)	Resolución temporal (por día)	Periodo cubierto (presente)
NOAA	AVHRR-2, -3 1 9	1x1	2	1981
NOAA	HIRS-2, -3, -4	10 x 10 ^a	2	1979
GOES	VISSR/VAS	5 x 5	24	1980
ENVISAT	ATSR-family	1 x 1	2 ^b	1991
GMS-5	VISSR	5 x 5	24	1995
Terra/Aqua	MODIS	1 x 1	4 ^c	1999
Aqua	AIRS	14 x 14	2	2002
MetOp	IASI	12 x 12	2	2007
MSG	SEVIRI	3 x 3	96	2006

^a Los instrumentos HIRS más antiguos (1-3) tenían un campo visual más amplio, de 18 x 18 km²

^b Este satélite está en un ciclo de repetición de tres días, de tal manera que se toma una imagen del mismo punto dos veces en un día y no se vuelve a tomar hasta tres días después.

^c Suponiendo que hay dos satélites en órbita en cualquier momento dado.

La identificación de cenizas peligrosas todavía presenta algunas dificultades en muchos casos; el momento oportuno sigue siendo un problema. Otra dificultad es que no existe un producto

³ N. de la T.: Traducción de las frases que están en inglés en la figura: *Mass loading*: carga de masa; *Year*: año; *Day*: día; *Time*: hora; *Total mass*: masa total; *Radius*: radio)

obtenido mediante satélites que indique la altura de la nube de ceniza. Este dato esencial generalmente se infiere más tarde. Una vez que una secuencia de imágenes reveló el comportamiento espacial y temporal de una nube de ceniza, se hacen correr trayectorias sobre la base de alturas “supuestas” y se emplea el mejor ajuste para establecer la altura más probable de la nube de ceniza que constituye un peligro. Eckhardt et al. (2008) estableció una base teórica sólida para esta metodología poco confiable. El autor empleó una técnica de modelación inversa que combina la dispersión lagrangiana de partículas usando campos de viento con mediciones satelitales para estimar el perfil de la altura de inyección de la erupción. El método fue probado durante la erupción del volcán Jabal al Tair, en Yemen (15,55° N, 41,83 E) y se basaba en mediciones satelitales de SO₂ tomadas por SEVIRI como un variable sustituta de ceniza. Como resultado, se obtuvo una validación muy buena e independiente frente a OMI; además, un lidar con base en el espacio (CALIPSO) demostró que una vez que se logró conocer la altura precisa de la inyección (± 1 km), se pudo rastrear la trayectoria y dispersión de la nube durante varios días y por más de 10 000 km. La idea de usar mediciones satelitales de SO₂ para inferir el peligro que presentan las cenizas no es nueva; sin embargo, este abordaje presenta dificultades y una situación ideal sería usar mediciones directas de las cenizas. En la actualidad, es más fácil hacer mediciones satelitales de SO₂; además, se mostró que son muy útiles para alertas de peligro para la aviación. La sección que sigue trata el estado de la ciencia en relación con la detección de SO₂ desde el espacio.

4 Detección de SO₂ mediante satélites

El dióxido de azufre es, generalmente, el tercer gas más abundante (después del vapor de agua y el CO₂) que emiten los volcanes. Es un gas incoloro que puede ocasionar irritación en los ojos, dificultades para respirar e, incluso, la muerte cuando se presenta en altas concentraciones. La atmósfera tipo contiene muy poco SO₂, la mayoría de las emisiones causadas por la actividad humana provienen de fuentes industriales, mientras que las emisiones naturales provienen principalmente de fuentes volcánicas. Las emisiones volcánicas de bajo nivel de SO₂ (generalmente denominadas desgasificación pasiva) tienen poca importancia para la aviación. Cuando ocurren erupciones explosivas, el SO₂ puede ser inyectado en forma violenta a la atmósfera y alcanzar grandes alturas, donde intercepta las rutas aéreas y, así, adquiere peligro potencial para la aviación. La amenaza que representan las emisiones de SO₂ para la aviación no se conoce con exactitud; sin embargo, en general se supone que las emisiones van acompañadas de ceniza, la cual es un peligro conocido. En consecuencia, los pilotos están entrenados para reconocer el olor agrio generado por los gases de azufre (tanto el SO₂ como el H₂S tienen un olor penetrante característico) para que puedan deducir que se produjo un encuentro con una nube volcánica. Probablemente ello no signifique que se toparon con ceniza –hay otras señales claras de un encuentro con cenizas– pero los procedimientos actuales requieren que si se sospecha la posibilidad de un encuentro, es necesario prestar atención, informar y llevar a cabo todos los controles de mantenimiento correctivo. Es posible que el SO₂, en concentraciones suficientemente altas, pueda causar contaminación del combustible, y si se lo encontrara en forma de aerosol de ácido sulfúrico, se cree que podría ocasionar un daño al fuselaje y al parabrisas (Bernard and Rose 1984). Suponiendo que el SO₂ volcánico en la tropósfera superior (por encima de los 5 km) se traslada con la ceniza volcánica, parece lógico usar mediciones satelitales de SO₂ como variable de sustitución de cenizas.

Desde 1979, el SO₂ se mide con el instrumento TOMS, que fue diseñado para medir ozono atmosférico a bordo de diversos satélites de órbita polar. Las mediciones se basan en radiación solar UV dispersa, la cual se ve afectada por la presencia de SO₂ a longitudes de

onda entre 0,28 y 0,32 μm . El extenso tamaño de escena (50 x 50 km^2), la cobertura de una vez al día y la relación señal a ruido relativamente baja para las mediciones de SO_2 realizadas por TOMS significaba que solamente podían detectarse las nubes de SO_2 provenientes de las erupciones de mayor envergadura ($\text{VEI} > 2$). No obstante, se demostró la utilidad de TOMS para rastrear nubes de SO_2 y verificar el origen volcánico de nubes “anómalas”. Los trabajos de Schneider et al. (1999) y Constantine et al. (2000) brindan buenos ejemplos que muestran la coubicación de SO_2 y de nubes de cenizas.

Tabla 3. Características de instrumentos satelitales usados en el pasado y en la actualidad que pueden emplearse para detectar y cuantificar SO_2 mediante mediciones que utilizan las bandas UV e IR.

Satélite	Instrumento	Resolución espacial (km x km)	Resolución temporal (por día)	Período cubierto (presente)
Varios	TOMS	50 x 50	1	1979
NOAA	HIRS-2, -3, -4	10 x 10 ^a	2	1979
GOES	VISSR/VAS	5 x 5	24	1980
Terra/Aqua	MODIS	1 x 1	4 ^b	1999
Terra	ASTER	0.09 x 0.09	1/16	1999
Aqua	AIRS	14 x 14	2	2002
Aura	OMI	24 x 13	1	2004
Aura	MLS	30 x 150	1	2004
ERS-2	GOME	320 x 40	1	1995
ENVISAT	SCIAMACHY	60 x 30	1	2002
MetOp	IASI	12 x 12	2	2007
MetOp	GOME-2	80 x 40	2	2007
MSG	SEVIRI	3 x 3	96	2006

^a Los instrumentos HIRS más antiguos (1-3) tenían un campo visual más amplio, de 18 x 18 km^2

^b Suponiendo dos satélites en órbita en cualquier momento dado.

El éxito de TOMS para detectar SO_2 a partir de mediciones UV desencadenó el desarrollo de instrumentos mejorados, como GOME, SCIAMACHY, OMI y GOME-2. Los métodos empleados para la detección de SO_2 se encuentran en Eisinger y Burrows (1998) y Thomas et al. (2004) para GOME, en Richter et al. (2006) para SCIAMACHY y en Krotkov et al. (2006) para OMI. Todos estos instrumentos se encuentran en órbita polar; tienen, en el mejor de los casos, resoluciones espaciales de 14 x 24 km^2 (OMI) y están limitados a la cobertura de la parte de la Tierra iluminada por el Sol. Los datos que proveen GOME-2 y SCIAMACHY se usan para generar un alerta de SO_2 a nivel mundial tanto para emisiones naturales (volcánicas) como antrópicas (Van Geffen et al. (2007); también se puede consultar en <http://www.oma.be/BIRA-IASB/Molecules/SO2nrt/>). Se encuentra en desarrollo un sistema similar también para OMI.

También es posible medir SO_2 mediante radiación del infrarrojo (Prata et al. 2003), con menor exactitud y precisión que mediante el uso de radiación UV. Hay instrumentos satelitales de órbita polar y geosíncrona que operan con canales del infrarrojo y que pueden emplearse para inferir el caudal de la columna de SO_2 . Entre los instrumentos satelitales disponibles desde 1979 que pueden usarse para medir el caudal de columna de SO_2 se

encuentran HIRS, VISSR, MODIS, AIRS, SEVIRI e IASI.⁴ Dado que todos estos datos satelitales pueden usarse con la misma eficiencia tanto de noche como de día, y que en general tienen mejor resolución espacial (hasta 1 km²); también ofrecen la posibilidad de desarrollar un sistema de alerta global de presencia de SO₂. En la Tabla 3 se detallan las principales características de los instrumentos UV e IR para la detección de SO₂.

Existen numerosos ejemplos de la extensa dispersión de SO₂ proveniente de erupciones volcánicas detectada mediante sensores satelitales tanto UV como IR. Entre ellos se destacan las erupciones del volcán El Chichón (17,360° N, 92,228° O) en 1982 (Krueger 1983), del Monte Spurr (61,299° N, 152,251° O) en 1989 (Schneider et al. 1995), del Pinatubo en 1991 (Bluth et al. 1993; Prata et al. 2003) y del Hudson (45,90° S, 72,97° O) en 1991 (Barton et al. 1992). Más recientemente, las mediciones OMI y AIRS rastrearon nubes de SO₂ generadas por erupciones provenientes de Soufriere Hills, en Montserrat (16,72° N, 62,18° O) (Carn et al. 2007; Prata et al. 2007) y de Jabal al Tair, en Yemen (Eckhardt et al. 2008). Fue posible rastrear estas nubes de SO₂ durante varias semanas a medida que se desplazaban con los vientos dominantes a alturas que excedían los 15 km. A estas alturas, las nubes de SO₂ se encontraban por encima del tráfico aéreo comercial y no constituían una verdadera amenaza para la aviación; sin embargo, esto no siempre es así. La capacidad de rastrear y predecir el movimiento de nubes peligrosas usando mediciones de SO₂ obtenidas mediante satélites es de gran valor y, como se indicó anteriormente, se desarrollaron sistemas de alerta a nivel mundial para advertir a la aviación usando estos datos.

5 Nubes provenientes de erupciones volcánicas y amenaza que presentan a la aviación a nivel mundial

Las nubes volcánicas se desplazan con los vientos dominantes a la altura de la inyección. Al comienzo de la erupción, es probable que las cenizas y los gases se dispersen por toda la columna vertical hasta la altura máxima que alcance la nube, que depende de la carga energética de la erupción y, en menor medida, de las condiciones ambientales. Durante las primeras horas de la erupción, las zonas aledañas al volcán presentan el mayor riesgo para la aviación. En general, se dispone de información sobre precursores que anuncia la actividad del volcán y se alerta a la aviación bastante antes de que ocurra la erupción. Luego de una erupción importante, las cenizas y los gases pueden ser transportados a largas distancias, pero generalmente se ven confinados a un rango vertical mucho más pequeño de 1 a 2 km. El desarrollo de modelos de dispersión del movimiento de la nube entonces depende de manera crucial del conocimiento de la ubicación de la nube en la columna vertical, y no tanto de los campos de viento, ya que estos últimos frecuentemente se conocen con más exactitud. La práctica actual consiste en conjeturar la altura de la nube sobre la base de ajustes de prueba y error entre observaciones de la nube y las corridas del modelo. Los VAAC usan esta información con cautela, junto con otras fuentes de información. Estos centros advierten que el espacio aéreo se ve afectado desde el suelo hasta la supuesta altura máxima de la nube volcánica, y lo expresan en terminología de aviación usando niveles de vuelo (FL, por sus iniciales en inglés), por ej. FL 350 significa una altura barométrica de 35 000 pies o 10 700 m. El tráfico aéreo, entonces, deberá desviar, bordeando una región espacial grande que cubra la ubicación horizontal de la nube y la región vertical desde el suelo hasta FL X, siendo X el nivel de vuelo que se ve afectado. Si bien esta es una estrategia para evitar el riesgo, puede

⁴ También se puede emplear ASTER para detectar SO₂ de origen volcánico (p. ej. Urai 2004), pero debido a su extenso tiempo de revisita (16 días) y su escaso ancho de observación (~60 km) resulta de menor utilidad para el monitoreo de amenazas a la aviación mundial.

resultar una carga económica y quizás innecesaria para el operador. Ello se debe a que la nube volcánica, en la mayoría de los casos, se encontrará confinada en la vertical a un estrato de 1 a 2 km de espesor y es posible que no contenga cenizas. El tiempo de permanencia de la ceniza fina en la tropósfera superior se encuentra en el orden de varias horas a algunos días; además, en estado de dispersión, es posible que la ceniza no resulte un peligro para el avión, aunque algunos estudios de casos parecen indicar que las nubes de cenizas en concentraciones bajas, incluso no detectables, también pueden ser una amenaza (Pieri et al. 2002; Tupper et al. 2004). Debido al abanico de incertidumbres que caracteriza la predicción de la actividad eruptiva de un volcán, el conocimiento del perfil de altura de inyección de una erupción y el establecimiento de un nivel mínimo de concentración de cenizas que no presente un peligro para la aviación, solo es posible establecer signos de vulnerabilidad bastantes generales.

Los patrones de circulación de los vientos en la tropósfera media y superior (MUT, por sus iniciales en inglés) son fundamentales para establecer el peligro que las nubes volcánicas en dispersión representan para la aviación comercial intercontinental. En la MUT, los vientos zonales son más fuertes que los meridionales y, en consecuencia, las nubes volcánicas tienden a trasladarse rápidamente en dirección zonal. En la Fig. 4 se muestra los sectores de vientos zonales (media a largo plazo) a 250 hPa (10 km) para los meses de enero (Fig. 4a) y julio (Fig. 4b). En estos gráficos se destacan las fuertes corrientes zonales a aproximadamente 30° N en enero y 30° S en julio. Los vientos zonales, en general, son bastante débiles a una latitud de $\pm 10^\circ$ de ambos lados del ecuador, pero existe una notable dependencia estacional, con dominio de vientos del este en latitudes al norte del ecuador en julio. En la Fig. 5 a y b se muestran gráficos similares de la componente meridional del viento medio para enero y julio. Los vientos meridionales de enero tienden a soplar más hacia el norte y pueden alcanzar 6 m s⁻¹ en las latitudes altas del hemisferio que está en invierno. Los vientos ecuatoriales son débiles en ambos momentos del año. Los patrones de circulación media del viento permiten hacer algunos comentarios generales sobre la probable dispersión de nubes volcánicas que alcanzan los 10 km de altura. Para las erupciones que sucedan cerca de latitudes ecuatoriales en julio, es muy probable que la dispersión sea hacia el oeste y con escaso transporte hacia los polos. De hecho, esto se observó en la erupción del Pinatubo, en nubes que alcanzaron altitudes mucho mayores, ya que las características del viento a 10 km es similar hasta aproximadamente los 30 km (ver Fig. 6). Las erupciones que sucedan a latitudes más altas dispersarán detrito volcánico en direcciones y a velocidades que dependerán del hemisferio y de la estación. En julio, las nubes de una erupción que se dé en Chile se dispersarán rápidamente hacia el este y el sur, y es muy poco probable que las nubes se dispersen hacia el hemisferio norte, pero sí es más factible que se vean confinadas a circunnavegar el hemisferio sur, a latitudes al sur de los 30° S. Este fenómeno fue observado en la erupción del monte Hudson, ocurrida en agosto de 1991, que dispersó nubes volcánicas en dirección este, hacia Australia, lo que produjo algunos incidentes menores en la aviación (Barton et al. 1992). Las erupciones que ocurran en Japón y más hacia el norte a lo largo de la península de Kamchatka dispersarán nubes hacia el este, a mayores velocidades en julio que en enero. Los vientos meridionales transportarán estas nubes hacia el sur en verano (julio) y hacia el norte en invierno (enero). Es probable que la dispersión de nubes volcánicas hacia el noreste, provenientes de los volcanes de Japón o de Kamchatka en invierno, presente mayor riesgo para las aerolíneas que vuelan las muy transitadas rutas aéreas del Pacífico norte que conectan Japón con Estados Unidos.

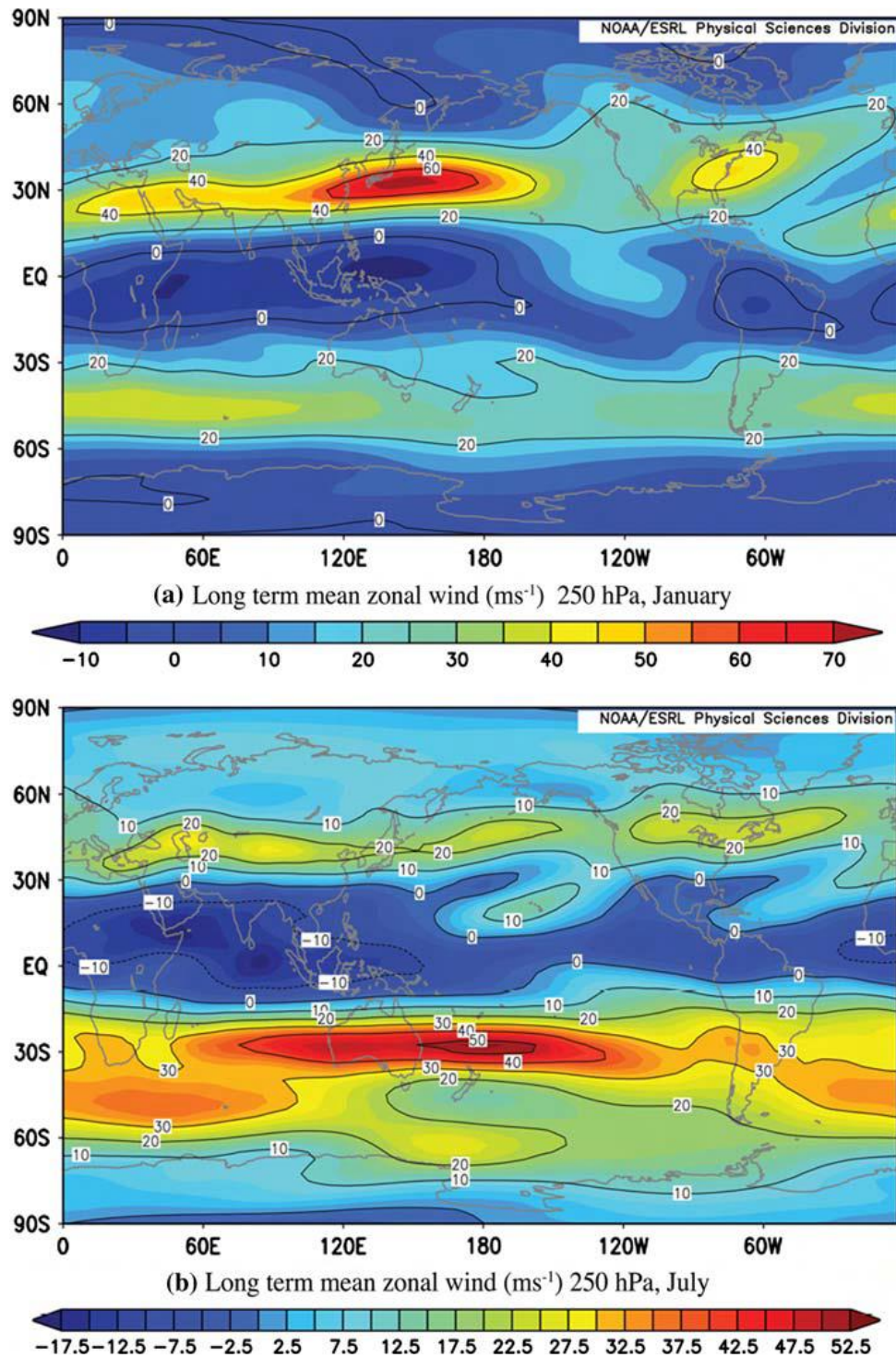
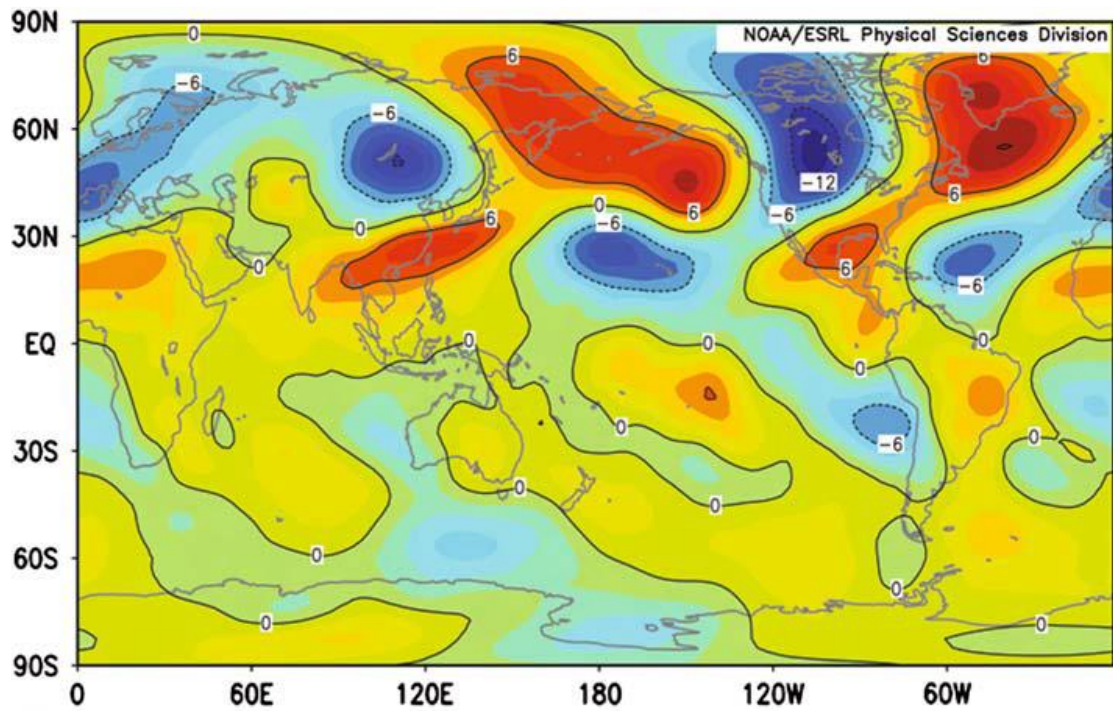


Fig. 4 Vientos zonales (media a largo plazo) expresados en m s^{-1} para (a) enero y (b) julio (reproducido de NOAA/ESRL Physical Sciences Division, se puede consultar en <http://www.cdc.noaa.gov/cgi-bin/PublicData/getpage.pl>).

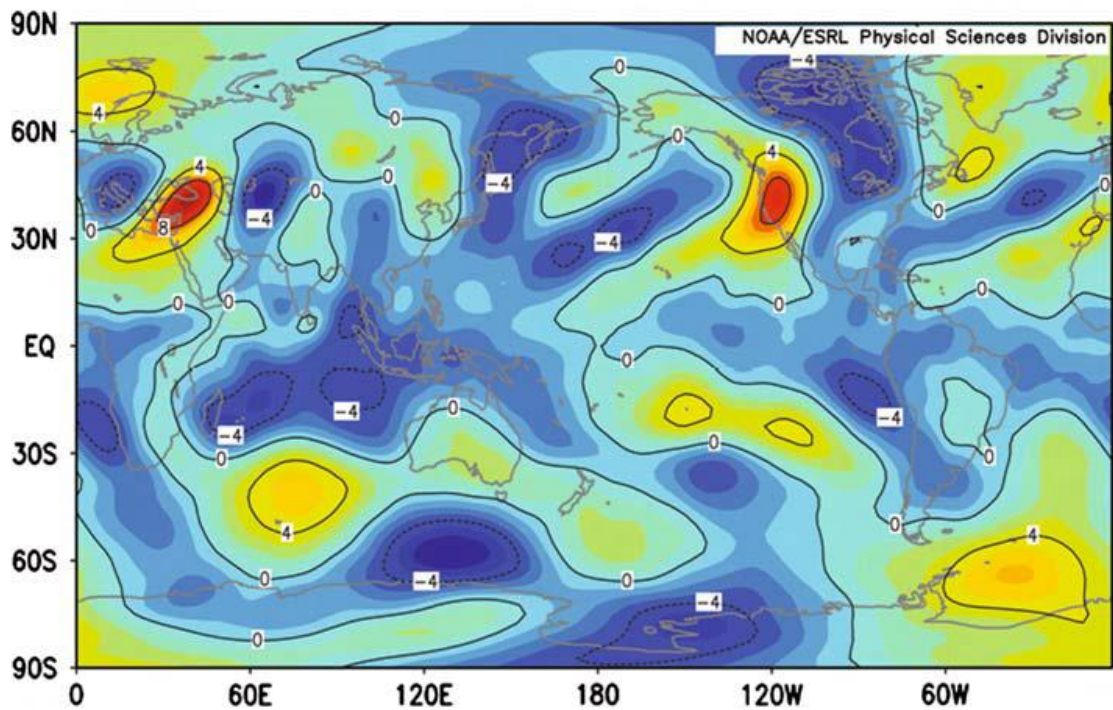
El principal corredor de tráfico aéreo entre Estados Unidos y Europa continental se encuentra entre los $45\text{--}65^\circ \text{N}$ y atraviesa el Atlántico norte; se trata de las llamadas rutas del Atlántico Norte (NAT, por sus iniciales en inglés). Las erupciones volcánicas provenientes de Islandia podrían interrumpir el tráfico aéreo que transita estas rutas. El mayor impacto podría suceder cuando los vientos meridionales soplen hacia el norte y los zonales sean débiles. En estas

circunstancias, las nubes serían transportadas hacia el sur e interceptarían directamente las rutas NAT. Una erupción que suceda en invierno se ajusta mejor a este escenario que una que ocurra en verano. A alturas menores (<5 km), los vientos meridionales de enero tienden a soplar hacia el sur, manteniendo las nubes provenientes de erupciones de altitudes más bajas lejos de Europa y de las principales rutas aéreas. En el caso de las nubes volcánicas que se originan en Islandia, una trayectoria más común es el movimiento hacia el este, con confinamiento hacia el norte y circunnavegación del polo. Si bien hay registros de esta trayectoria (Carn et al. 2008), representa una amenaza mucho menos grave para la aeronavegación debido a la baja densidad del tráfico aéreo a estas altas latitudes. Otra trayectoria posible de nubes originadas de erupciones ocurridas en Islandia es el transporte rápido hacia el este y luego hacia el sur, que lleva las nubes sobre el este de Europa hacia las muy transitadas rutas continentales. Esta trayectoria también se registró para una erupción del volcán Grimsvotn en 2004 (Witham et al. 2007), que causó algunas cancelaciones de vuelos en Europa, pero no se registraron incidentes graves.

Sobre las muy transitadas rutas aéreas transpacíficas (especialmente por tráfico aéreo de carga) que conectan Japón y Asia con Estados Unidos en su parte continental, la amenaza más importante la constituyen los volcanes que se encuentran en Kamchatka, así como los que están a lo largo de la cordillera Aleutiana y al suroeste de Alaska. Toda esta región es volcánicamente activa, y en ella sucedieron numerosos incidentes de aviación con nubes de cenizas generadas por volcanes. La mayor parte del año los vientos zonales se desplazan hacia el este, transportando detrito volcánico desde Japón y Kamchatka hacia la parte continental de Estados Unidos, que ingresa en el tráfico aéreo de mayor densidad. En esta región se registraron dos casos de incidentes de aviación que están debidamente documentados, ambos durante el invierno. En el caso del avión comercial KLM 747 que se dirigía hacia Anchorage, Alaska, desde Ámsterdam, Holanda, el encuentro ocurrió en diciembre de 1989 cerca del volcán Monte Redoubt (60,485° N, 152,742° O) (Casadevall 1994). El avión se dirigía hacia el sureste, en dirección de la pluma de cenizas que se desplazaba hacia el noroeste, transportada por los vientos medios de invierno (ver Figuras 4 a y 5 a).



(a) Long term mean meridional wind (ms^{-1}) 250 hPa, January



(b) Long term mean meridional wind (ms^{-1}), 250 hPa, July.



Fig. 5 Vientos meridionales (media a largo plazo) expresados en m s^{-1} para (a) enero y (b) julio (obtenido de NOAA/ESRL Physical Sciences Division, se puede consultar en: <http://www.cdc.noaa.gov/cgi-bin/PublicData/getpage.pl>)

La animación del modelo de dispersión (PUFF) de este encuentro se puede apreciar en: http://puff.images.alaska.edu/Redoubt_webpage/Puff_redoubt_ash.shtml. En esta región sucedió más recientemente, en febrero de 2000, un incidente cuando el volcán Cleveland ($52,82^{\circ}$ N, $167,95^{\circ}$ O) entró en erupción y emitió una extensa pluma de cenizas hacia el noreste, tal como se esperaba según la circulación del viento medio; se puede ver una animación de este suceso en:

http://puff.images.alaska.edu/animations/Cleve_021901_76.gif. Algunas cenizas también se dispersaron en dirección sur-sureste e interceptaron el tráfico frente a la costa oeste de los Estados Unidos. Se informó acerca de cuatro encuentros de aviones con cenizas en las cercanías del volcán y un encuentro a la altura de California a un nivel de vuelo de FL-300 con un B-747 (Simpson et al. 2002).

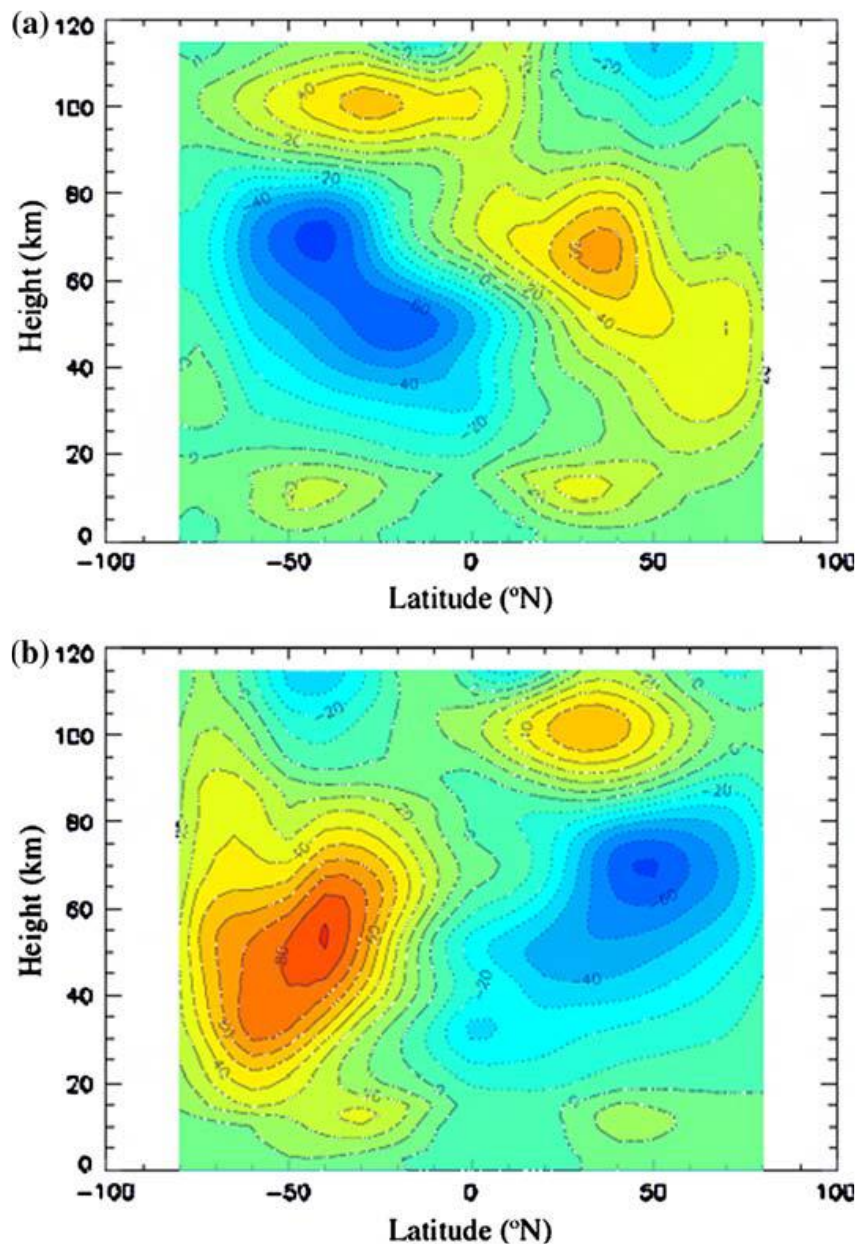


Fig. 6 Cortes transversales de la relación latitud/altitud de la media de los vientos zonales de (a) enero y (b) julio (según Fleming et al. 1988).⁵

⁵ N. de la T.: Traducción de las frases que están en inglés en la figura: *Latitude*: latitud; *Height*: altitud.

El tráfico aéreo está en aumento y se espera que crezca a una tasa anual de entre 2,2% y 4,7% durante el período comprendido entre 1990 y 2050 (ESCAP 2005). Existen diferencias regionales significativas en la tasa de crecimiento actual del tráfico aéreo así como en las tasas proyectadas. Los aumentos más altos se predicen para las regiones del Oriente Medio y el Pacífico asiático, debido a la mayor densidad de tráfico comercial y de carga que atraviesa la cuenca del Pacífico. Entre 2004 y 2007, el tráfico aéreo comercial creció a una tasa del 8,6% en la región de Asia y el Pacífico en comparación con el crecimiento del 6,8% registrado a nivel mundial. La región del Oriente Medio creció a una tasa anual promedio de 10,9%. El tráfico aéreo de carga también se está incrementando. Para el período comprendido entre 2002 y 2015, se espera un crecimiento de este tipo de tráfico a una tasa anual promedio de 6,4% para el Pacífico asiático, 6,6% para el Oriente Medio y 5,5% a escala mundial (ESCAP 2005). La región del Pacífico asiático también alberga muchos volcanes, aproximadamente 450, y alrededor del 50% de los volcanes activos en el mundo se encuentran a lo largo de la cuenca del Pacífico, el llamado “Cinturón de fuego”. Junto con la tendencia de pasar del uso de aviones de reacción de cuatro motores al uso de aviones bimotores, la flota aérea mundial ve crecer su vulnerabilidad a la pérdida de aviones debido a encuentros con nubes de ceniza volcánica. La Figura 7 muestra una estimación de la densidad mundial del tráfico aéreo sobre la base de emisiones de NO_x ocurrida en 2002 tomada de un inventario de emisiones de AERO2k (Eyres et al. 2004) para el mes de octubre y para niveles de vuelo desde FL 350 (altitud barométrica de 33 000 pies) hasta FL 390 (39 000 pies). Las emisiones de NO_x se emplean en este trabajo como una variable de sustitución de la densidad de tráfico aéreo y son un buen indicador del patrón espacial mundial de este tráfico. También se muestran en esta figura todos los volcanes del Holoceno que se conocen en la historia (Simkin and Seibert 1994). Las mayores densidades de tráfico se ven sobre Europa y América del Norte, con trayectorias notables a través del Atlántico norte (las NAT) y desde Japón hasta los centros urbanos de sudeste asiático. Para reflejar gráficamente la vulnerabilidad del tráfico aéreo a encuentros con nubes volcánicas, se superponen sobre la figura las observaciones de nubes de SO₂ realizadas mediante OMI de la erupción de Jabal al Tair ocurrida entre el 1 y el 10 de octubre de 2007. Eckhardt et al. (2008) estiman que la nube se trasladó en su mayor parte apenas por encima la tropopausa, a alturas de entre 14 y 16 km. Como la mayoría de los aviones comerciales vuelan a alrededor de 13 km (39 000 pies), es probable que no represente un problema para el tráfico aéreo que opera en la actualidad. Sin embargo, si en el futuro comienzan a operar las flotas de aviones HSCT, el detrito volcánico dispersado a grandes distancias de su fuente se tornará un riesgo creciente para estos aviones. Más tarde se modelaron trayectorias que sugieren que la nube puede haber reingresado en la tropósfera y haber virado hacia el sur y el oeste, hacia India, donde OMI también observó la nube, aunque a concentraciones mucho más bajas.

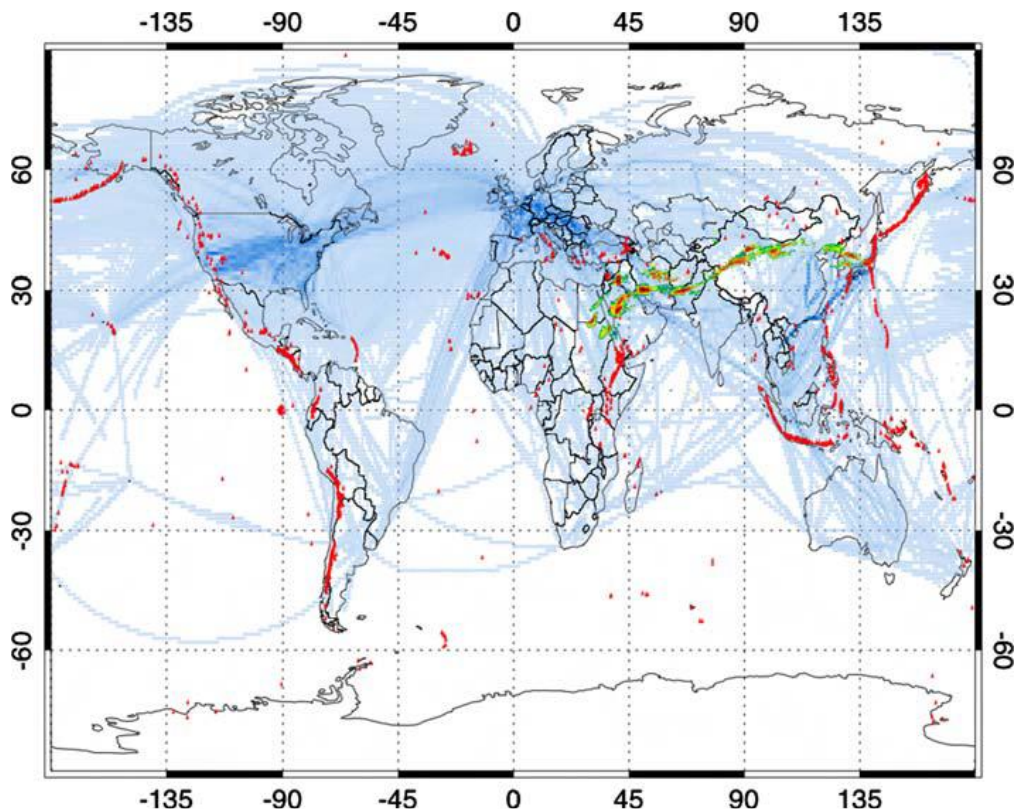


Fig. 7 Densidad mundial del tráfico aéreo según mediciones mensuales promedio de emisiones NOx para una altura entre FL 350 y FL 390 (altura barométrica desde 33 000 pies hasta 39 000 pies) tomadas del inventario de emisiones de AERO2k de Eyers et al. (2004). Las emisiones que se muestran corresponden a octubre de 2002. El código de colores está en escala lineal; las emisiones más importantes se representan en azul más oscuro. Los triángulos rojos indican las posiciones de los volcanes del Holoceno y los registrados en la historia tomado de la base de datos del Smithsonian Institution (Simkin and Siebert 1994). En el gráfico se indican más de 1200 volcanes. También se muestran las observaciones de la columna de SO₂ tomadas por OMI de la erupción del Jabal al Tair ocurrida durante el 1 y el 10 de octubre de 2007. Estos datos se encuentran en escala para mostrar las cantidades relativas de la columna por día, según la observación de OMI. En rojo se representan los valores más altos y en verde, los más bajos.

Dado el mayor tráfico aéreo que se desarrolla sobre la región de Asia y el Pacífico, y la cantidad de volcanes que se encuentran en esa área, se concluye que esta región será cada vez más vulnerable a encuentros entre aviones y nubes volcánicas. La posibilidad de un encuentro se ilustra usando los pronósticos de densidad de tráfico aéreo para 2025 y una erupción de un volcán remoto ubicado en las Islas Marianas del Norte. Desde 2003 hasta el presente, el volcán Anatahan de estas islas (16,35° N, 145,67° E) estuvo emitiendo nubes de cenizas a la atmósfera con regularidad. La ruta aérea que une Guam y Saipán con Japón pasa por arriba de este volcán y es frecuente que las nubes de ceniza que provienen de allí intercepten las rutas aéreas más importantes del sureste de Australia y de Filipinas hasta Japón y Corea. La Figura 8 muestra la coincidencia del tráfico aéreo pronosticado para abril de 2025 (FL 350 a FL 390) con volcanes y una nube de SO₂ del Anatahan captada por AIRS en abril de 2005. Esta nube cubrió un área de más de 1,3 millones de km² durante 3 días en abril, alcanzó una altura de por lo menos 15 km (~48 000 pies) y el tráfico aéreo fue desviado en varias ocasiones. La nube de cenizas y gases siguió esparciéndose hacia el oeste, y con el tiempo llegó a interceptar el espacio aéreo de Filipinas y continuó avanzando hacia el Mar del Sur de China. En la mayor parte del año, en esta región las erupciones tienen probabilidades de emitir las

cenizas hacia el oeste y hacia corredores aéreos que incluyen el sureste asiático, Japón, Corea y Australia.

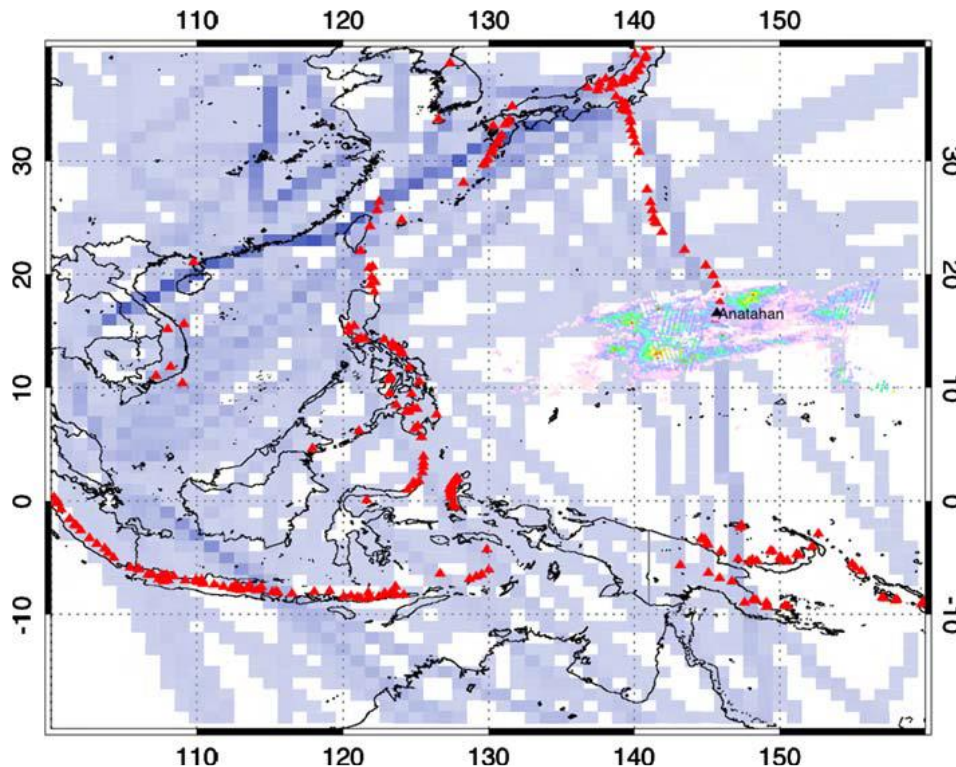


Fig. 8 Densidad de tráfico aéreo del Pacífico asiático a partir de emisiones de NO_x mensuales promedio para una altura de entre FL 350 y FL 390 (alturas barométricas de 33 000 pies hasta 39 000 pies) tomadas del inventario de emisiones de AERO2k de Eyers et al. (2004). Las emisiones pronosticadas que se muestran corresponden a abril de 2025. El código de colores está en escala lineal; las emisiones más importantes se representan en azul más oscuro. Los triángulos rojos indican las posiciones de los volcanes del Holoceno y los registrados en la historia tomado de la base de datos del Smithsonian Institution (Simkin and Siebert 1994). En el gráfico se indican más de 450 volcanes. También se muestran las observaciones de la columna de SO₂ tomadas por OMI de la erupción del Anatahan ocurrida durante el 6 y 8 de abril de 2005. Estos datos se encuentran en escala para mostrar las cantidades relativas de la columna por día, según la observación de AIRS. En rojo se representan los valores más altos y en lila, los más bajos.

6 Conclusiones

Los instrumentos satelitales tienen la capacidad de identificar y rastrear nubes de cenizas y SO₂ que representan un peligro y que se encuentran en la atmósfera durante períodos que van de horas a varias semanas. La ceniza tiene una duración considerablemente más breve (~horas) en la atmósfera que el SO₂ (~días a semanas) y es más difícil de identificar y cuantificar. La ceniza es mucho más peligrosa que el SO₂ para los aviones de reacción; de hecho, varios incidentes en que los motores se detuvieron completamente y que provocaron importante daño al fuselaje fueron adjudicados a las cenizas volcánicas. En circunstancias favorables, al parecer, el rastreo de nubes de SO₂ mediante satélites permite inferir el movimiento de las nubes de cenizas que presentan mayor peligro; sin embargo, es necesario tener cautela, ya que hay casos documentados (Schneider et al. 1999; Prata and Kerkmann 2007) en los que la ceniza y el SO₂ se separan y se desplazan en diferentes direcciones y a distintas alturas en la atmósfera. Desde el punto de vista operativo, no se dispone de

estimaciones de la altura de la nube de cenizas realizadas con satélites. El lidar CALIPSO puede brindar estimaciones excelentes para aerosoles (aerosol de H_2SO_4 en el caso de nubes volcánicas), pero la cobertura espacial horizontal y temporal deficiente torna a este instrumento inadecuado para uso operativo. El estudio recientemente elaborado por Eckhardt et al. (2008) demostró que es posible calcular el perfil de altura de inyección de la erupción mediante estimaciones satelitales de trayectorias de nubes volcánicas con modelos lagrangianos de dispersión. De esta manera, esta estimación mucho más objetiva de la altura de la nube puede emplearse para predecir el movimiento de la nube con mayor seguridad y precisión. En algunas regiones, donde se dispone de datos del infrarrojo tomados cada 15 minutos obtenidos de satélites geosincrónicos, será posible transmitir con certeza trayectorias en 3D de nubes volcánicas peligrosas para su uso en la industria de la aviación. Al recibir información sobre la ubicación (en altura y en el espacio horizontal) y el movimiento de las nubes volcánicas, las compañías aéreas podrán reprogramar las rutas según sea necesario y, a la vez, minimizar el uso de combustible extra. Los datos satelitales también pueden usarse para identificar nubes volcánicas que están compuestas predominantemente por SO_2 y/o cenizas volcánicas. Las compañías pueden emplear esta información para determinar los procedimientos apropiados de mantenimiento posterior necesarios en el caso de un encuentro con una nube volcánica. Como se sabe que la ceniza causa daño al motor y taponan los tubos estáticos pitot, y que el SO_2 no causa este tipo de daño, el uso de esta información puede brindar una ventaja de índole económica.

Es notable el crecimiento del tráfico aéreo comercial y de carga a escala mundial y regional, y el área del Pacífico asiático es la región que exhibe las más altas tasas anuales de crecimiento. En esta región también hay muchos volcanes y, en consecuencia, es factible el encuentro entre el tráfico aéreo y las nubes volcánicas. La introducción de flotas de HSCT que se desplazan a velocidades de hasta un Mach 2.5 y a alturas de hasta 20 km aumentará el riesgo de encuentros entre aviones y nubes volcánicas. Las velocidades mucho más altas de los aviones también requerirán tiempos de alertas mucho más breves, lo que conlleva la necesidad ya sea de contar con una constelación de instrumentos orbitando en el polo o con una red (5 a 6) de instrumentos geosincrónicos de escaneo rápido. Los mapas de vulnerabilidad pueden desarrollarse sobre la base de variables de sustitución para densidades de tráfico aéreo, que brindan una buena indicación del patrón espacial del tráfico aéreo. Hoy, los modelos de dispersión en la atmósfera pueden proveer pronósticos confiables del movimiento de las nubes volcánicas durante varios días a partir del inicio de la erupción, siempre que se cuente con buena información de la altura de inyección. Los mapas de densidad de tráfico aéreo, la corrida de modelos de dispersión, la ubicación de los volcanes y los análisis de vientos ofrecen los componentes para desarrollar escenarios de encuentros entre los aviones y las nubes volcánicas. Estos generadores de escenarios pueden emplearse para examinar los riesgos y la vulnerabilidad así como los problemas potenciales en caso de que comiencen a operar los aviones HSCT.

Apéndice

Tabla 4. Lista de siglas y acrónimos

ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
AIRS	<i>Atmospheric Infrared Spectrometer</i>
ATSR	<i>Along-Track Scanning Radiometer</i>
AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
CALIPSO	<i>Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations</i>
GOES	<i>Geosynchronous Orbiting Environmental Satellite</i>
GOME	<i>Global Ozone Monitoring Experiment</i>
HIRS	<i>High resolution Infrared Sounder</i>
HYSPLIT	<i>Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory</i>
IASI	<i>Infrared Atmospheric Sounding Interferometer</i>
IR	Infrarrojo
MetOP	<i>Operational meteorological satellite</i>
MLS	<i>Microwave Limb Sounder</i>
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MSG	<i>Meteosat Second Generation</i>
MUT	Tropósfera media y superior
NOAA	<i>National Oceanographic and Atmospheric Administration</i>
OMI	<i>Ozone Monitoring Instrument</i>
PUFF	<i>Volcanic Ash Tracking Model</i>
SCIAMACHY	<i>Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography</i>
SEVIRI	<i>Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager</i>
TIROS	<i>Television and Infrared Orbiting Satellite</i>
TOMS	<i>Total Ozone Mapping Spectrometer</i>
UV	Ultravioleta
VISSR	<i>Visible and Infrared Spin Stabilized Radiometer</i>

Referencias

- Barton IJ, Prata AJ, Watterson IG, Young SA (1992) Identification of the Mount Hudson volcanic cloud over SE Australia. *Geophys Res Lett* 19:1211–1214
- Bernard A, Rose WI (1984) The injection of sulfuric acid aerosols in the stratosphere by the El Chichon volcano and its related hazards to the international air traffic. *Nat Hazards* 3(1):59–67. doi:10.1007/BF00144974
- Bluth GJS, Schnetzler CC, Krueger AJ, Walter LS (1993) The contribution of explosive volcanism to global atmospheric sulphur dioxide concentrations. *Nature* 366:327–329
- Carn SA, Krueger AJ, Krotkov NA, Gray MA (2004) Fire at Iraqi sulfur plant emits SO₂ clouds detected by Earth Probe TOMS. *Geophys Res Lett* 31:L19105. doi:10.1029/2004GL020719
- Carn SA, Krotkov NA, Yang K, Hoff RM, Prata AJ, Krueger AJ, Loughlin SC, Levelt PF (2007) Extended observations of volcanic SO₂ and sulphate aerosol in the stratosphere. *Atmos Chem Phys Discuss* 7:2857–2871
- Carn SA, Prata AJ, Karlsdottir S (2008) Circumpolar transport of a volcanic cloud from Hekla (Iceland). *J Geophys Res* 113. doi:10.1029/2008JD009878
- Casadevall TJ (1994) The 1989/1990 eruption of Redoubt Volcano Alaska: impacts on aircraft operations. *J Volcanol Geotherm Res* 62(30):301–316
- Casadevall TJ, Delos Reyes PJ, Schneider DJ (1996) The 1991 Pinatubo eruptions and their effects on aircraft operations. En: Newhall CG, Punongbayan RS (eds) *Fire and mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo, Philippines*. Philippines Institute of Volcanology and Seismology, Quezon City, University of Washington Press, Seattle, pp 625–636

- Chahine MT, Pagano TS, Aumann HH, Atlas R, Barnet C, Blaisdell J, Chen L, Divakarla M, Fetzer EJ, Goldberg M, Gautier C, Granger S, Hannon S, Irion FW, Kakar R, Kalnay E, Lambriksen BH, Lee S-Y, LeMarshall J, McMillan WW, McMillin L, Olsen ET, Revercomb H, Rosenkranz P, Smith WL, Staelin D, Strow LL, Susskind J, Tobin D, Wolf W, Zhou L (2006) AIRS: improving weather forecasting and providing new data on greenhouse gases. *Bull Am Meteorol Soc* 87:910–926. doi:10.1175/BAMS-87-7-911
- Clerbaux C, Hadji-Lazaro J, Turquety S, George M, Coheur P-F, Hurtmans D, Wespes C, Herbin H, Blumstein D, Tournier B, Phulpin T (2007) The IASI/MetOp I mission: first observations and highlights of its potential contribution to GMES. *COSPAR Inf Bull* 2007:19–24
- Constantine EK, Bluth GJS, Rose WI (2000) TOMS and AVHRR sensors applied to drifting volcanic clouds from the august 1991 eruptions of Cerro Hudson. En: Mouginiis-Mark P, Crisp J, Fink J (eds) *AGU Monograph 116—Remote Sensing of Active Volcanism*, pp 45–64
- Eckhardt S, Prata AJ, Seibert P, Steibel K, Stohl A (2008) Estimation of the vertical profile of sulfur dioxide injection into the atmosphere by a volcanic eruption using satellite column measurements and inverse transport modeling. *Atmos Chem Phys Discuss* 8:3761–3805
- Eisinger M, Burrows JP (1998) Tropospheric sulfur dioxide observed by the ERS-2 GOME instrument. *Geophys Res Lett* 25(22):4177–4180
- Ellrod GP, Connell BH, Hillger DW (2003) Improved detection of airborne volcanic ash using multispectral infrared satellite data. *J Geophys Res* 108(D12):4356. doi:10.1029/2002JD002802
- ESCAP (2005) Review of developments in transport in Asia and the Pacific 2005, United Nations Publ., No. E.06.II.F.9, ST/ESCAP/2392, 172 pp
- Eyers CJ, Norman P, Middel J, Michot S, Atkinson K, Christou RA (2004) AERO2k global aviation emissions inventories for 2002 and 2025. European Commission Contract, No. G4RD-CT-2000-00382, QINETIQ/04/0113, 144 pp
- Fleming EL, Chandra S, Shoerberl MR, Barnett JJ (1988) Monthly mean global climatology of temperature, wind, geopotential height and pressure for 0–120 km. National Aeronautics and Space Administration, Technical Memorandum 100697, Washington, DC
- Guffanti M, Albersheim S (2008) The United States national volcanic ash operations plan for aviation. *Nat Hazards Special Issue: Aviation hazards from volcanoes*. doi:10.1007/s11069-008-9247-1
- Hanstrum BN, Watson AS (1983) A case study of two eruptions of Mount Galunggung and an investigation of volcanic eruption cloud characteristics using remote sensing techniques. *Aust Meteorol Mag* 31:131–177
- Hillger DW, Clark JD (2002a) Principal component image analysis of MODIS for volcanic ash. Part I: most important bands and implications for future GOES imagers. *J Appl Meteorol* 41:985–1001
- Hillger DW, Clark JD (2002b) Principal component image analysis of MODIS for volcanic ash. Part II: simulation of current GOES and GOES-M imagers. *J Appl Meteorol* 41:1003–1010
- Holasek RE, Rose WI (1991) Anatomy of 1986 Augustine volcano eruptions as recorded by multispectral images processing of digital AVHRR weather satellite data. *Bull Volcanol* 53:42–435
- Holasek RE, Woods AW, Self S (1996) Experiments on gas-ash separation processes in volcanic umbrella clouds. *J Volcanol Geotherm Res* 70:169–181
- Krotkov NA, Carn SA, Krueger AJ, Bhartia PK, Yang K (2006) Band residual difference algorithm for retrieval of SO₂ from the Aura Ozone Monitoring Instrument (OMI). *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 44(5):1259–1266
- Krueger AJ (1983) Sighting of El Chichon sulfur dioxide clouds with the nimbus 7 total ozone mapping spectrometer. *Science* 220:1377–1379
- Krueger AJ, Walter LS, Bhartia PK, Schnetzler CC, Krotkov NA, Sprod I, Bluth GJS (1995) Volcanic sulfur dioxide measurements from the total ozone mapping spectrometer instruments. *J Geophys Res* 100(D7):14057–14076
- Krueger AJ, Schaefer SJ, Krotkov N, Bluth GJS, Baker S (2000) Ultraviolet remote sensing of volcanic emissions. En: Mouginiis-Marks PJ, Crisp JA, Fink JH (eds) *Remote sensing of active volcanism*. *Geophys Monogr Ser* 116:2543, AGU, Washington, DC
- Malingreau J, Kaswanda P (1986) Monitoring volcanic eruptions in Indonesia using weather satellite data: the Colo eruption of July 28, 1983. *J Volcanol Geotherm Res* 27(1–2):179–194

- Matson M (1984) The 1982 El Chichon volcano eruptions—a satellite perspective. *J Volcanol Geotherm Res* 23:1–10
- Miller TP, Casadevall TJ (1999) Volcanic ash hazards to aviation. En: Sigurdsson H, Houghton B, McNutt SR, Ryman H, Stix J (eds) *Encyclopedia of volcanoes*. Academic Press, San Diego, pp 915–930
- Mosher FR (2000) Four channel volcanic ash detection algorithm, Preprint Volume. 10th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, Long Beach, California, 9–14 January, 2000, pp 457–460
- Pavolonis MJ, Feltz WF, Heidinger AK, Gallina GM (2006) A daytime complement to the reverse absorption technique for improved automated detection of volcanic ash. *J Atmos Oceanic Technol* 23:1422–1444
- Pergola N, Tramutoli V, Marchese F, Scaffidi I, Lacav T (2004) Improving volcanic ash cloud detection by a robust satellite technique. *Remote Sens Environ* 90:1–22
- Pieri D, Ma C, Simpson JJ, Hufford G, Grindle T, Grove C (2002) Analyses of in-situ airborne ash from the February 2000 eruption of Hekla volcano, Iceland. *Geophys Res Lett* 29:16. doi:10.1029/2001GL013688
- Prata AJ (1989a) Observations of volcanic ash clouds using AVHRR-2 radiances. *Int J Remote Sens* 10(4–5):751–761
- Prata AJ (1989b) Radiative transfer calculations for volcanic ash clouds. *Geophys Res Lett* 16(11):1293–1296
- Prata AJ, Grant IF (2001) Retrieval of microphysical and morphological properties of volcanic ash plumes from satellite data: application to Mt. Ruapehu, New Zealand. *Q J R Meteorol Soc* 127(576B):2153–2179
- Prata AJ, Kerkmann J (2007) Simultaneous retrieval of volcanic ash and SO₂ using MSG-SEVIRI measurements. *Geophys Res Lett* 34:L05813. doi:10.1029/2006GL028691
- Prata AJ, Bluth GJS, Rose WI, Schneider DJ, Tupper AC (2001) Comments on Failures in detecting volcanic ash from a satellite-based technique. *Remote Sens Environ* 78:341–346
- Prata AJ, Rose WI, Self S, O'Brien DM (2003) Global, long-term sulphur dioxide measurements from TOVS data: a new tool for studying explosive volcanism and climate. *Volcanism and the Earth's atmosphere, geophysics monograph 139 AGU*, pp 75–92
- Prata AJ, Carn SA, Stohl A, Kerkmann J (2007) Long range transport and fate of a stratospheric volcanic cloud from Soufriere hills volcano, Montserrat. *Atmos Chem Phys* 7:5093–5103
- Richardson AJ (1984) El Chichon volcanic ash effects on atmospheric haze measured by NOAA-7 AVHRR data. *Remote Sens Environ* 16:157–164
- Richter A, Wittrock F, Burrows JP (2006) SO₂ measurements with SCIAMACHY. In: *Proceedings of the first conference on atmospheric science, Frascati, Italy, 8–12 May 2006*. ESA publication SP-628
- Rose WI, Delene DJ, Schneider DJ, Bluth GJS, Kruger AJ, Sprod I, McKee C, Davies HL, Ernst GJ (1995) Ice in the 1994 Rabaul eruption: implications for volcanic hazard and atmospheric effects. *Nature* 375:477–479
- Sawada Y (1987) Study on analysis of volcanic eruptions based on eruption cloud image data obtained by the Geostationary Meteorological Satellite (GMS). *Technical reports of the Meteorological Research Institute*, vol 22, 335 pp
- Sawada Y (1996) Detection of explosive eruptions and regional tracking of volcanic ash clouds with geostationary meteorological satellites (GMS). En: Scarpa R, Tilling RI (eds) *Monitoring and mitigation of volcano hazards*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp 299–314
- Schneider DJ, Rose WI, Kelley L (1995) Tracking of 1992 eruption clouds from Crater Peak of Mount Spurr volcano, Alaska, using AVHRR. *US Geol Surv Bull* 2139:27–36
- Schneider DJ, Rose WI, Coke LR, Bluth GJS (1999) Early evolution of a stratospheric volcanic eruption cloud as observed with TOMS and AVHRR. *J Geophys Res* 104(D4):4037–4050
- Simkin T, Seibert L (1994) *Volcanoes of the world*, 2da ed. Geoscience Press, Tucson
- Simpson JJ, Hufford G, Pieri D, Berg J (2000) Failures in detecting volcanic ash from a satellite-based technique. *Remote Sens Environ* 72:191–217
- Simpson JJ, Hufford G, Pieri D, Servranckx R, Berg J (2002) The february 2001 eruption of Mount Cleveland, Alaska: case study of an aviation hazard. *Weather Forecast* 17:691–704

- Thomas W, Erbetseder T, Ruppert T, Van Roozendaal M, Verdebout J, Balis D, Meleti C, Zerefos C (2004) On the retrieval of volcanic sulfur dioxide emissions from GOME backscatter measurements. *J Atmos Chem* 50:295–320. doi:10.1007/s10874-005-5079-5
- Torres O, Bhartia PK, Herman JR, Ahmad Z, Gleason J (1998) Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation: theoretical basis. *J Geophys Res* 103(D14):17099–17110
- Tupper A, Carn SA, Davey J, Kamada Y, Potts RJ, Prata AJ, Tokuno M (2004) An evaluation of volcanic cloud detection techniques during recent significant eruptions in the western ring of fire. *Remote Sens Environ* 91:27–46
- Urai M (2004) Sulfur dioxide flux estimation from volcanoes using advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer—a case study of Miyakejima volcano, Japan. *J Volcanol Geotherm Res* 134(1–2):1–13
- Van Geffen J, Van Roozendaal M, Di Nicolantonio W, Tampellini L, Valks P, Erbetseder T, Van der AR (2007) Monitoring of volcanic activity from satellite as part of GSE PROMOTE. Proceedings of the first conference on atmospheric science, Frascati, Italy, 8–12 May 2006. ESA publication SP-628
- Watkin SC (2003) The application of AVHRR data for the detection of volcanic ash in a volcanic ash advisory centre. *Meteorol Appl* 10:301–311
- Wei C-F, Larson SM, Patten KO, Wuebbles DJ (2001) Modeling of ozone reactions on aircraft-related soot in the upper troposphere and lower stratosphere. *Atmos Environ* 35:6167–6180
- Wen S, Rose WI (1994) Retrieval of sizes and total masses of particles in volcanic clouds using AVHRR bands 4 and 5. *J Geophys Res* 99(D3):5421–5431
- Witham CS, Hort MC, Potts R, Servranckx R, Husson P, Bonnardot F (2007) Comparison of VAAC atmospheric dispersion models using the 1 November 2004 Grimsvtn eruption. *Meteorol Appl* 14:27–38
- Yu T, Rose WI, Prata AJ (2002) Atmospheric correction for satellite-based volcanic ash mapping and retrievals using split window IR data from GOES and AVHRR. *J Geophys Res* 107(D16):4311. doi:10.1029/2001JD000706

Satellite detection of hazardous volcanic clouds and the risk to global air traffic

A. J. Prata

Received: 9 February 2008 / Accepted: 13 June 2008 / Published online: 30 July 2008
© Springer Science+Business Media B.V. 2008

Abstract Remote sensing instruments have been used to identify, track and in some cases quantify atmospheric constituents from space-borne platforms for nearly 30 years. These data have proven to be extremely useful for detecting hazardous ash and gas (principally SO₂) clouds emitted by volcanoes and which have the potential to intersect global air routes. The remoteness of volcanoes, the sporadic timings of eruptions and the ability of the upper atmosphere winds to quickly spread ash and gas, make satellite remote sensing a key tool for developing hazard warning systems. It is easily recognized how powerful these tools are for hazard detection and yet there has not been a single instrument designed specifically for this use. Instead, researchers have had to make use of instruments and data designed for other purposes. In this article the satellite instruments, algorithms and techniques used for ash and gas detection are described from a historical perspective with a view to elucidating their value and shortcomings. Volcanic clouds residing in the mid- to upper-troposphere (heights above 5 km) have the greatest potential of intersecting air routes and can be dispersed over many 1,000s of kilometres by the prevailing winds. Global air traffic vulnerability to the threat posed by volcanic clouds is then considered from the perspectives of satellite remote sensing, the upper troposphere mean wind circulation, and current and forecast air traffic density based on an up-to-date aircraft emissions inventory. It is concluded that aviation in the Asia Pacific region will be increasingly vulnerable to volcanic cloud encounters because of the large number of active volcanoes in the region and the increasing growth rate of air traffic in that region. It is also noted that should high-speed civil transport (HSCT) aircraft become operational, there will be an increased risk to volcanic debris that is far from its source location. This vulnerability is highlighted using air traffic density maps based on NO_x emissions and satellite SO₂ observations of the spread of volcanic clouds.

Keywords Hazardous volcanic clouds · Global air traffic risk · Satellite measurements

A. J. Prata (✉)
Norwegian Institute for Air Research, P.O. Box 100, 2027 Kjeller, Norway
e-mail: fpr@nilu.no

1 Introduction

The unpredictability of volcanic eruptions (both in timing and in location) have led to many disasters. In modern historical times, catastrophes due to volcanic eruptions can be found in the literature, in some cases causing social, economic and political upheaval. Until the last 60 years or so, major hazards due to volcanic eruptions have been localized within the region surrounding the eruption. The most far-reaching effects have come from large eruptions which can disrupt the Earth's climate system on the time-scale of years. With the advent of inter-continental passenger jet travel, a new hazard from volcanic eruptions has emerged. Volcanic eruptions can inject large quantities of volcanic ash and gases into the atmosphere at heights that range from the summit of the volcano to as high as 50 km in the most energetic eruptions (e.g. Pinatubo, Philippines, 15.13° N, 20.35° E, 10–15 June, 1991). Once aloft, winds can transport the ash and gases rapidly and in multiple directions which depend on the wind speed and wind shear (the change in wind direction with height). Within the jet stream, wind speeds may reach 100 m s^{-1} (360 km hr^{-1}) so that transport over long distances in just a few hours is possible. The ash can cause extensive damage to aircraft, stalling engines, abrading windscreens and damaging sensitive avionics equipment (Casadevall 1994; Casadevall et al. 1996). Volcanic gases, specifically SO_2 may also pose a hazard to aircraft, and because gas and ash have different specific gravities they may separate and travel at different speeds and different heights in a sheared atmosphere (Holasek et al. 1996).

Coupled with the problem of forecasting the onset of eruptions and tracking their movement, is the difficulty of discriminating hazardous volcanic clouds from more common meteorological clouds. Even with the full knowledge of a volcanic eruption in progress, airline authorities do not have sufficient information to be able to confidently ensure the safety of jet aircraft. The logistical challenges faced by the airline industry are large: there are more than 70 volcanoes known to be active at present, eruptions occur on average about once per week somewhere over the globe, the eruptions are unpredictable, most volcanoes are remote and not routinely monitored, volcanic clouds can spread more than 1,000 km in less than 3 h and on board detection of these hazardous clouds is not currently possible (aircraft radar cannot detect micron size particles or gases). The current global airline fleet consists of about 18,000 aircraft and there is an increasing trend towards 2-engine jets, away from 4-engine aircraft. This is an important aspect in the assessment of aircraft safety as the ash directly affects the engines, causing them to stall. Having fewer engines exacerbates the risk of total loss of power and consequent disaster. Another development of concern is the proposed introduction of high-speed civil transport (HSCT) aircraft that will cruise at altitudes of 20 km or so. At these altitudes, as we shall see, there is greater likelihood of an encounter with volcanic debris far from its source. Forecasts suggest fleets of up to 1,000 HSCT aircraft may be operating by 2015 (Wei et al. 2001).

Satellite-based information provides a valuable asset to airline operations and this has been recognized for some time (Sawada 1987; Miller and Casadevall 1999). Initially, weather satellite data were used to monitor the movement of ash clouds, but later it was found that a combination of certain infrared channels could be used to discriminate ash clouds from meteorological clouds (Prata 1989a, b). Since these early discoveries and with satellite instrument technology advances, new and improved systems have been developed for ash detection and monitoring. These systems have also been applied to detect volcanic SO_2 gas. In this article we provide an overview of the advances made in utilizing satellite-based techniques for volcanic ash and gas detection and monitoring.

The article is organized as follows: we begin with a brief historical overview, reaching back 30 years to the start of the meteorological satellite era and describing how satellite instruments have been used to monitor and detect hazardous volcanic clouds. Next, the main techniques and progress made with satellite ash detection is presented, followed by a similar discussion for SO₂ detection. A threat analysis, based on the mean wind circulation and a proxy for air traffic density is developed to look at global and regional aviation vulnerabilities to hazardous volcanic clouds. Finally, some conclusions are made regarding the way that satellite data can be used to assist the aviation industry avoid hazardous volcanic clouds.

2 Historical overview

Sawada (1987) was the first person to provide a methodological survey of volcanic ash clouds and plumes using satellite imagery. He made use of geosynchronous weather satellite imagery (the Geostationary Meteorological Satellite—GMS¹) to document volcanic eruptions and ash cloud dispersion within the western Pacific region. Sawada (1996) found that the detection rate from GMS imagery was about 13.7% of all known eruptions during the period late 1977–1985. This apparent low detection rate is attributed to the interference from meteorological clouds. Restrictions on the spatial (clouds smaller than about 5 km were not detectable) and spectral sampling (only single visible and infrared channels were available from GMS) also contributed to the low detection rate. Malingreau and Kaswanda (1986) used satellite imagery (AVHRR) to study the Colo, Indonesia eruption of 28 July, 1983, which is also known to have caused problems for jet aircraft operating in the region. Hanstrum and Watson (1983) studied the April, 1992 Galunggung, Indonesia eruptions from a meteorological perspective and noted the usefulness of satellite data in detecting ash plumes. Krueger (1983), Krueger et al. (1995) and Krueger et al. (2000) have shown that ultra-violet measurements from TOMS, designed to measure ozone, could be used to track volcanic SO₂ clouds. Carn et al. (2004) has shown that TOMS could also be used to measure man-made SO₂ emissions.

The theoretical basis for using infrared satellite imagery to discriminate volcanic ash clouds from meteorological clouds was provided in articles by Prata (1989a, b), and later extended by Wen and Rose (1994). The original method proposed by Prata (1989a) or variants of it are in use today by the Volcanic Ash Advisory Centres (VAACs). The method relies on taking the difference between two images acquired at two slightly different wavelengths within the infrared window, between 8 and 12 μm. Ash clouds are composed mostly of silicate particles and these absorb, scatter and re-emit infrared radiation in a different manner to ice and water, the main components of meteorological ‘weather’ clouds. This important difference allows a discrimination between clouds composed mostly of ash and those composed mostly of water and ice. When mixtures occur, as they invariably do in the turbulent atmosphere, the ability to discriminate is proportionally reduced, or in some instances rendered ineffective, for example when the ash particles are completely coated by ice (Rose et al. 1995). Despite some shortcomings of this “reverse absorption” technique, it remains the most effective means of detecting and discriminating volcanic ash clouds from satellite imagery.

In tandem with the developments of infrared satellite techniques, researchers had found that the ultra-violet portion of the electromagnetic spectrum could also be applied to the

¹ See the Appendix for a full list of all acronyms used in this article.

study of volcanic clouds. Krueger (1983) was the first to recognize the usefulness of satellite UV measurements for studying the spread of SO₂ in the eruption clouds from El Chichon, Mexico in 1982. He used TOMS UV imagery to show the movement of the SO₂ clouds around the globe. Originally designed to measure ozone, TOMS has now been providing detections of global volcanic SO₂ clouds for almost 30 years.

The principles behind using UV to measure and quantify volcanic substances (both SO₂ and volcanic ash can be identified) are described by Krueger et al. (1995) for the TOMS instrument and more recently by Krotkov et al. (2006) for the Ozone Monitoring Instrument (OMI). The SO₂ retrievals rely on the use of backscattered solar ultra-violet radiation that is preferentially affected by bands of SO₂ in the 280–320 nm wavelength range. The use of multiple bands permits separation of some of the confounding effects due to other molecules (e.g. O₃), reflections off the surface, Rayleigh multiple scattering and absorption by aerosols and clouds. Volcanic ash is detected by calculating an aerosol absorbing index (e.g. Torres et al. 1998) based on a ratio of two bands. Although this technique does not discriminate ash from other absorbing aerosols, the context of the measurements is usually sufficient to infer that ash is the aerosol responsible for the absorption.

Visible light has also been used to infer the presences of volcanic debris in the atmosphere. Matson (1984) used GOES and NOAA AVHRR satellite data and Richardson (1984) used NOAA AVHRR satellite data to measure the change in transparency of the atmosphere due to the eruption clouds of El Chichon.

These early attempts at utilizing satellite imagery in studying volcanic clouds were refined and improved after the major eruptions of Pinatubo, Philippines in June 1991. More than 30 cases of ash/aircraft encounters have been documented (Casadevall et al. 1996) and the mainly logistical problem of providing timely warnings to aircraft became apparent. Following the problems from this eruption, a network of ash advisory centres (VAACs) was set up, with nodes at Darwin, Australia, Tokyo, Japan, Anchorage, Alaska, Buenos Aires, Argentina, Montreal, Canada, Toulouse, France, Washington DC, USA and London, England. The VAACs provide advisories for their regions of responsibility and these cover the majority of the globe and include all the major air-routes. The operations of the VAACs are improving all the time—with the advent of satellite instruments with better spatial, temporal and spectral resolutions, and greatly improved data delivery services, much of the focus has moved from a reactive mode to a forecasting and pre-emptive mode. The forecasting of dispersing ash clouds has become a major activity of research and is discussed elsewhere in *this issue*. Logistical problems and operations at VAACs and at airports are also of major importance and are discussed by Guffanti and Albersheim (2008). Here we focus on satellite detection of volcanic clouds.

3 Volcanic ash detection from satellites

The problem of detecting volcanic clouds from satellites is really a problem of discrimination. Clouds absorb, emit and scatter radiation in the visible, infrared and microwave regions of the electromagnetic spectrum. At visible wavelengths, depending on the geometry of illumination (by the Sun or using a laser light source) and the geometry of observation, clouds may appear bright or dark. This is true of clouds of water, ice, silicates (volcanic ash), wind-blown dust (desert dust), smoke (e.g. from a large forest fire) or any other naturally or anthropogenically generated cloud of particles. It is sometimes very clear that a particular cloud is meteorological in origin (for example, a cloud of water droplets or ice particles, or a mixed phase cloud), but often not so clear that it is not a meteorological

cloud. Figure 1a–h shows some satellite images of clouds and aerosols in the atmosphere. These are daytime MODIS images that have been enhanced to provide a “true-colour” rendition of the scene. In all scenes there are meteorological clouds and clouds due to other

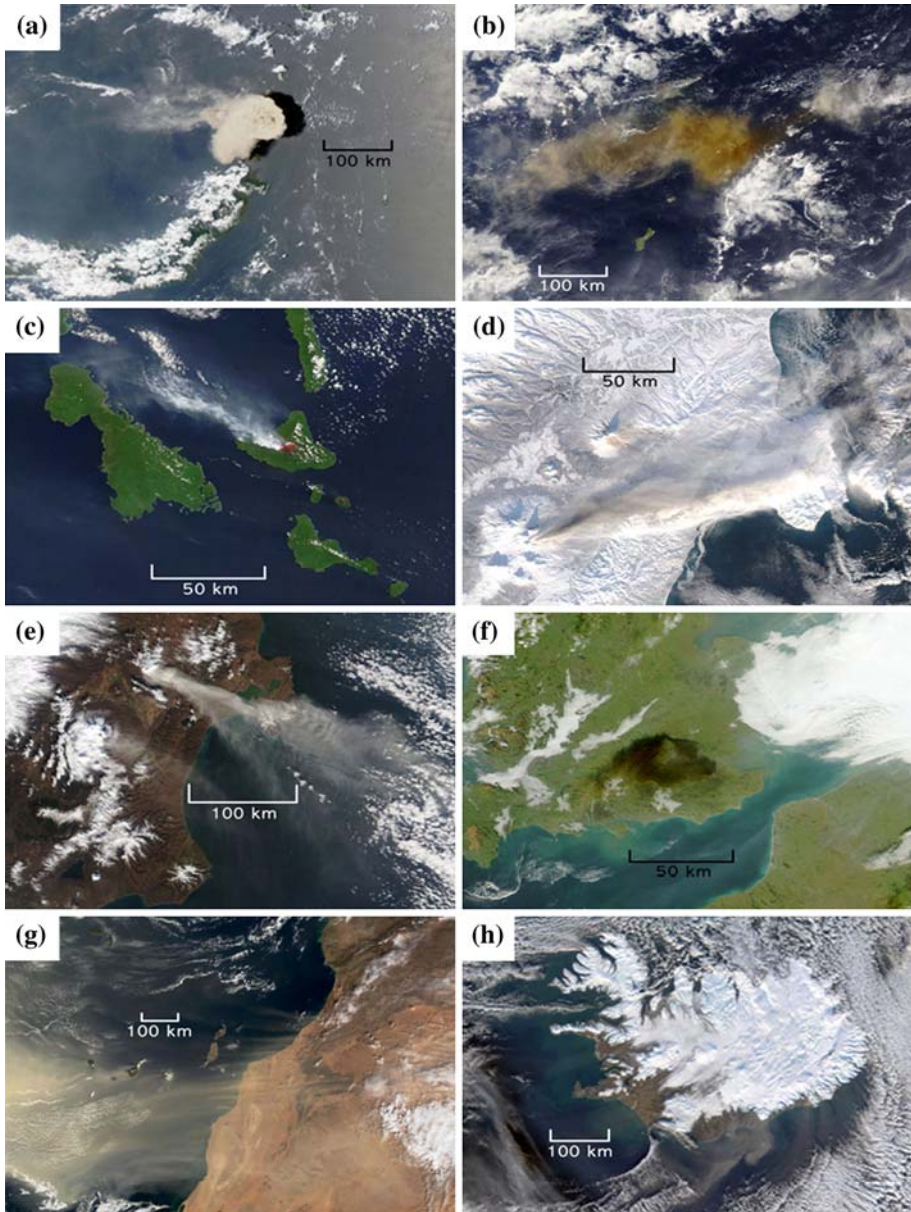


Fig. 1 Daytime MODIS scenes showing “anomalous” clouds. (a) Thick ash column from Ruang volcano, (b) drifting ash and gas plumes from Karthala volcano, (c) low-level gas cloud plume, (d) ash and gas plume over snow-covered terrain (Kluichevskoi volcano), (e) ash and gas plume from Kluichevskoi during the summer, (f) a noxious gas cloud from an industrial fire in southern England, (g) a dust outbreak over the Canary islands and (h) wind-blown ash streaming off the southern coast of Iceland

sources: (a) a thick ash column rising above Ruang volcano (Sangihie islands, Indonesia, 125.37° E, 2.30° N), (b) a drifting ash and gas plume recently emitted from Karthala volcano, Comoros (11.75°S, 43.38° E), (c) a low-level gas (predominantly SO₂ and H₂O) from Ambrym volcano, Vanuatu (16.25°S, 168.12° E), (d) an ash and gas plume over snow-covered terrain from Kluchevskoi volcano, Kamchatka (56.057° N, 160.638° E), (e) an ash and gas plume from Kluchevskoi, but in the summer, (f) a noxious cloud generated from an industrial accident in southern England, (g) a dust outbreak travelling westwards over the Canary Islands (28.00° N, 15.58° W) and (h) wind-blown ash off the coast of Iceland. These examples illustrate some of the variability found in anomalous clouds when viewed by satellites during the day. Some clouds appear almost black (Fig. 1f) or dark grey (Fig. 1h), some are as white as water/ice clouds (Fig. 1c and d), whilst others take various sandy shades with brown and yellow hues (Fig. 1a, b, e and g). By using objective analysis of daytime visible imagery alone, it has been very difficult to unambiguously discriminate ash clouds from other clouds. During the nighttime, the task is made even more difficult. This is the main reason why infrared data has proven to be of great use. There are now several ash detection algorithms in use or proposed, based on IR and visible satellite data. Table 1 shows a summary of ash detection schemes (with original references), based mostly on using infrared channels.

The two channel, reverse absorption technique is very useful in cases where the ash is not too thick and not too dispersed and is used at the VAACs (Watkin 2003). Figure 2 shows an application of the technique for the eruption of Karthala (Fig. 1b). In this case, the ash hazard is depicted using shades of yellow to red, with red suggesting more dense ash and greater hazard. Note that the white coloured clouds seen in the true colour image (Fig. 1b) of this event are not detected as an ash hazard. But note too that the edges of several clouds are detected as a potential ash hazard, whereas it seems more likely that these are meteorological clouds. The problems and pitfalls of using the reverse absorption technique have been discussed in the research literature (e.g. Simpson et al. 2000; Prata et al. 2001) and are well known to experienced meteorological analysts. Context is a key element in determining whether a particular cloud is an ash hazard or not, and trained meteorologists tasked with identifying ash clouds will use multiple sources of information including satellite imagery, pilot reports, ground observer reports, wind trajectories and background information regarding regional volcanic activity and prior behaviour.

Table 1 Summary of ash detection algorithms and techniques used with satellite infrared (IR) and visible channel data

Name	Principle	Reference
RA	2-band IR (11 and 12 μm)	Prata (1989a, b)
Ratio	2-band IR (11 and 12 μm)	Holasek and Rose (1991)
4-band	IR + visible	Mosher (2000)
TVAP	3-band IR (3.9, 11 and 12 μm)	Ellrod et al. (2003)
PCI	Multi-band principal components	Hillger and Clark (2002a, b)
WVC	2-band IR + water vapour correction	Yu et al. (2002)
RAT	3-band IR (3.5, 11, 12 μm)	Pergola et al. (2004)
3-band	3-band (IR and visible)	Pavolonis et al. (2006)

RA = Reverse absorption; TVAP = Three band volcanic ash product; PCI = Principle components; RAT = Ratio method; WVC = Water vapor correction method

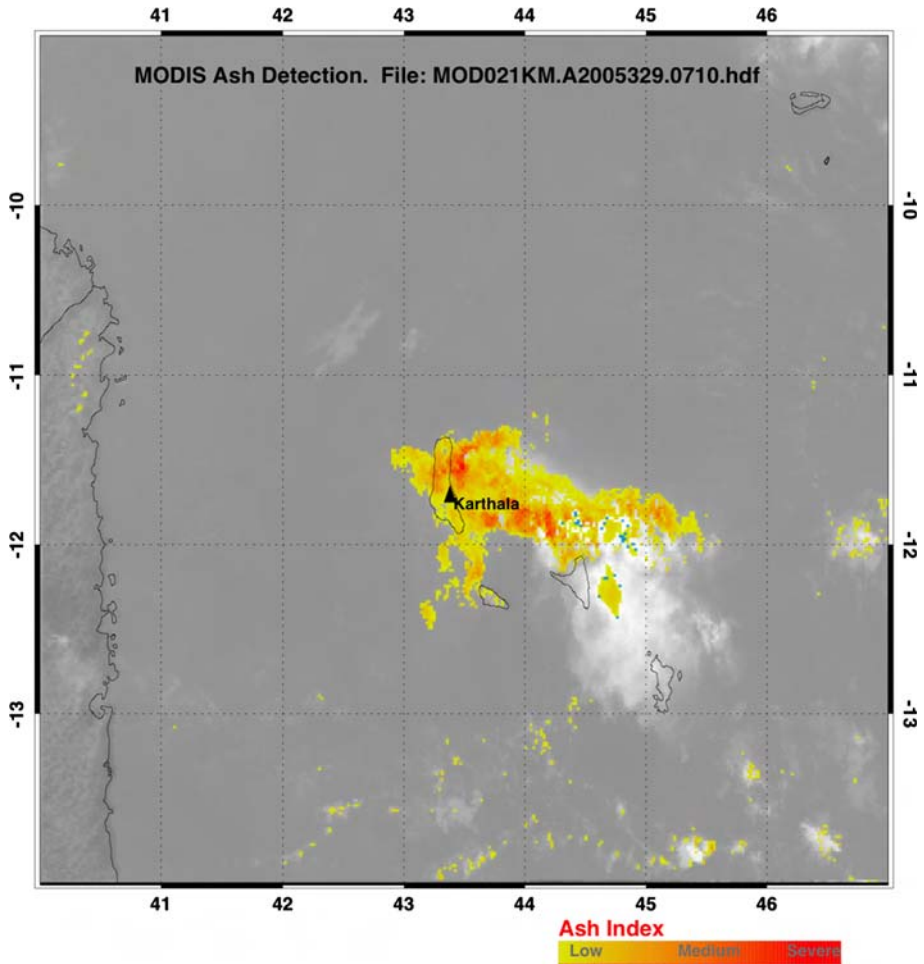


Fig. 2 An ash “risk” map for the Karthala eruption shown in Fig. 1b, based on the reverse absorption technique using two infrared channels. Regions of greatest risk are coloured red. Grey regions are believed to be “ash free”

It is possible to take the infrared analysis one step further. Wen and Rose (1994) and Prata and Grant (2001) have shown that by including a microphysical model of the ash particles with a detailed radiative transfer model, the infrared data can be inverted to reveal mean particle size and cloud opacity. When these parameters are integrated over the area covered by the cloud, the total mass and mass loading can be inferred from the data. These are quantifiable products that may be incorporated with dispersion models to generate risk maps for use by the aviation industry. An example of this kind of retrieval is given in Fig. 3, also for the Karthala eruption. There are many satellites (polar and geosynchronous) that carry these infrared channels, so this product can be delivered globally. Table 2 gives details of some of the satellite instruments capable of providing ash mass loadings.

Two of the instruments listed in Table 2 are capable of measuring much more than ash mass loadings. These instruments, AIRS (Chahine et al. 2006) and IASI (Clerbaux et al. 2007) have high spectral resolution and by utilizing more measurement channels it may be

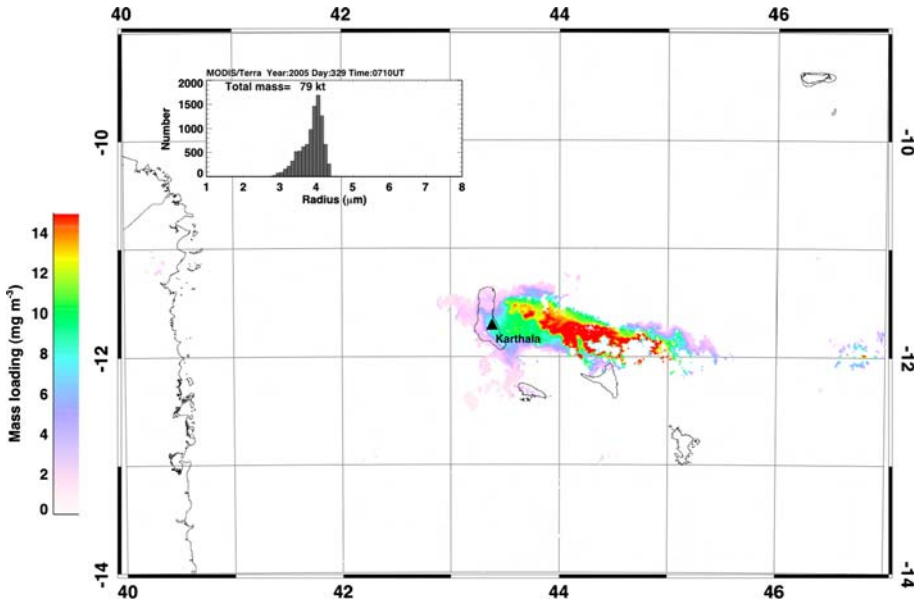


Fig. 3 Ash mass loading retrievals for the Karthala eruption shown in Fig. 1b

Table 2 Details of past and current satellite instruments that can be used to detect ash and generate ash mass loading maps from infrared measurements

Satellite	Instrument	Spatial resolution (km × km)	Temporal resolution (per day)	Time period covered (present)
NOAA	AVHRR-2, -3	1 × 1	2	1981
NOAA	HIRS-2, -3, -4	10 × 10 ^a	2	1979
GOES	VISSR/VAS	5 × 5	24	1980
ENVISAT	ATSR-family	1 × 1	2 ^b	1991
GMS-5	VISSR	5 × 5	24	1995
Terra/Aqua	MODIS	1 × 1	4 ^c	1999
Aqua	AIRS	14 × 14	2	2002
MetOp	IASI	12 × 12	2	2007
MSG	SEVIRI	3 × 3	96	2006

^a Earlier HIRS (1–3) instruments had a larger field of view of 18 × 18 km²

^b These satellite are in a 3-day repeat cycle, such that the same point imaged twice in one day will not be imaged again until 3 days later

^c Assuming two satellites in orbit at any given time

possible to infer something about the mineralogy of the ash. Indeed it may also be possible to discriminate dust (Fig. 1g) and wind-blown ash (Fig. 1h) outbreaks from volcanic ash eruption clouds and plumes.

There remains some difficulty in identifying hazardous ash under many circumstances, and timeliness is still an issue. A further complication is that there is no standard satellite-based product providing ash cloud height. This vital piece of information is usually

inferred later. Once a sequence of images has revealed the spatial and temporal behaviour of the ash cloud, trajectories are run based on “guessed” heights and the best fit is used to establish the most likely height of the hazardous ash cloud. This “hit and miss” methodology has recently been put on a firm theoretical basis by Eckhardt et al. (2008) who use an inverse modelling technique that combines Lagrangian particle dispersion using wind fields with satellite measurements to estimate the injection height profile of the eruption. The method has been tested on the eruption of Jebel at Tair, Yemen (15.55° N, 41.83° E) and relied on SO₂ satellite measurements from SEVIRI as a proxy for ash. The result was very good and independent validation against OMI and a spaced-based lidar (CALIPSO) showed that once the injection height was known accurately (± 1 km) the trajectory and dispersion of the cloud could be faithfully tracked for several days and over more than 10,000 km. The idea of using SO₂ satellite measurements to infer the ash hazard is not new; but there are problems with this approach and ideally it would be better to use direct ash measurements. At the current time, satellite SO₂ measurements are easier to make and have proven to be very useful for aviation hazard warnings. The following section discusses the state of the science of SO₂ detection from space.

4 SO₂ detection from satellites

Sulphur dioxide is, typically, the third most abundant gas (after water vapour and CO₂) emitted by volcanoes. It is a colourless gas that can cause eye irritation, breathing difficulties and death when encountered in high concentrations. The background atmosphere contains very little SO₂—most anthropogenic emissions arise from industrial sources, whilst natural emissions are dominated by volcanic sources. Low-level SO₂ volcanic emissions (often referred to as passive degassing) are of little concern to aviation. During explosive eruption episodes, SO₂ may be violently injected into the atmosphere and may reach higher altitudes where they intercept the airways and potentially become a hazard to aviation. It is not clear exactly what threat SO₂ emissions pose to aircraft, however it is generally assumed that the emissions will be accompanied by ash, which is a known hazard. Consequently, pilots are trained to recognize the acrid odour generated by sulphur gases (SO₂ and H₂S both have characteristic pungent odours) so that they may infer that an encounter with a volcanic cloud has taken place. This may not mean that ash has been encountered—there are other tell-tale signs for an ash encounter—but the current procedures demand that if an encounter is suspected it should be noted, reported and any remedial maintenance checks carried out. It is possible that SO₂, in sufficiently high concentrations, could cause fuel contamination, and if encountered as sulphuric acid aerosol, it is believed that airframe and window damage could also occur (Bernard and Rose 1984). Under the assumption that volcanic SO₂ in the upper troposphere (above 5 km) travels with volcanic ash, it is sensible to use satellite measurements of SO₂ as a proxy for ash.

Since 1979, SO₂ has been measured by the TOMS instrument, designed to measure atmospheric ozone, on board several different polar-orbiting satellites. The measurements rely on scattered solar UV radiation, which is affected by the presence of SO₂ at wavelengths between 0.28 and 0.32 μm . The large footprint size ($50 \times 50 \text{ km}^2$), once per day coverage and relatively low signal-to-noise ratio for TOMS SO₂ measurements meant that only SO₂ clouds from the larger (VEI > 2) eruptions could be detected. Nevertheless, TOMS has proved to be very useful for tracking SO₂ clouds, and for verifying the volcanic origin of “anomalous” clouds. Good examples showing the collocation of SO₂ and ash clouds can be found in Schneider et al. (1999) and Constantine et al. (2000).

Table 3 Details of past and current satellite instruments that can be used to detect and quantify SO₂ using UV and IR measurements

Satellite	Instrument	Spatial resolution (km × km)	Temporal resolution (per day)	Time period covered (present)
Various	TOMS	50 × 50	1	1979
NOAA	HIRS-2, -3, -4	10 × 10 ^a	2	1979
GOES	VISSR/VAS	5 × 5	24	1980
Terra/Aqua	MODIS	1 × 1	4 ^b	1999
Terra	ASTER	0.09 × 0.09	1/16	1999
Aqua	AIRS	14 × 14	2	2002
Aura	OMI	24 × 13	1	2004
Aura	MLS	30 × 150	1	2004
ERS-2	GOME	320 × 40	1	1995
ENVISAT	SCIAMACHY	60 × 30	1	2002
MetOp	IASI	12 × 12	2	2007
MetOp	GOME-2	80 × 40	2	2007
MSG	SEVIRI	3 × 3	96	2006

^a Earlier HIRS (1–3) instruments had a larger field of view of 18 × 18 km²

^b Assuming two satellites in orbit at any given time

The success of TOMS for detecting SO₂ using UV measurements has led to the development of improved instruments such as GOME, SCIAMACHY, OMI and GOME-2. The methods used for SO₂ detection are given by Eisinger and Burrows (1998) and Thomas et al. (2004) for GOME, by Richter et al. (2006) for SCIAMACHY and by Krotkov et al. (2006) for OMI. All of these instruments are in polar orbit and have, at best, spatial resolutions of 14 × 24 km² (OMI) and are restricted to coverage of the sunlit part of the Earth. GOME-2 and SCIAMACHY data are used to generate a global SO₂ alert for both natural (volcanic) and anthropogenic emissions (Van Geffen et al. (2007), see also <http://www.oma.be/BIRA-IASB/Molecules/SO2nrt/>) and a similar system is under construction for OMI.

SO₂ can also be measured using infrared radiation (Prata et al. 2003), with lower accuracy and precision than by using UV radiation. Polar-orbiting and geosynchronous satellite instruments exist with infrared channels that can be used to infer SO₂ column abundances. Satellite instruments starting in 1979 that can be used to measure SO₂ column amount include: HIRS, VISSR, MODIS, AIRS, SEVIRI and IASI.² Since all of these satellite data can be used during the night just as well as during the day, and because they generally have better spatial resolutions (up to 1 km²), they also offer the possibility of developing a global SO₂ alert system. The main details regarding the UV and IR instruments for SO₂ detection are summarized in Table 3.

There have been many examples of the extensive spread of SO₂ from volcanic eruptions detected by both UV and IR satellite sensors. Notable amongst these are El Chichon (17.360° N, 92.228° W) in 1982 (Krueger 1983), Mt Spurr (61.299° N, 152.251° W) in 1989 (Schneider et al. 1995), Pinatubo in 1991 (Bluth et al. 1993; Prata et al. 2003) and Hudson (45.90° S, 72.97° W) in 1991 (Barton et al. 1992). More recently, OMI and AIRS

² ASTER can also be used to detect volcanic SO₂ (e.g. Urai 2004), but its long re-visit time (16 days) and narrow swath width (~60 km) make it less useful for global aviation threat monitoring.

measurements have tracked clouds of SO₂ generated by eruptions from Soufriere Hills, Montserrat (16.72° N, 62.18° W) (Carn et al. 2007; Prata et al. 2007) and Jebel at Tair, Yemen (Eckhardt et al. 2008). These SO₂ clouds could be tracked for several weeks as they travelled with the prevailing winds at heights greater than 15 km. At these heights the SO₂ clouds were above commercial jet aircraft traffic and posed little threat to aviation, but this may not always be the case. The ability to track and forecast the movement of hazardous clouds using satellite-based SO₂ measurements is of great value and as indicated earlier, global alert systems have been developed to provide aviation warnings using these data.

5 The global threat to aviation from volcanic eruption clouds

Volcanic clouds move with the prevailing winds at the height of injection. At the onset of an eruption, it is likely that ash and gases are spread throughout the vertical column up to the maximum height reached by the cloud, which depends on the energetics of the eruption with some dependency on environmental conditions. During the first few hours of eruption, the vicinity in the neighbourhood of the volcano poses the greatest threat to aviation. Usually precursor information about the activity of the volcano is available and aviation is alerted well before an eruption occurs. Following a significant eruption, the ash and gases can be transported over great distances, but are usually confined to a much smaller vertical range of 1–2 km. Dispersion modelling of the movement of the cloud then depends critically on knowledge of the location of the cloud in the vertical, and less on the wind fields, as these are generally known more accurately. Current practice is to guess the height of the cloud based upon trial-and-error fits between observations of the clouds and model runs. VAACs use this information cautiously, together with other sources of information. They will advise that airspace is affected from the ground up to the suspected maximum height of the volcanic cloud, and express this in aviation terminology using flight levels, e.g. FL 350 means a pressure altitude of 35,000 ft or 10,700 m. Air traffic should then divert around a rather large spatial region which covers the horizontal location of the cloud and the vertical region from the ground up to FL X, where X is the designated flight level affected. While this strategy is risk averse, it can be a financial burden and perhaps unnecessary for the operator. This is because the volcanic cloud will, in most cases, be confined in the vertical to a layer of 1–2 km thickness and may not contain ash. The residence time of fine ash in the upper troposphere is of the order of several hours to a few days, and in a dispersed state the ash may not be a hazard to aircraft, although some case studies seem to indicate even undetected, very low concentration ash clouds may still pose a threat (Pieri et al. 2002; Tupper et al. 2004). Given the range of uncertainties present in predicting volcanic eruption activity, in knowledge of the injection height profile of an eruption and in establishing the minimum ash concentration level that is still dangerous to aviation, only fairly general indications of vulnerability can be established.

The mid- and upper-troposphere (MUT) wind circulation patterns are fundamental to establishing the hazard posed to commercial inter-continental aviation from dispersing volcanic clouds. In the MUT, zonal winds are stronger than meridional winds and consequently volcanic clouds tend to travel rapidly in the zonal direction. The long-term mean zonal wind fields at 250 hPa (10 km) are shown in Fig. 4 for the months of January (Fig. 4a) and July (Fig. 4b). Most notable in these plots are the strong zonal jets at roughly 30° N in January and 30° S in July. Zonal winds are generally quite weak $\pm 10^\circ$ latitude either side of the equator, but there is a noticeable seasonal dependence, with easterlies

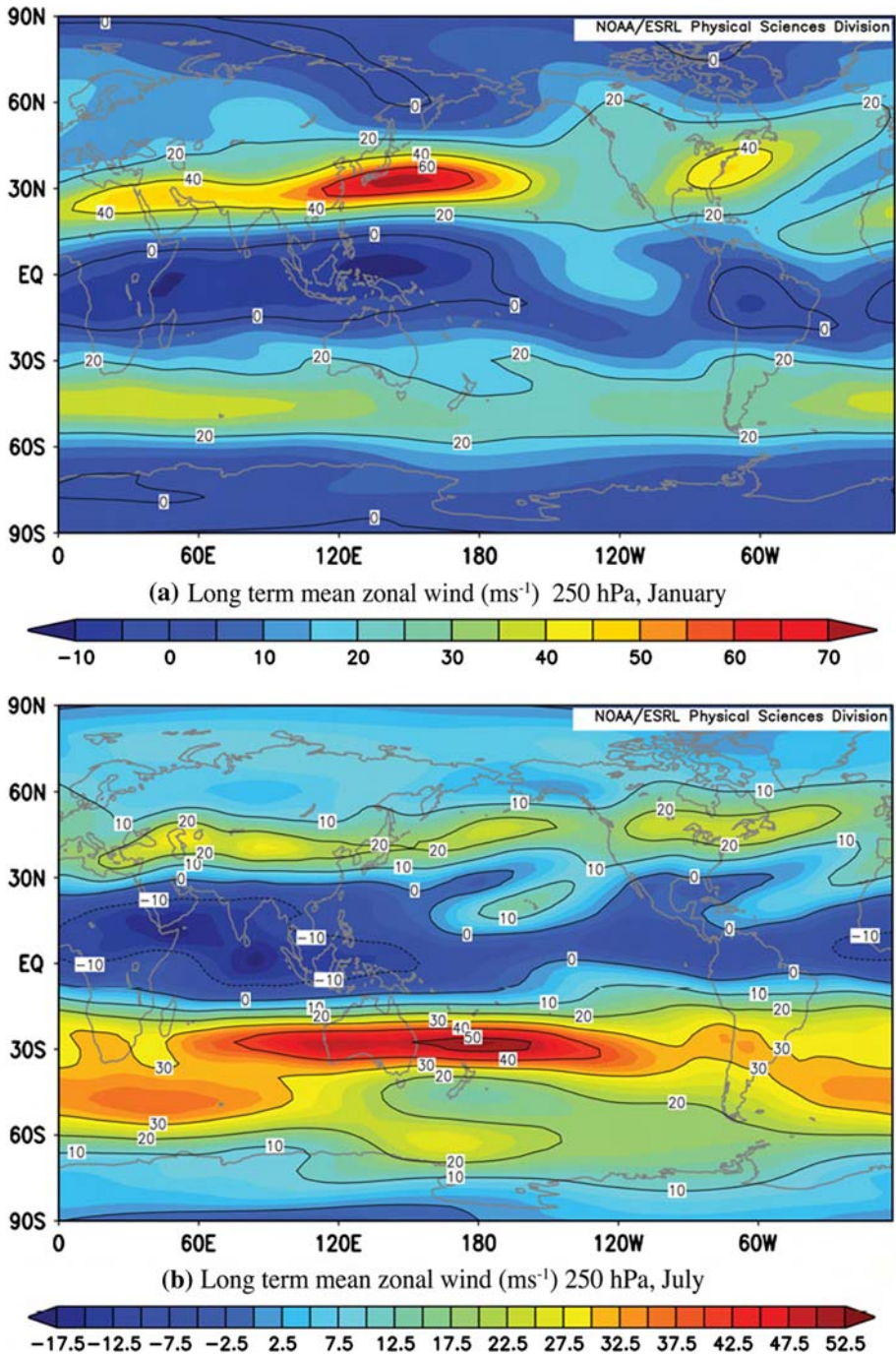


Fig. 4 Long-term mean zonal winds in m s^{-1} for (a) January and (b) July (Reproduced from NOAA/ESRL Physical Sciences Division, see: <http://www.cdc.noaa.gov/cgi-bin/PublicData/getpage.pl>)

dominating at latitudes north of the equator in July. Similar plots of the mean meridional wind component for January and July are shown in Fig. 5a, b. Meridional winds in January tend to be more northerly and can reach 6 m s^{-1} in the high latitudes of the winter hemisphere. Equatorial winds are weak at both times of the year. Some general comments can be made about the likely spread of volcanic clouds that reach 10 km altitude based on these mean wind circulation patterns. For eruptions that occur near equatorial latitudes in July, the dispersion will most likely be westwards with little transport polewards. In fact this was observed for the eruption of Pinatubo for clouds that reached much higher altitudes, since the wind structure at 10 km is similar up to 30 km or so (see Fig. 6). Eruptions that occur at higher latitudes will spread volcanic debris in directions and at speeds that depend on the hemisphere and the season. In July, Chilean eruption clouds will travel rapidly eastwards and southwards and it is very unlikely the clouds will spread to the northern hemisphere and more likely they will be confined to circumnavigate the southern hemisphere at latitudes south of 30° S . This was observed for the August, 1991 eruption of Mt Hudson, which spread volcanic clouds eastwards towards Australia causing some minor aviation incidents (Barton et al. 1992). Eruptions occurring in Japan and northwards along the Kamchatkan peninsula will spread clouds eastwards and at greater speeds in January than in July. The meridional winds will take these clouds southwards in summer (July) and northwards in winter (January). The north-eastward spreading of volcanic clouds emanating from Japanese or Kamchatkan volcanoes in winter is likely to create greater risk for aviation using the busy north Pacific air routes that connect Japan to the USA.

The main air corridor connecting air traffic between USA and continental Europe lies between latitudes $45\text{--}65^\circ \text{ N}$ and crosses the north Atlantic—the so-called North Atlantic Tracks (NATs). Volcanic eruptions from Iceland could potentially disrupt air traffic using the NATs. Greatest impact would occur when meridional winds are northerly and zonal winds weak. This would bring clouds southwards directly intersecting the NATs. A wintertime eruption fits this scenario better than a summertime event. At lower altitudes ($<5 \text{ km}$) the meridional winds in January tend to be southerly, keeping lower altitude eruption clouds away from Europe and the main air routes. A more typical trajectory for volcanic clouds originating from Iceland is transport eastwards with northward confinement and circumnavigation of the pole. While this trajectory has been documented (Carn et al. 2008), it is a much less serious threat to aviation, due to the low density of air traffic at these high latitudes. Another possible trajectory for Icelandic eruption clouds consists of rapid eastward and then southward transport which brings the clouds over eastern Europe and into the busy continental air routes. This trajectory has also been documented from an eruption of Grimsvotn in 2004 (Witham et al. 2007), which caused some grounding of European aviation but no serious incidents were reported.

Over the busy (especially for air freight) trans-Pacific air routes between Japan and Asia and continental USA, the main threat is from Japanese volcanoes, volcanoes in Kamchatka and volcanoes along the Aleutian chain and into south-western Alaska. The whole region is volcanically active and there have been several aviation related incidents with ash clouds generated by volcanoes in this region. At most times of the year the zonal winds travel eastwards, taking volcanic debris from Japan/Kamchatka towards continental USA and into higher density air traffic. Two well-documented cases of aviation incidents have occurred in this region, both during the winter season. In the case of the KLM 747 commercial jet on route to Anchorage, Alaska from Amsterdam, Netherlands the encounter occurred in December 1989 and close to the Mt Redoubt volcano (60.485° N , 152.742° W) (Casadevall 1994). The aircraft was travelling south-eastwards towards the ash plume, which was moving north-westwards, with the mean winter winds (see Figs. 4a and 5a).

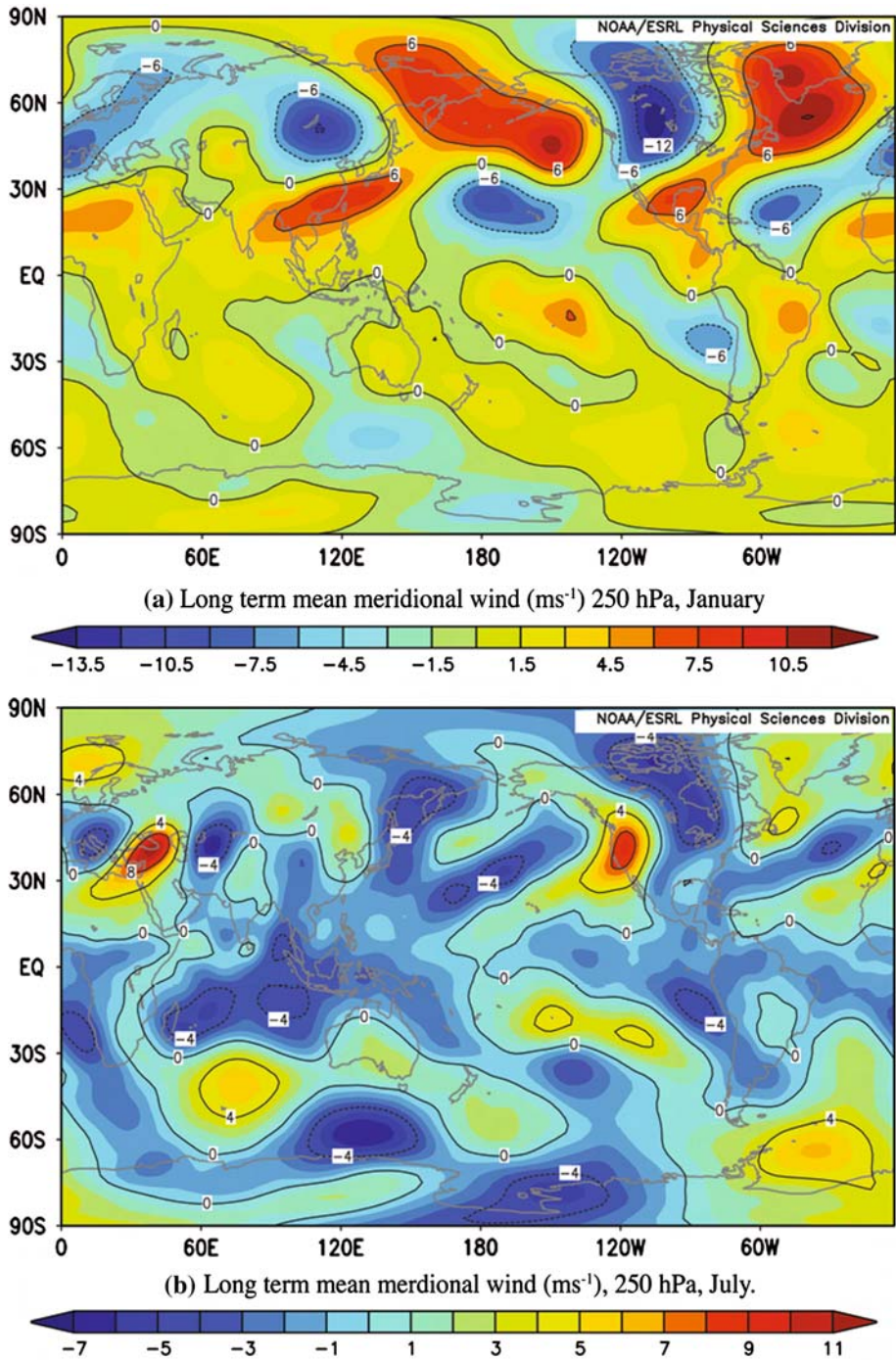


Fig. 5 Long-term mean meridional winds in m s^{-1} for (a) January and (b) July (Reproduced from NOAA/ESRL Physical Sciences Division, see: <http://www.cdc.noaa.gov/cgi-bin/PublicData/getpage.pl>)

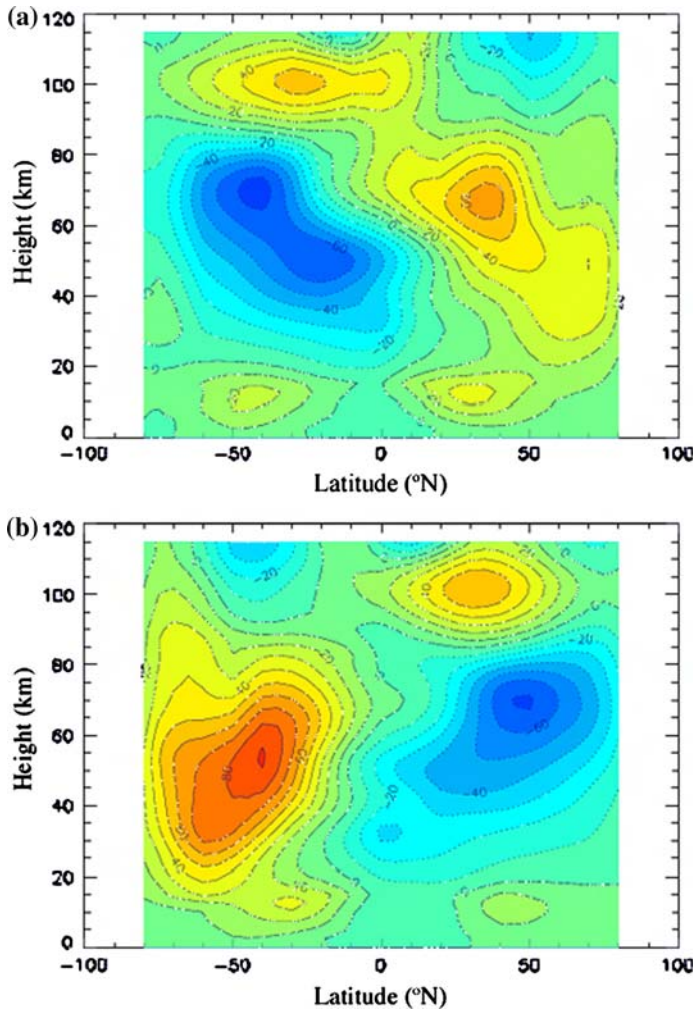


Fig. 6 Latitude-height cross-sections of the mean zonal winds for (a) January and (b) July (After Fleming et al. 1988)

A dispersion model (PUFF) animation of this encounter can be found at: http://puff.images.alaska.edu/Redoubt_webpage/Puff_redoubt_ash.shtml. A more recent event in this region occurred in February 2000 when Cleveland volcano (52.82° N, 167.95° W) erupted and sent an extensive plume of ash towards the north-northeast, in agreement with expectation based on the mean wind circulation—for animation of this event see: http://puff.images.alaska.edu/animations/Cleve_021901_76.gif. Some ash also moved in a south-southeast direction and intersected air traffic off the west coast of the USA. Four aviation encounters were reported in the vicinity of the volcano, and one encounter was reported off California at FL-300 with a B-747 (Simpson et al. 2002).

Aviation traffic is increasing and is expected to grow at a rate of between 2.2% to 4.7% per year for the period 1990–2050 (ESCAP 2005). There are significant regional differences in the current growth rate of commercial aviation traffic and also in the projected

rates. Largest increases are expected in the Middle East and Asia Pacific regions, with many more commercial and freight traffic crossing the Pacific Rim. During 2004–2007 commercial air traffic grew at 8.6% for the Asia/Pacific region, compared to 6.8% for the world. The Middle East region grew at an annual average rate of 10.9%. Air freight traffic is also growing. For the period 2002–2015 air freight traffic is expected to grow at an annual average rate of 6.4% for the Asia Pacific, 6.6% for the Middle East and 5.5% globally (ESCAP 2005). The Asia Pacific region is also a region with many volcanoes—approximately 450, and about 50% of the world’s active volcanoes lie along the Pacific Rim—the so-called “Ring of Fire”. Coupled with the trend from using 4-engined jet aircraft to using twin-engined aircraft, there is a significant increase in vulnerability of the world’s air traffic fleet to loss of aircraft due to encounters with a volcanic ash cloud.

Figure 7 shows an estimate of the global air traffic density based on the 2002 NO_x emissions taken from the AERO2k emissions inventory (Eyres et al. 2004) for the month of October and for flight levels of FL 350 (pressure altitude of 33,000 ft) to FL 390 (39,000 ft). NO_x emissions are used here as a proxy for air traffic density and are a good indicator of the global spatial pattern of air traffic. Also shown on this Figure are all

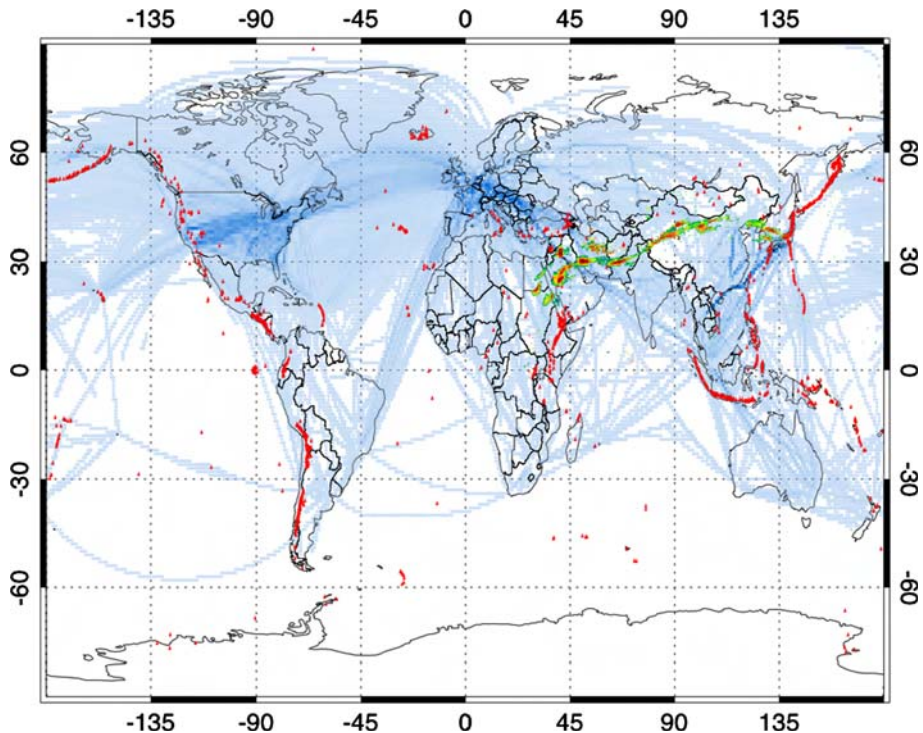


Fig. 7 Global density of air traffic as measured by monthly averaged NO_x emissions for FL 350 to FL 390 (pressure altitudes of 33,000 ft up to 39,000 ft) taken from the AERO2k emissions inventory of Eyres et al. (2004). Emissions are shown for October 2002. The colour code is linearly scaled with greatest emissions represented as deepest blue. The red triangles indicate the positions of Holocene and Historically listed volcanoes taken from the Smithsonian database (Simkin and Siebert 1994). There are over 1,200 volcanoes indicated on the plot. The OMI SO₂ column observations from the eruption of Jebel at Tair during 1–10 October 2007 are also shown on this plot. These data are scaled to show the relative column amounts each day as observed by OMI, with red representing the highest values and green the lowest

Holocene and historically known volcanoes (Simkin and Seibert 1994). The greatest traffic densities are seen over Europe and North America, with noticeable air traffic trajectories across the north Atlantic (the NATs) and from Japan to south-east Asian population centres. To illustrate the vulnerability of air traffic to encounters with volcanic clouds, the OMI SO₂ cloud observations from the eruption of Jebel at Tair during 1–10 October, 2007 are overlaid onto the Figure. Eckhardt et al. (2008) estimate that the cloud travelled mostly just above the tropopause at altitudes between 14 and 16 km. As most commercial aircraft cruise at around 13 km (39,000 ft) this may not have been a problem for currently operating air traffic, however should fleets of HSCT aircraft operate in the future, dispersed volcanic debris, far from its source will become an increasing risk to these aircraft. Later modelled trajectories suggest that the cloud may have re-entered the troposphere and re-curved south and westwards towards India, where OMI also observed the cloud, albeit at much lower concentrations.

With increased air traffic over the Asia/Pacific region and with many active volcanoes located there, it is concluded that this region will become increasingly vulnerable to aviation/volcanic cloud encounters. The potential for an encounter is illustrated using the air traffic density forecast for 2025 and an eruption from a remote volcano located in the Northern Mariana Islands. During 2003 until the present, Anatahan volcano in the Northern Mariana Islands (16.35° N, 145.67° E) has been emitting ash clouds into the atmosphere at regular intervals. This volcano lies under an air route from Guam and Saipan to Japan and ash clouds from the volcano frequently intercept the major air routes from south-east Australia, and the Philippines to Japan and Korea. Figure 8 shows the coincidence of forecast April 2025 air traffic density (FL 350 to FL 390) with volcanoes and an AIRS SO₂ cloud from Anatahan for April 2005. This cloud covered an area of more than 1.3 million km² over 3 days in April, reached an altitude of at least 15 km (~48,000 ft) and air traffic was diverted on several occasions. The ash and gas cloud continued to spread westwards, eventually intercepting Philippine air space and continued on towards the South China Sea. At most times of the year, eruptions in this region are likely to send ash westwards and into busy air corridors involving south-east Asia, Japan, Korea and Australia.

6 Conclusions

Satellite instruments are able to identify and track hazardous ash and SO₂ clouds in the atmosphere for hours to several weeks. Ash has a considerably shorter lifetime (~hours) in the atmosphere than SO₂ (~days to weeks) and is more difficult to identify and quantify. Ash is much more hazardous to jet aircraft than SO₂ and has been responsible for several complete engine shut-downs and significant air-frame damage. Under favourable circumstances it appears that by tracking SO₂ clouds from satellite, the movement of the more hazardous ash clouds may be inferred, but care must be taken as there are documented cases (Schneider et al. 1999; Prata and Kerkmann 2007) where ash and SO₂ separate and travel in different directions and at different heights in the atmosphere. Operationally there are no reliable ash cloud height estimates available from satellites. The CALIPSO lidar can provide excellent height estimates for aerosols (H₂SO₄ aerosol in the case of volcanic clouds), but the poor horizontal spatial coverage and poor temporal coverage make the instrument inadequate for operational use. The recent study by Eckhardt et al. (2008) has shown that by using satellite estimates of volcanic cloud trajectories with Lagrangian dispersion models, the injection height profile of the volcanic eruption may be estimated.

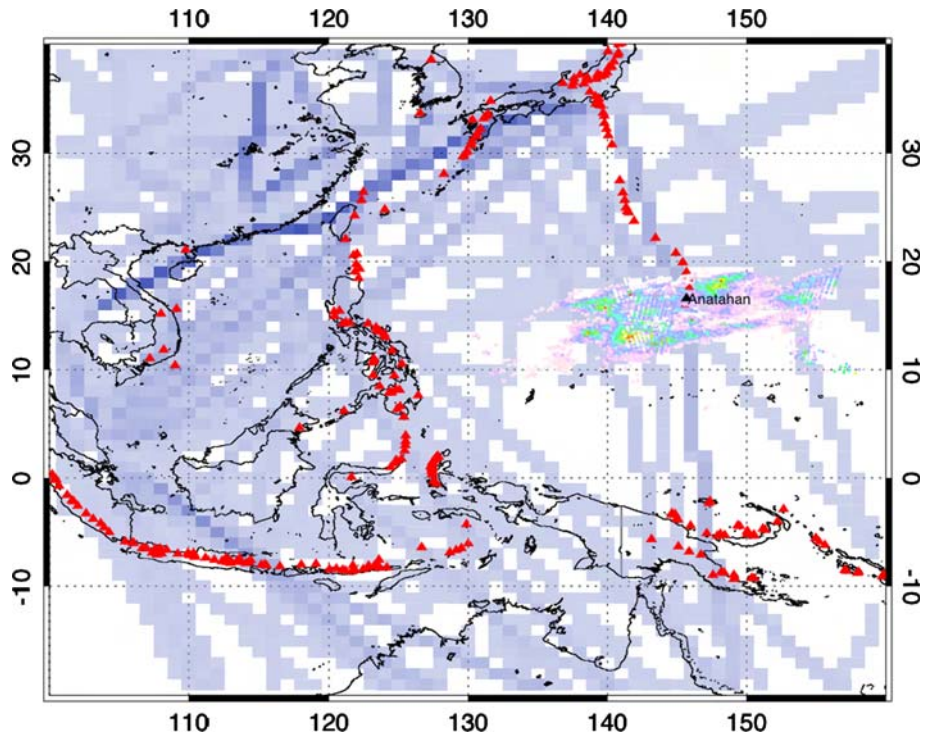


Fig. 8 Asia Pacific regional air traffic density from monthly averaged forecast NO_x emissions for FL 350 to FL 390 (pressure altitudes of 33,000 ft up to 39,000 ft) taken from the AERO2k emissions inventory of Eyres et al. (2004). Forecast emissions are shown for April 2025. The colour code is linearly scaled with greatest emissions represented as deepest blue. The red triangles indicate the positions of Holocene and Historically listed volcanoes taken from the Smithsonian database (Simkin and Siebert 1994). There are over 450 volcanoes indicated on the plot. The AIRS SO₂ column observations from the eruption of Anatahan during 6–8 April 2005 are also shown on this plot. These data are scaled to show the relative column amounts each day as observed by AIRS, with red representing the highest values and lilac, the lowest

This much more objective estimate of the cloud height can then be used to forecast the cloud movement with greater confidence and accuracy. For some regions, where 15-min infrared data are available from geosynchronous satellites, it will be possible to reliably transmit accurate 3D trajectories of hazardous volcanic clouds for use by the aviation industry. By supplying height and horizontal spatial information on the location and movement of volcanic clouds, the aviation industry will be able to re-route air traffic as necessary and at the same time minimize the extra fuel used. Satellite data can also be used to identify volcanic clouds that are predominantly composed of SO₂ and/or volcanic ash. This information may be used by the aviation industry to determine the appropriate post-maintenance procedures required in the event of an encounter with a volcanic cloud. As ash is known to cause engine damage and clogging of pitot static tubes and SO₂ is not implicated in this kind of damage, there may be an economic advantage in utilizing this information.

It has been noted that commercial and freight air traffic is growing globally and regionally, with the Asia Pacific region experiencing one of the highest annual growth rates. The region also contains many volcanoes and is thus vulnerable to air traffic volcanic

cloud encounters. The introduction of fleets of HSCT travelling at speeds of up to mach 2.5 and cruising at altitudes as high as 20 km will increase the aviation/volcanic cloud encounter risk. The much higher aircraft speeds will also demand much shorter warning times, suggesting a need for either a constellation of polar-orbiting instruments or a network (5–6) of geosynchronous rapid scan instruments. Vulnerability maps can be developed based on proxies for air traffic densities, which provide a good indication of the air traffic spatial habit. Atmospheric dispersion models are now capable of providing reliable forecasts of volcanic cloud movement for several days from the onset of eruption, provided good injection height information is available. The air traffic density maps, dispersion model runs, volcano locations and wind analyses provide the ingredients to develop scenarios for aviation/volcanic cloud encounters. These scenario generators can be used for examining risks and vulnerabilities and for examining potential problems should HSCT aircraft become operational.

Appendix

Table 4 List of acronyms

ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
AIRS	Atmospheric InfraRed Spectrometer
ATSR	Along-Track Scanning Radiometer
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
CALIPSO	Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations
GOES	Geosynchronous Orbiting Environmental Satellite
GOME	Global Ozone Monitoring Experiment
HIRS	High resolution InfraRed Sounder
HYSPLIT	HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory
IASI	Infrared Atmospheric Sounding Interferometer
IR	InfraRed
MetOP	Operational meteorological satellite
MLS	Microwave Limb Sounder
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSG	Meteosat Second Generation
MUT	Mid- and Upper-Troposphere
NOAA	National Oceanographic and Atmospheric Administration
OMI	Ozone Monitoring Instrument
PUFF	Volcanic Ash Tracking Model
SCIAMACHY	SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric Cartography
SEVIRI	Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager
TIROS	Television and Infrared Orbiting Satellite
TOMS	Total Ozone Mapping Spectrometer
UV	Ultra-Violet
VISSR	Visible and Infrared Spin Stabilized Radiometer

References

- Barton IJ, Prata AJ, Watterson IG, Young SA (1992) Identification of the Mount Hudson volcanic cloud over SE Australia. *Geophys Res Lett* 19:1211–1214
- Bernard A, Rose WI (1984) The injection of sulfuric acid aerosols in the stratosphere by the El Chichon volcano and its related hazards to the international air traffic. *Nat Hazards* 3(1):59–67. doi:[10.1007/BF00144974](https://doi.org/10.1007/BF00144974)
- Bluth GJS, Schnetzler CC, Krueger AJ, Walter LS (1993) The contribution of explosive volcanism to global atmospheric sulphur dioxide concentrations. *Nature* 366:327–329
- Carn SA, Krueger AJ, Krotkov NA, Gray MA (2004) Fire at Iraqi sulfur plant emits SO₂ clouds detected by Earth Probe TOMS. *Geophys Res Lett* 31:L19105. doi:[10.1029/2004GL020719](https://doi.org/10.1029/2004GL020719)
- Carn SA, Krotkov NA, Yang K, Hoff RM, Prata AJ, Krueger AJ, Loughlin SC, Levelt PF (2007) Extended observations of volcanic SO₂ and sulphate aerosol in the stratosphere. *Atmos Chem Phys Discuss* 7:2857–2871
- Carn SA, Prata AJ, Karlsdottir S (2008) Circumpolar transport of a volcanic cloud from Hekla (Iceland). *J Geophys Res* 113. doi:[10.1029/2008JD009878](https://doi.org/10.1029/2008JD009878)
- Casadevall TJ (1994) The 1989/1990 eruption of Redoubt Volcano Alaska: impacts on aircraft operations. *J Volcanol Geotherm Res* 62(30):301–316
- Casadevall TJ, Delos Reyes PJ, Schneider DJ (1996) The 1991 Pinatubo eruptions and their effects on aircraft operations. In: Newhall CG, Punongbayan RS (eds) *Fire and mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo, Philippines*. Philippines Institute of Volcanology and Seismology, Quezon City, University of Washington Press, Seattle, pp 625–636
- Chahine MT, Pagano TS, Aumann HH, Atlas R, Barnett C, Blaisdell J, Chen L, Divakarla M, Fetzer EJ, Goldberg M, Gautier C, Granger S, Hannon S, Irion FW, Kakar R, Kalnay E, Lambrihtsen BH, Lee S-Y, LeMarshall J, McMillan WW, McMillin L, Olsen ET, Revercomb H, Rosenkranz P, Smith WL, Staelin D, Strow LL, Susskind J, Tobin D, Wolf W, Zhou L (2006) AIRS: improving weather forecasting and providing new data on greenhouse gases. *Bull Am Meteorol Soc* 87:910–926. doi:[10.1175/BAMS-87-7-911](https://doi.org/10.1175/BAMS-87-7-911)
- Clerbaux C, Hadji-Lazaro J, Turquety S, George M, Coheur P-F, Hurtmans D, Wespes C, Herbin H, Blumstein D, Tournier B, Phulpin T (2007) The IASI/MetOp I mission: first observations and highlights of its potential contribution to GMES. *COSPAR Inf Bull* 2007:19–24
- Constantine EK, Bluth GJS, Rose WI (2000) TOMS and AVHRR sensors applied to drifting volcanic clouds from the august 1991 eruptions of Cerro Hudson. In: Mouginis-Mark P, Crisp J, Fink J (eds) *AGU Monograph 116—Remote Sensing of Active Volcanism*, pp 45–64
- Eckhardt S, Prata AJ, Seibert P, Steibel K, Stohl A (2008) Estimation of the vertical profile of sulfur dioxide injection into the atmosphere by a volcanic eruption using satellite column measurements and inverse transport modeling. *Atmos Chem Phys Discuss* 8:3761–3805
- Eisinger M, Burrows JP (1998) Tropospheric sulfur dioxide observed by the ERS-2 GOME instrument. *Geophys Res Lett* 25(22):4177–4180
- Ellrod GP, Connell BH, Hillger DW (2003) Improved detection of airborne volcanic ash using multispectral infrared satellite data. *J Geophys Res* 108(D12):4356. doi:[10.1029/2002JD002802](https://doi.org/10.1029/2002JD002802)
- ESCAP (2005) Review of developments in transport in Asia and the Pacific 2005, United Nations Publ., No. E.06.II.F.9, ST/ESCAP/2392, 172 pp
- Eyers CJ, Norman P, Middel J, Michot S, Atkinson K, Christou RA (2004) AERO2k global aviation emissions inventories for 2002 and 2025. European Commission Contract, No. G4RD-CT-2000-00382, QINETIQ/04/0113, 144 pp
- Fleming EL, Chandra S, Shoerberl MR, Barnett JJ (1988) Monthly mean global climatology of temperature, wind, geopotential height and pressure for 0–120 km. National Aeronautics and Space Administration, Technical Memorandum 100697, Washington, DC
- Guffanti M, Albersheim S (2008) The United States national volcanic ash operations plan for aviation. *Nat Hazards Special Issue: Aviation hazards from volcanoes*. doi:[10.1007/s11069-008-9247-1](https://doi.org/10.1007/s11069-008-9247-1)
- Hanstrum BN, Watson AS (1983) A case study of two eruptions of Mount Galunggung and an investigation of volcanic eruption cloud characteristics using remote sensing techniques. *Aust Meteorol Mag* 31:131–177
- Hillger DW, Clark JD (2002a) Principal component image analysis of MODIS for volcanic ash. Part I: most important bands and implications for future GOES imagers. *J Appl Meteorol* 41:985–1001
- Hillger DW, Clark JD (2002b) Principal component image analysis of MODIS for volcanic ash. Part II: simulation of current GOES and GOES-M imagers. *J Appl Meteorol* 41:1003–1010
- Holasek RE, Rose WI (1991) Anatomy of 1986 Augustine volcano eruptions as recorded by multispectral images processing of digital AVHRR weather satellite data. *Bull Volcanol* 53:42–435

- Holasek RE, Woods AW, Self S (1996) Experiments on gas-ash separation processes in volcanic umbrella clouds. *J Volcanol Geotherm Res* 70:169–181
- Krotkov NA, Carn SA, Krueger AJ, Bhartia PK, Yang K (2006) Band residual difference algorithm for retrieval of SO₂ from the Aura Ozone Monitoring Instrument (OMI). *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 44(5):1259–1266
- Krueger AJ (1983) Sighting of El Chichon sulfur dioxide clouds with the nimbus 7 total ozone mapping spectrometer. *Science* 220:1377–1379
- Krueger AJ, Walter LS, Bhartia PK, Schnetzler CC, Krotkov NA, Sprod I, Bluth GJS (1995) Volcanic sulfur dioxide measurements from the total ozone mapping spectrometer instruments. *J Geophys Res* 100(D7):14057–14076
- Krueger AJ, Schaefer SJ, Krotkov N, Bluth GJS, Baker S (2000) Ultraviolet remote sensing of volcanic emissions. In: Mougini-Marks PJ, Crisp JA, Fink JH (eds) *Remote sensing of active volcanism*. Geophys Monogr Ser 116:2543, AGU, Washington, DC
- Malingreau J, Kaswanda P (1986) Monitoring volcanic eruptions in Indonesia using weather satellite data: the Colo eruption of July 28, 1983. *J Volcanol Geotherm Res* 27(1–2):179–194
- Matson M (1984) The 1982 El Chichon volcano eruptions—a satellite perspective. *J Volcanol Geotherm Res* 23:1–10
- Miller TP, Casadevall TJ (1999) Volcanic ash hazards to aviation. In: Sigurdsson H, Houghton B, McNutt SR, Ryman H, Stix J (eds) *Encyclopedia of volcanoes*. Academic Press, San Diego, pp 915–930
- Mosher FR (2000) Four channel volcanic ash detection algorithm, Preprint Volume. 10th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, Long Beach, California, 9–14 January, 2000, pp 457–460
- Pavolonis MJ, Feltz WF, Heidinger AK, Gallina GM (2006) A daytime complement to the reverse absorption technique for improved automated detection of volcanic ash. *J Atmos Oceanic Technol* 23:1422–1444
- Pergola N, Tramutoli V, Marchese F, Scaffidi I, Lacav T (2004) Improving volcanic ash cloud detection by a robust satellite technique. *Remote Sens Environ* 90:1–22
- Pieri D, Ma C, Simpson JJ, Hufford G, Grindle T, Grove C (2002) Analyses of in-situ airborne ash from the February 2000 eruption of Hekla volcano, Iceland. *Geophys Res Lett* 29:16. doi:[10.1029/2001GL013688](https://doi.org/10.1029/2001GL013688)
- Prata AJ (1989a) Observations of volcanic ash clouds using AVHRR-2 radiances. *Int J Remote Sens* 10(4–5):751–761
- Prata AJ (1989b) Radiative transfer calculations for volcanic ash clouds. *Geophys Res Lett* 16(11):1293–1296
- Prata AJ, Grant IF (2001) Retrieval of microphysical and morphological properties of volcanic ash plumes from satellite data: application to Mt. Ruapehu, New Zealand. *Q J R Meteorol Soc* 127(576B):2153–2179
- Prata AJ, Kerkmann J (2007) Simultaneous retrieval of volcanic ash and SO₂ using MSG-SEVIRI measurements. *Geophys Res Lett* 34:L05813. doi:[10.1029/2006GL028691](https://doi.org/10.1029/2006GL028691)
- Prata AJ, Bluth GJS, Rose WI, Schneider DJ, Tupper AC (2001) Comments on Failures in detecting volcanic ash from a satellite-based technique. *Remote Sens Environ* 78:341–346
- Prata AJ, Rose WI, Self S, O'Brien DM (2003) Global, long-term sulphur dioxide measurements from TOVS data: a new tool for studying explosive volcanism and climate. *Volcanism and the Earth's atmosphere*, geophysics monograph 139 AGU, pp 75–92
- Prata AJ, Carn SA, Stohl A, Kerkmann J (2007) Long range transport and fate of a stratospheric volcanic cloud from Soufriere hills volcano, Montserrat. *Atmos Chem Phys* 7:5093–5103
- Richardson AJ (1984) El Chichon volcanic ash effects on atmospheric haze measured by NOAA-7 AVHRR data. *Remote Sens Environ* 16:157–164
- Richter A, Wittrock F, Burrows JP (2006) SO₂ measurements with SCIAMACHY. In: *Proceedings of the first conference on atmospheric science*, Frascati, Italy, 8–12 May 2006. ESA publication SP-628
- Rose WI, Delene DJ, Schneider DJ, Bluth GJS, Kruger AJ, Sprod I, McKee C, Davies HL, Ernst GJ (1995) Ice in the 1994 Rabaul eruption: implications for volcanic hazard and atmospheric effects. *Nature* 375:477–479
- Sawada Y (1987) Study on analysis of volcanic eruptions based on eruption cloud image data obtained by the Geostationary Meteorological Satellite (GMS). *Technical reports of the Meteorological Research Institute*, vol 22, 335 pp
- Sawada Y (1996) Detection of explosive eruptions and regional tracking of volcanic ash clouds with geostationary meteorological satellites (GMS). In: Scarpa R, Tilling RI (eds) *Monitoring and mitigation of volcano hazards*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp 299–314
- Schneider DJ, Rose WI, Kelley L (1995) Tracking of 1992 eruption clouds from Crater Peak of Mount Spurr volcano, Alaska, using AVHRR. *US Geol Surv Bull* 2139:27–36

- Schneider DJ, Rose WI, Coke LR, Bluth GJS (1999) Early evolution of a stratospheric volcanic eruption cloud as observed with TOMS and AVHRR. *J Geophys Res* 104(D4):4037–4050
- Simkin T, Seibert L (1994) *Volcanoes of the world*, 2nd edn. Geoscience Press, Tucson
- Simpson JJ, Hufford G, Pieri D, Berg J (2000) Failures in detecting volcanic ash from a satellite-based technique. *Remote Sens Environ* 72:191–217
- Simpson JJ, Hufford G, Pieri D, Servranckx R, Berg J (2002) The february 2001 eruption of Mount Cleveland, Alaska: case study of an aviation hazard. *Weather Forecast* 17:691–704
- Thomas W, Erbetseder T, Ruppert T, Van Roozendaal M, Verdebout J, Balis D, Meleti C, Zerefos C (2004) On the retrieval of volcanic sulfur dioxide emissions from GOME backscatter measurements. *J Atmos Chem* 50:295–320. doi:[10.1007/s10874-005-5079-5](https://doi.org/10.1007/s10874-005-5079-5)
- Torres O, Bhartia PK, Herman JR, Ahmad Z, Gleason J (1998) Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation: theoretical basis. *J Geophys Res* 103(D14):17099–17110
- Tupper A, Carn SA, Davey J, Kamada Y, Potts RJ, Prata AJ, Tokuno M (2004) An evaluation of volcanic cloud detection techniques during recent significant eruptions in the western ring of fire. *Remote Sens Environ* 91:27–46
- Urai M (2004) Sulfur dioxide flux estimation from volcanoes using advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer—a case study of Miyakejima volcano, Japan. *J Volcanol Geotherm Res* 134(1–2):1–13
- Van Geffen J, Van Roozendaal M, Di Nicolantonio W, Tampellini L, Valks P, Erbetseder T, Van der AR (2007) Monitoring of volcanic activity from satellite as part of GSE PROMOTE. Proceedings of the first conference on atmospheric science, Frascati, Italy, 8–12 May 2006. ESA publication SP-628
- Watkin SC (2003) The application of AVHRR data for the detection of volcanic ash in a volcanic ash advisory centre. *Meteorol Appl* 10:301–311
- Wei C-F, Larson SM, Patten KO, Wuebbles DJ (2001) Modeling of ozone reactions on aircraft-related soot in the upper troposphere and lower stratosphere. *Atmos Environ* 35:6167–6180
- Wen S, Rose WI (1994) Retrieval of sizes and total masses of particles in volcanic clouds using AVHRR bands 4 and 5. *J Geophys Res* 99(D3):5421–5431
- Witham CS, Hort MC, Potts R, Servranckx R, Husson P, Bonnardot F (2007) Comparison of VAAC atmospheric dispersion models using the 1 November 2004 Grimsvtn eruption. *Meteorol Appl* 14: 27–38
- Yu T, Rose WI, Prata AJ (2002) Atmospheric correction for satellite-based volcanic ash mapping and retrievals using split window IR data from GOES and AVHRR. *J Geophys Res* 107(D16):4311. doi:[10.1029/2001JD000706](https://doi.org/10.1029/2001JD000706)

ANEXO

Glosario de unidades terminológicas

INGLÉS	DEFINICIÓN y FUENTE	ESPAÑOL	CONTEXTO y FUENTE
aviation / volcanic cloud encounters	Information about reported encounters of aircraft with volcanic ash clouds from 1953 through 2009 has been compiled to document the nature and scope of risks to aviation from volcanic activity Fuente: Encounters of Aircraft with Volcanic Ash Clouds: A Compilation of Known Incidents, 1953–2009 By Marianne Guffanti, Thomas J. Casadevall, and Karin Budding. https://pubs.usgs.gov/ds/545/DS545.pdf	encuentros de aviones con cenizas	Sólo en el período comprendido entre 1980 y el año 2000 se reportaron más de 80 eventos de encuentros entre aeronaves comerciales y nubes de cenizas volcánicas García Pérez (2011)
background atmosphere	The atmosphere remote from anthropogenic or volcanic influences. http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/aviation/index.php?idp=158	atmósfera tipo	Atmósfera Tipo. Estado hipotético de la atmósfera convencional de referencia que corresponde aproximadamente a su estado medio, en la cual los parámetros de presión y temperatura están definidos para todas las alturas, sus características principales son: una presión atmosférica al nivel medio del mar de 1013.25 mb y un gradiente de temperatura de - 6.5° Celsius/Km que se mantienen constantes hasta una altura de 11 kilómetros. http://smn.cna.gob.mx/es/smn/glosario
geosynchronous satellite	Geosynchronous satellite is placed in the geosynchronous orbit with an orbital period matching the Earth's rotation period. These satellites take 24 hours to complete one rotation around the earth http://economictimes.indiatimes.com/definicion/geo-synchronous-satellite	satélite geosincrónico	Satélites que describen órbitas sobre el ecuador terrestre con la misma velocidad angular que la Tierra, por lo que permanecen inmóviles para un observador en la Tierra. http://diccionario.raing.e-presentaciones.net/es/lema/sat%C3%A9lite-geos%C3%ADncrono
HSCT aircraft	high-speed civil transport aircraft Base terminológica Termium http://www.btb.termiumplus.gc.ca/tpv2alpha/alpha-eng.html?lang=eng&srchtxt=HSCT&i=1&index=alt#resultrecs	aeronave de transporte civil de alta velocidad (HSCT)	HSCT: Término y abreviatura aceptados oficialmente por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). Base terminológica Termium http://www.btb.termiumplus.gc.ca/tpv2alpha/alpha-eng.html?lang=eng&srchtxt=HSCT&i=1&index=alt#resultrecs
Mach number	The ratio between the true air speed (TAS) and the local speed of sound (LSS). https://www.skybrary.aero/index.php/Mach_Number	número de Mach	En las operaciones de vuelo, la velocidad relativa se indica a veces mediante el Número de Mach. Regulaciones Argentinas de Aviación Civil. Parte 5. Unidades de Medida. http://www.anac.gov.ar/anac/web/uploads/normativa/raac/raac_vigentes/por_parte/parte-5-23dic2014.pdf
plume	A plume of smoke, dust, fire, or water is a large quantity of it that rises into the air in a column.	pluma	Este modelo fue configurado para modelar la pluma de cenizas durante un período de 10 días a lo largo de 1200 km de extensión territorial

	https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/plume		Mulena et al. (2013)
proxy variable	A proxy variable can serve in the place of another if they have been shown to have substantially the same correlation. https://psychologydictionary.org/proxy-variable/	variable de sustitución/ variable indicadora	Dra. Laura Bellis – Consulta.
remote sensing	the science of obtaining information about objects or areas from a distance, typically from aircraft or satellites. National Oceanic and Atmospheric Administration U.S. Department of Commerce http://oceanservice.noaa.gov/	teledetección	TELEDETECCIÓN APLICADA A LAS CIENCIAS AGRONÓMICAS y RECURSOS NATURALES Schomwandt (2015).
revisit time	The satellite revisit time is the time elapsed between observations of the same point on earth by a satellite: it depends on the satellite's orbit, target location, and swath of the sensor http://www.iup.uni-bremen.de/~bms/remote_sensing/remote_sensing_chap5.pdf	tiempo de revisita	La órbita del Landsat 8, se encuentra en una altitud nominal de 705 km, con una inclinación de 98.2°, recorre una órbita heliosincrónica y su resolución temporal esta determinada por un tiempo de revisita de 16 días. Casasola (2016)
swath width	the strip of the Earth's surface from which data are collected by a side-looking airborne radar. It is the width of the imaged scene in the range dimension. http://www.radartutorial.eu/20.airborne/ab06.en.html	ancho de observación	El objetivo de este desarrollo es generar un producto de cinco bandas (equivalentes a las bandas de la cámara MMRS) con una resolución de 35 metros (equivalente a la de la cámara HRTC) conservando las características radiométricas de cada banda y con un ancho de observación (swath width) de 90 kilómetros http://www.conae.gov.ar/prensa/24112003.html
space-borne platforms	In space-borne remote sensing, sensors are mounted on-board a spacecraft (space shuttle or satellite) orbiting the earth. PRINCIPLES OF REMOTE SENSING Dr. S. C. Liew <i>Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing</i> <i>National University of Singapore</i> http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/spacebrn.htm	plataformas espaciales	Definida la teledetección espacial como aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales Casasola (2016)
VAAC	Volcanic Ash Advisory Center http://glosarios.servidor-alicante.com/meteorologia-hidrologia_en-es/volcanic-ash-advisory-center-vaac	Centro de Aviso de Cenizas Volcánicas (VAAC)	El gráfico muestra la información emitida por el VAAC de Londres acerca de la posición de la nube de cenizas del volcán Eyjafjallajökull a las 00 UTC http://www.hispaviacion.es/las-nubes-de-cenizas-volcanicas/
volcanic SO2 gas	Sulphur Dioxide (SO2) Sulphur dioxide is one of the most common gases released in volcanic eruptions	Dióxido de azufre (SO2, gas de	Este artículo se enfoca en el monitoreo de las emisiones de gases volcánicos, especialmente del dióxido de azufre.

	http://www.ivhhn.org/index.php?option=com_content&view=article&id=82	origen volcánico	Rodríguez & Nadeau (2015)
volcanic ash cloud	An ash cloud is created when volcanic ash is propelled into the atmosphere during an eruption Kriseinfo.no http://www.kriseinfo.no/en/Natural/Volcanic-eruptions/What-is-an-ashcloud/	Nube de ceniza volcánica	Para el día 6 de junio existen áreas en la Patagonia argentina cubiertas por nubes de cenizas volcánicas, junto con algunas nubes meteorológicas Mulena et al. (2013)

PRINCIPALES FUENTES DE DOCUMENTACIÓN CONSULTADAS PARA LA ELABORACIÓN DE LA TRADUCCIÓN Y DEL GLOSARIO

Casasola, F. I. (2016). *Implementación de herramientas de Teledetección e Inteligencia Artificial para la optimización de los recursos del Ejército Argentino en situaciones de emergencias volcánicas*. Tesis de Maestría. Facultad de Astronomía, Matemática y Física. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina.

Council of Science Editors, Style Manual Committee (2006). *Scientific style and format: the CSE manual for authors, editors, and publishers*. 7ma ed. Reston (VA): The Council.

Real Academia Española y Asociación de Academias de la Lengua Española (2005). *Diccionario panhispánico de dudas*. Madrid: Santillana.

García Pérez, A. (2011, 6 de octubre). El efecto de las cenizas volcánicas en la aeronave. One Magazine. Recuperado de <http://www.onemagazine.es/noticia/3083/sin-especificar/el-efecto-de-las-cenizas-volcanicas-en-la-aeronave-.html>

Mulena, C., Allende, D., & Puliafito, E. (2013). Modelado de la última erupción volcánica del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle. *Pyroclastic Flow, Journal of Geology*. Especial 3 (2), 14-22. Recuperado de <http://www.geohiggins.com/pyflow/Vol.3,%20no.2/Mulena%20et%20al,%202013.pdf>

Rodríguez, L.A & Nadeau, P. (2015). Resumen de las principales técnicas de percepción remota usadas en volcanes para monitorear las emisiones de gas en la superficie. *Rev. Geol. Amér. Central* 52: 67-105. doi: 10.15517/rgac.v0i52.18982

Osores, M.S. (2012). *Análisis y validación del modelo de dispersión y depósito de ceniza volcánica FALL3D-6.2 mediante el uso de imágenes satelitales y datos de campo - Casos de estudio: Hudson, Chaitén y Cordón Caulle*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

Piedra Vilches, J. (2016). *Estudio de erupciones volcánicas a través de imágenes satelitales caso de estudio: erupción volcán Puyehue, Chile*. Tesis de Maestría. Facultad de Matemática, Astronomía y Física Universidad Nacional de Córdoba.

Schomwandt, D. (2015). *Teledetección aplicada a las ciencias agronómicas y recursos naturales*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Recuperado de: http://www.siaa.gob.ar/joomla_files/images/mapas/ManualSensores.pdf

Zorrilla, A.M. (2002). *Diccionario de las preposiciones españolas. Normas y uso*. Capital Federal i.e. Buenos Aires: E.d.b.