

Algoritmo de identificación de nubes de ceniza volcánica en imágenes satelitales - Parte 2: sensor ABI

Nota Técnica SMN 2023-155

**Diana Rodríguez¹, Juan Augusto Díaz², Micaela Maurizi¹,
Luciano Vidal¹ y Soledad Ososres¹,**

¹ *Dirección de Productos de Modelación Ambiental y de Sensores Remotos*

² *Dirección Pronóstico del Tiempo y Avisos*

Diciembre 2023

Información sobre Copyright

Este reporte ha sido producido por empleados del Servicio Meteorológico Nacional con el fin de documentar sus actividades de investigación y desarrollo. El presente trabajo ha tenido cierto nivel de revisión por otros miembros de la institución, pero ninguno de los resultados o juicios expresados aquí presuponen un aval implícito o explícito del Servicio Meteorológico Nacional.

La información aquí presentada puede ser reproducida a condición que la fuente sea adecuadamente citada.

Resumen

La dispersión de cenizas volcánicas en la atmósfera, originadas por erupciones volcánicas y la erosión eólica de depósitos de ceniza volcánica, denominada resuspensión, provoca impactos ambientales, afecta las actividades humanas a distintas escalas y por lo tanto su detección es de suma importancia. Los Centros de Avisos de Cenizas Volcánicas (VAAC por sus siglas en inglés), vigilan la presencia de ceniza volcánica para contribuir en la seguridad aeronáutica. A través de sensores remotos montados a bordo de satélites es posible el monitoreo y seguimiento de las nubes de ceniza volcánica. En este trabajo utilizamos diferentes metodologías para clasificar escenas con ceniza volcánica, sin ceniza e inciertos, en base a la Diferencia de Temperatura de Brillo de cinco bandas infrarrojas del sensor ABI a bordo del satélite GOES-16. Se toma como caso de estudio la erupción del Volcán Ubinas (Perú) para el día 19 y 20 de julio del 2019. Los resultados de esta Nota Técnica contribuirán al desarrollo del sistema de verificación de la información de los pronósticos de dispersión de ceniza del VAAC Buenos Aires.

Abstract

The dispersion of volcanic ash in the atmosphere, originating from volcanic eruptions and wind erosion of volcanic ash deposits, called resuspension, causes environmental impacts, affects human activities at different scales and therefore its detection is of utmost importance. Volcanic Ash Advisory Centers (VAACs) monitor the presence of volcanic ash to contribute to aviation safety. Through remote sensors mounted on board satellites, it is possible to monitor and track volcanic ash clouds. In this study, we employ different methodologies to classify scenes as volcanic ash, ash-free and uncertain, based on the Brightness Temperature Difference of five infrared bands from the ABI sensor aboard the GOES-16 satellite. We use the eruption of the Ubinas Volcano in Peru on July 19 and 20, 2019, as a case study. The results of this Technical Note will contribute to the development of the verification system for the VAAC Buenos Aires ash dispersion forecast information.

Palabras clave: ceniza volcánica, clasificación, satélite, GOES-16, ABI, VAAC

Citar como:

Rodríguez. D., J. A. Díaz, M. Maurizi, L. Vidal y S. Osoreo, 2023: Algoritmo de identificación de nubes de ceniza volcánica en imágenes satelitales - Parte 2: sensor ABI. Nota Técnica SMN 2023-155.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de estas últimas décadas la navegación aérea ha experimentado períodos de gran perturbación debido a la erupción de volcanes cuyas cenizas fueron transportadas por los vientos a regiones atravesadas por rutas aéreas. Debido al aumento del tráfico aéreo y las características propias de las aeronaves, las nubes de ceniza volcánica son un riesgo importante para la aviación (Casadevall, 1994a,b; Casadevall y otros, 1996; Miller y Casadevall, 2000; Prata, 2009; Prata y Tupper, 2009), pudiendo producir la cancelación de cientos de vuelos incluso a miles de kilómetros del volcán (Guffanti y otros, 2010). Por otro lado, la caída de ceniza volcánica puede afectar el normal funcionamiento de los aeropuertos más cercanos al volcán. En Argentina, en el año 2011, el aeropuerto internacional de la ciudad de Bariloche, en la provincia de Río Negro, se mantuvo cerrado aproximadamente por siete meses debido a la caída de ceniza volcánica producto de la erupción del Complejo volcánico Puyehue Cordón Caulle (Elisondo y otros, 2016). Es así que la detección temprana de nubes de cenizas volcánicas es fundamental para minimizar los peligros que presentan las cenizas volcánicas que se desplazan hacia las rutas aéreas (Casadevall y otros, 1999; Guffanti y otros, 2005).

Para abordar la problemática de la detección de ceniza volcánica en la atmósfera se han desarrollado diversos trabajos combinando bandas térmicas para la clasificación de ceniza volcánica, utilizando instrumentos a bordo de satélites para distintos eventos de eruptivos tales como para las erupciones ocurridas en los volcanes Hekla en Islandia y el Cleveland en Alaska (Watson y otros, 2004), Eyjafjallajökull en Islandia y Soufriere Hills en la isla de Montserrat (Pavolonis y otros, 2013) y Monte Etna en Italia (Marchese y otros, 2021), entre otros. Osore y otros (2015) y Rodríguez y otros (2021) exploraron metodologías de clasificación de ceniza volcánica basadas en técnicas de diferencia de temperatura de brillo entre bandas (BTD, del inglés Brightness Temperature Difference) para su detección siguiendo a (Prata, 1989b,a). En dichos trabajos se estudió la utilización de diferentes BTD combinando canales térmicos para la detección de ceniza volcánica durante las erupciones del Complejo volcánico Puyehue Cordón Caulle en 2011, Calbuco en 2015 y Ubinas 2019 utilizando datos provenientes de satélites de órbita baja (LEO). Por otra parte, varios autores estudiaron metodologías de detección y cuantificación de nubes de ceniza basada en sensores a bordo de la nueva generación de satélites geoestacionarios (GEO) (Pavolonis y otros, 2020; Ishii y otros, 2023). La información registrada por estos satélites es muy valiosa porque permite caracterizar, detectar, monitorear, seguir la dinámica de las nubes de ceniza volcánica y cuantificar su contenido con una resolución temporal igual o menor a 15 min (Prata y Kerkmann, 2007; Francis y otros, 2012; Labazuy y otros, 2012).

Para la vigilancia en tiempo real los VAAC (Volcanic Ash Advisory Centre) utilizan productos provenientes de los datos adquiridos por los satélites geoestacionarios, ya que presentan alta resolución temporal, así como productos provenientes de los datos adquiridos por los satélites LEO. Estos últimos, a pesar de que tienen una menor resolución temporal (dos imágenes diarias) tienen una mayor resolución espacial y una mejor cobertura en las zonas polares. La gran cantidad de información que debe ser vigilada en los VAAC conlleva a la necesidad de tener herramientas de detección que faciliten el análisis a los pronosticadores y que contribuyan a la verificación de los productos del modelado numérico de dispersión. Es por ello que el objetivo de esta Nota Técnica es presentar una metodología mejorada para la clasificación de píxeles mixtos que contienen ceniza volcánica y SO₂, a partir del uso de 5 bandas térmicas y la máscara binaria de nubosidad del sensor ABI a bordo de satélite GOES-16. El análisis se focaliza en el estudio de la nube de ceniza volcánica producida por la erupción del volcán Ubinas, localizado en Perú (Fig. 1), ocurrida el 19 de julio de 2019. Los resultados de este trabajo contribuirán a la labor de vigilancia y verificación del VAAC Buenos Aires.

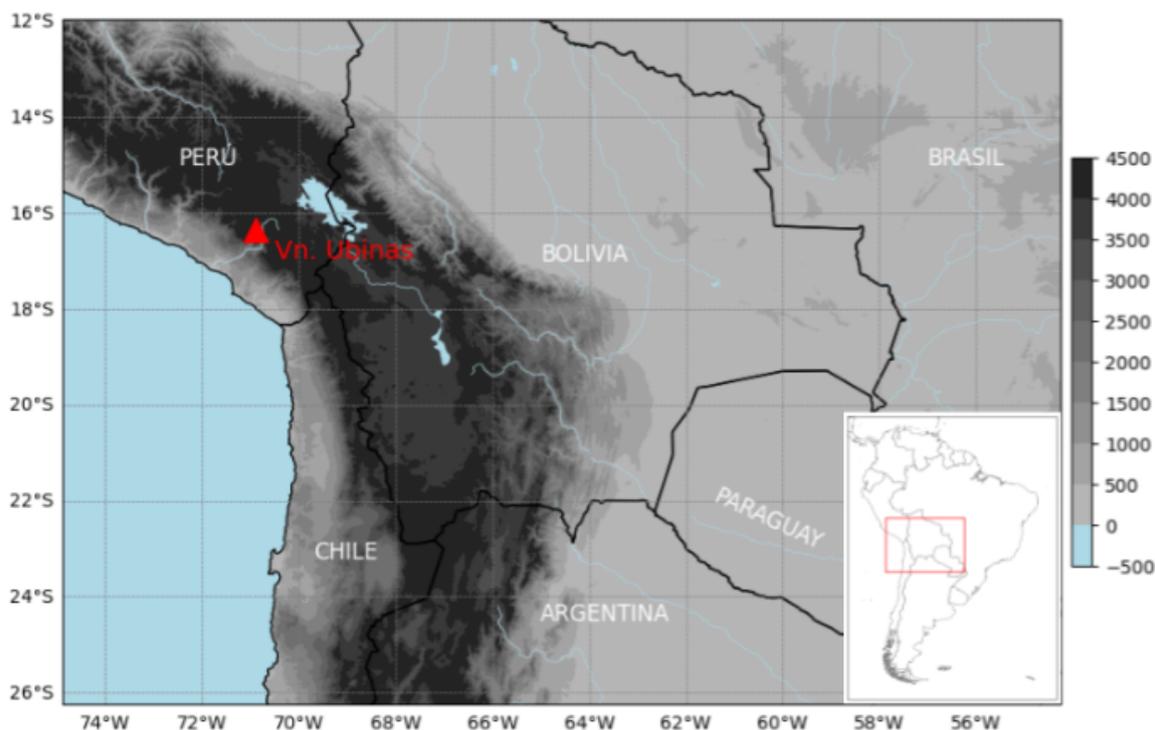


Figura 1: Región de estudio donde se indica la ubicación del Volcán Ubinas.

2. Respuesta espectral de la ceniza volcánica y del SO₂

Las nubes de ceniza volcánica están conformadas por una mezcla de gases (H₂O, CO₂, SO₂), partículas sólidas (fragmentos de roca, minerales y vidrio volcánico) y líquidas (ácido sulfúrico, gotas de agua). La presencia de gotas de ácido sulfúrico, SO₂ y partículas compuestas por sílice puede ser detectadas mediante distintas bandas de los canales visible e infrarrojos presentes en diversos satélites (Prata, 1989b; Ellrod y otros, 2003). Es importante destacar que la ceniza volcánica puede coexistir en la atmósfera junto con aerosoles de distintos orígenes, como polvo y humo, además de interactuar con nubes de agua y hielo, lo que implica la necesidad de distinguirla de superficies con distintas características tanto durante el día como la noche.

La ceniza volcánica interactúa con la radiación en diferentes partes del espectro electromagnético. En ciertos sectores del espectro, la ceniza volcánica atenúa la radiación de una manera única. Por ello, la detección de ceniza volcánica se basa principalmente en identificar cómo la radiación es absorbida o reflejada por la ceniza en comparación con su entorno y en presencia de nubes (Pavlonis, 2010).

Pavlonis y otros (2006) describió la parte imaginaria del índice de refracción de la ceniza volcánica de composición andesítica (es decir entre un 52 y 62 % de sílice), una nube de agua y una nube de hielo (Fig. 2). La parte imaginaria del índice de refracción tiene una relación directamente proporcional con la absorción/emisividad. Valores más elevados en la parte imaginaria del índice de refracción indican una mayor absorción de radiación a una longitud de onda específica. En la Figura 2 se puede notar que la ceniza presenta una mayor absorción de la radiación en especial entre los 7 y los 11.5 μm, mientras que el agua presenta mayor absorción que la ceniza en diferentes ventanas del espectro electromagnético, en particular alrededor de los 2.5 μm, 6 μm y por encima de los 12 μm. Las nubes de hielo presentan una respuesta similar al agua con una mayor absorción en longitudes de ondas

mayores a 11 μm .

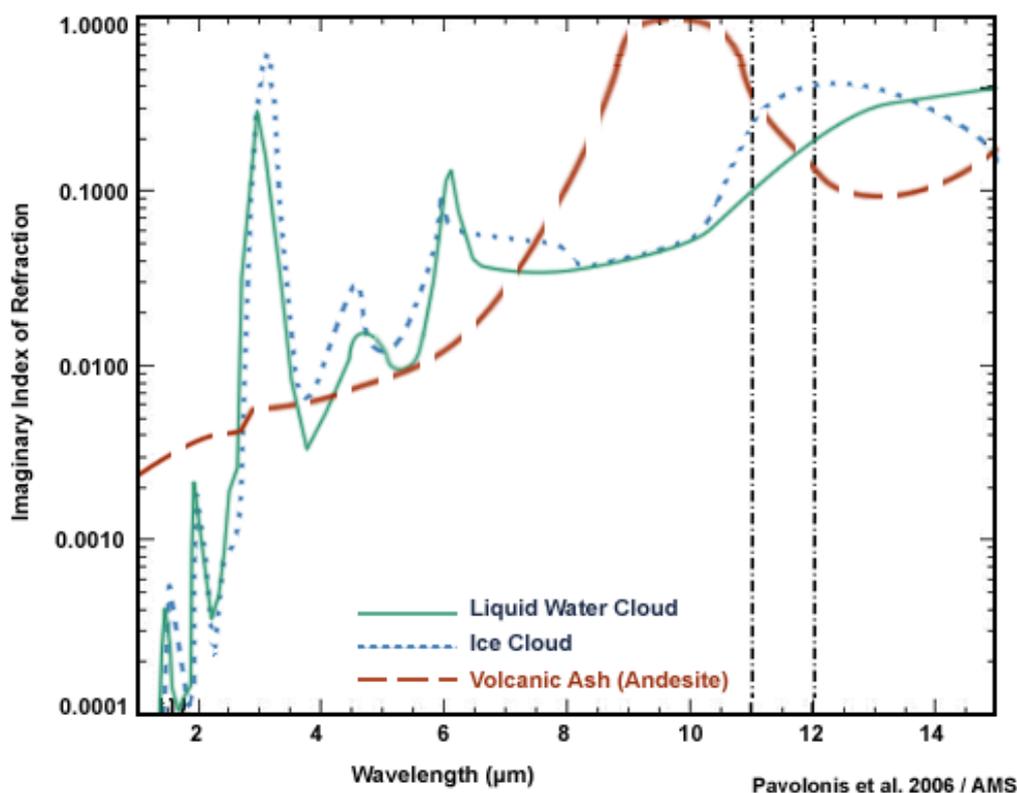


Figura 2: Parte imaginaria del índice de refracción de agua líquida (línea verde), hielo (línea de puntos azul) y ceniza volcánica andesítica (línea de rayas marrón) en función de la longitud de onda. Las líneas verticales indican longitudes de onda de 11 y 12 μm (Fuente: The COMET Program)

En base a la respuesta espectral de la ceniza, su detección se logra mediante la combinación de múltiples bandas espectrales que resaltan su señal en comparación con otros aerosoles. Empleando algoritmos que se basan en las diferencias entre las respuestas espectrales en diferentes longitudes de onda, la pluma de ceniza volcánica, las nubes de agua y el hielo pueden ser discriminadas.

Dentro de los algoritmos que se utilizan para identificar las nubes de ceniza volcánica; una de las técnicas más comunes para su detección consiste en la diferencia de la temperatura de brillo entre los canales de 11 y 12 μm , para detectar las plumas de ceniza volcánica y distinguirlas de las nubes meteorológicas (Prata, 1989b). Esta aproximación, a la que haremos referencia como BTD 11-12, ha sido empleada históricamente para calcular la profundidad óptica de las nubes de ceniza volcánica y nubes de polvo (Prata y Grant, 2001; Corradini y otros, 2010). Las partículas de ceniza absorben más radiación a 11 μm que a 12 μm , mientras que las partículas de hielo absorben menos radiación a 11 μm que a 12 μm (ver Fig. 3). Por ello, la diferencia de dichas bandas será negativa para una nube de cenizas volcánicas y polvo, mientras que será positiva para nubes meteorológicas. Este método se ha aplicado para identificar plumas de ceniza a través de diversos sensores y durante distintas erupciones volcánicas en el pasado (Prata, 1989b; Holasek y otros, 1996; Schneider y otros, 1995; Rose y otros, 1995; Casadevall y otros, 1998; Rose y Mayberry, 2000).

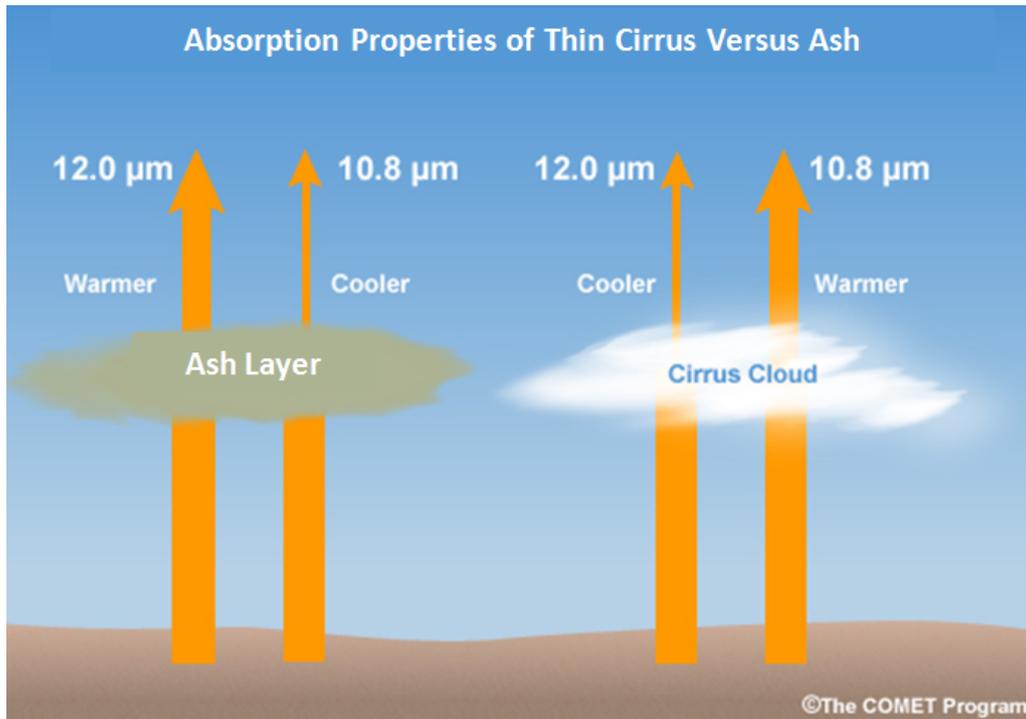


Figura 3: Transmisión a través de nubes de ceniza y nubes meteorológicas (Fuente: The COMET Program)

La presencia de concentraciones significativas de vapor de agua puede enmascarar/ocultar la señal negativa de BTD en la que se basa. Para abordar este desafío, varios investigadores han propuesto soluciones diversas. Heidinger y otros (2020) sugirieron la inclusión del canal de $13,3 \mu\text{m}$, especialmente eficaz en presencia de nubes cirros, ya que intensifica la sensibilidad a la temperatura de brillo de las nubes. Por otro lado, Prata (2012) propuso la introducción de un término de corrección relacionado con el vapor de agua. Asimismo, Pavolonis y otros (2020) planteó utilizar de manera conjunta la banda de $8,4 \mu\text{m}$ junto con las bandas de $10,3 \mu\text{m}$ y $12,3 \mu\text{m}$.

Por otro lado, las erupciones volcánicas además de emitir ceniza pueden emitir diferentes cantidades de SO_2 . En ocasiones se utiliza la detección del SO_2 como un proxy para la identificación de la nube de ceniza volcánica (Carn y otros, 2009). Aunque la emisión de SO_2 puede no ir acompañada de ceniza volcánica como también en caso de grandes erupciones la pluma de ceniza puede separarse de la de SO_2 corriente abajo (Constantine y otros, 2000; Schneider y otros, 1999).

La respuesta espectral del SO_2 varía en función de su concentración, durante erupciones volcánicas la concentración de SO_2 experimenta un marcado incremento, lo que resulta en una notable reducción de la radianza alrededor de $7,3 \mu\text{m}$ que llega hasta un sensor remoto (Fig. 4).

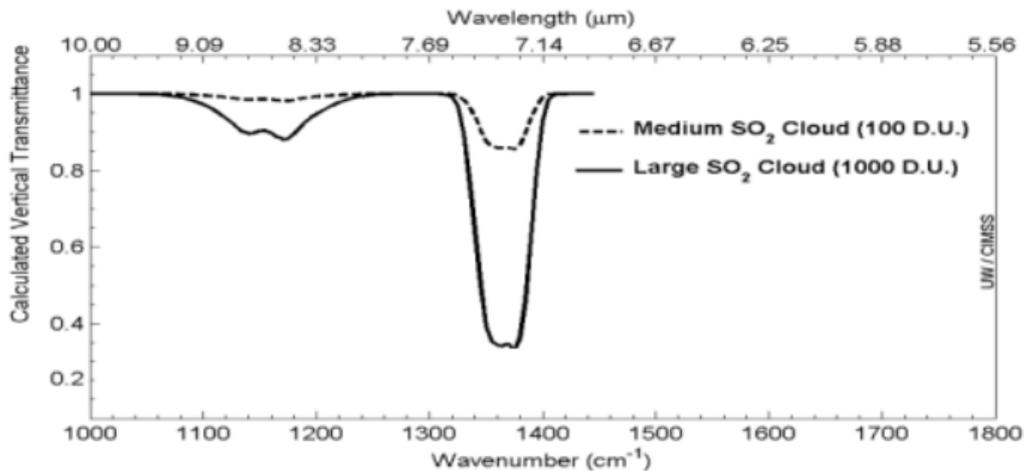


Figura 4: Transmitancia del SO₂ en función de la concentración (Fuente: CIMSS, Universidad de Wisconsin y CSIRO)

La respuesta espectral del SO₂ a diferentes longitudes de onda está estrechamente ligada a la altitud que alcanzan las nubes de SO₂ y, en muchos casos, se relaciona con la sensibilidad de los instrumentos empleados.

La firma espectral del SO₂ varía desde el ultravioleta (UV) hasta la región del infrarrojo térmico (TIR), y puede ser medida utilizando una variedad de instrumentos que abarcan diferentes rangos espectrales. Sin embargo, es importante destacar que estos diversos rangos espectrales pueden ser influenciados por la presencia de otras especies atmosféricas, como el ozono (O₃) y el vapor de agua, lo que afecta la precisión de las estimaciones. Específicamente, la detección del SO₂ en la banda de UV se ve afectada por la absorción de O₃, mientras que, en la banda del IR térmico, la absorción de SO₂ en 7,3 μm se ve significativamente influenciada por el vapor de agua atmosférico. Por otro lado, la banda de 8,7 μm se encuentra en una amplia ventana atmosférica con alta transmitancia, lo que la hace particularmente adecuada para la detección de SO₂ (Corradini y otros, 2021). Luego, al igual que para la detección de la ceniza volcánica, se puede utilizar la técnica de BTM para la detección del SO₂. En particular la BTM entre los canales 7,3 μm y 6,9 μm indica la presencia de SO₂ en niveles medios y altos de la atmósfera cuando toma valores negativos y la BTM entre los canales 8,5 μm y 10,3 μm la presencia de mezcla de ceniza volcánica y SO₂ en niveles medios de la atmósfera cuando los valores son positivos o negativos pero cercanos a cero (Guéhenneux y otros, 2015).

3. DATOS

GOES-16¹ es un satélite geoestacionario de última generación perteneciente a la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica del Departamento de Comercio de los Estados Unidos (NOAA², por sus siglas en inglés). Anteriormente fue nombrado como GOES-R, fue lanzado en noviembre de 2016 y se encuentra ubicado en 75°O y a una altura de aproximadamente 36.000 km. Es el primero en la serie GOES (R, S, T y U) extendiendo la disponibilidad de datos hasta aproximadamente el año 2036. Por otra parte, el instrumental que lleva a bordo mejoró la observación y detección de fenómenos ambientales con respecto a sus antecesores. Su instrumento principal es

¹<https://www.star.nesdis.noaa.gov/goes/fulldisk.php?sat=G16>

²<https://www.noaa.gov/>

el Generador Avanzado de Imágenes Base (ABI³, por sus siglas en inglés), que es un radiómetro pasivo multicanal (con 16 canales o bandas) diseñado para proveer de información del estado de la atmósfera, la cobertura nubosa y de la superficie terrestre. Este satélite es la principal fuente de información con la que opera el VAAC Buenos Aires.

Los 16 canales están distribuidos de la siguiente manera: dos en el espectro visible, cuatro en el infrarrojo cercano y diez en el infrarrojo medio y térmico (Schmit y otros, 2005). Algunos de estos canales coinciden con los de satélites de órbita polar, que en general tienen mejor resolución espacial, pero menor frecuencia temporal que los geoestacionarios. La frecuencia temporal para el sensor ABI es de 10 minutos, para imágenes de disco completo. La disponibilidad de 16 canales y la mejora en la resolución temporal proporcionan observaciones globales que contribuyen en la predicción y monitoreo de eventos severos como las erupciones volcánicas y el seguimiento de las nubes de ceniza.

Por otra parte, lleva a bordo otros instrumentos como el primer mapeador de rayos operacional (GLM⁴, por sus siglas en inglés,) que permite obtener información de rayos de nube a nube, así como también de nube a tierra para el monitoreo del desarrollo de tormentas severas que a menudo muestran un aumento significativo en la actividad total de rayos. También tiene un conjunto de instrumentos que permiten el monitoreo del clima espacial, detectan erupciones solares y contribuyen con el seguimiento de las partículas energéticas monitoreando las variaciones del campo magnético asociadas con el clima espacial.

Para el desarrollo de esta Nota Técnica se utiliza el producto de nivel 2 de procesamiento de imágenes de nubes y humedad multibanda (MCM⁵, por sus siglas en inglés). El mismo contiene los 16 canales o bandas espectrales con una resolución espacial de 2 km que permiten monitorear la Tierra, la atmósfera y el sistema oceánico. Los primeros 6 canales son reflectivos y la cantidad adimensional del factor de reflectancia está normalizada por el ángulo cenital solar. Estos canales aportan características de las nubes, vegetación, nieve/hielo y aerosoles. Los canales del 7 al 16 son emisivos y representan la temperatura de brillo en la parte superior de la atmósfera (TOA, por sus siglas en inglés) en grados Kelvin y representan características de la superficie, las nubes, el vapor de agua, el ozono, la ceniza volcánica y el polvo en función de las propiedades emisivas.

Por otra parte, se utiliza el producto máscara de cielo despejado (Clear Sky Mask⁶, por sus siglas en inglés), generado por un algoritmo booleano (verdadero/falso) que combina las bandas visibles e infrarrojas del sensor ABI y cuyo producto final es una imagen en forma de máscara binaria que identifica píxeles sin nube o con nube. Este valor es una cantidad adimensional correspondiendo el valor de 0 para píxeles sin nube y de 1 para píxeles con nubes, la resolución es de 2 km para las regiones de cobertura Full Disk, CONUS y Mesoescala. Los datos están geolocalizados y son generados para condiciones diurnas y nocturnas.

Los productos antes mencionados corresponden al día 19 de julio de 2019 a las 15:30 UTC y 18:00 UTC y para el día 20 de julio del mismo año a las 03:20 UTC. Los datos CMI fueron obtenidos del servicio de descarga Web de Amazon⁷ y el producto Clear Sky Mask (en adelante CSM) del sitio web de NOAA CLASS⁸. Para la generación de los distintos productos se muestra en detalle las bandas ABI L2 CMI con su correspondiente longitud de onda central (Ver Tabla 1) La lectura, visualización y procesamiento de los datos se realiza con el software QGIS⁹.

³<https://www.goes-r.gov/spacesegment/abi.html>

⁴<https://www.goes-r.gov/spacesegment/glm.html>

⁵<https://www.goes-r.gov/products/baseline-cloud-moisture-imagery.html>

⁶<https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C01503>

⁷<https://registry.opendata.aws/noaa-goes/>

⁸<https://www.avl.class.noaa.gov/saa/products/welcome>

⁹<https://qgis.org/es/docs/index.html>

Tabla 1: Descripción de las bandas del sensor ABI en formato multibanda (MCM1) empleadas en el presente trabajo.

Bandas/Canales Sensor ABI (L2-MCM1PF)	Longitud de onda central (μm)	Resolución espacial al nadir (km)
1	0,47	
2	0,64	
3	0,865	
9	6,95	2
10	7,34	
11	8,50	
13	10,35	
15	12,3	

4. METODOLOGIA

4.1. Clasificación

Guéhenneux y otros (2015) desarrollaron un algoritmo para la detección automática de nubes de ceniza volcánica a partir de datos del sensor SEVIRI¹⁰ a bordo del satélite geostacionario Meteosat de Segunda Generación (MSG¹¹, por sus siglas en inglés). Posteriormente Rodríguez y otros (2021) lo adaptaron para el sensor VIIRS¹², a bordo del satélite NOAA-20¹³, enfocando el análisis en la nube de ceniza volcánica asociada a la erupción del volcán Ubinas (Perú) del 19 de julio de 2019 a las 17:56 UTC a partir de tres bandas térmicas y de la combinación de dos BTDs: 10.76 μm - 12.01 μm y 8.55 μm - 10.76 μm . Luego, sobre estas dos BTDs, los autores aplicaron una serie de umbrales para obtener la clasificación final a partir de la discusión de dos métodos.

Este trabajo se centra en el mismo caso de estudio, pero utilizando los datos del sensor ABI a bordo del satélite GOES-16. De tal manera, que tomando como base la metodología aplicada para los sensores SEVERI¹⁴ y VIIRS, se adapta para el sensor ABI agregando dos bandas térmicas a las tres anteriores. De esta manera, para mejorar la clasificación de ceniza volcánica se realizaron tres experimentos aumentando la complejidad del algoritmo.

4.1.1. Generación de BTDs

Se utilizan las siguientes bandas centrales del producto MCM1: C09 (6.95 μm), C10 (7.34 μm), C11 (8.50 μm), C13 (10.35 μm) y C15 (12.3 μm) (Ver Tabla 1), para luego confeccionar las diferencias de temperatura de brillo (BTDs): BTD (C13-C15), BTD(C11-C13) y BTD(C10-C09) que se detallan en la Tabla 2.

Para definir el método y clasificar los datos se utilizan las diferencias de temperatura de brillo y el producto CSM que identifica pixeles con nube y sin nube, asignando el valor de uno y cero respectivamente. La Tabla 2 muestra en la primera columna, las BTDs centrados en las longitudes de onda expresadas y en la segunda los canales correspondientes al sensor ABI para las diferencias de temperatura de brillo.

Para determinar los umbrales de clasificación, se inspeccionan los valores de las BTDs de las tres escenas de nuestro caso de estudio en distintas zonas dentro de la nube de ceniza.

¹⁰<https://www.eumetsat.int/seviri>

¹¹<https://www.eumetsat.int/meteosat-second-generation>

¹²<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/viirs/>

¹³<https://ncc.nesdis.noaa.gov/NOAA-20/NOAA20VIIRS.php>

¹⁴<https://www.eumetsat.int/seviri>

Tabla 2: Descripción de las Diferencias de temperaturas de brillo (BTD) utilizadas en el presente trabajo

BTD	Canales del sensor ABI
C13-C15	10,3 μ m - 12,3 μ m
C11-C13	8,4 μ m - 10,3 μ m
C10-C09	7,3 μ m - 6,9 μ m

4.1.2. Método de 2 bandas

El método de 2 bandas (M2B) es el propuesto por (Prata, 1989b,a) llamado “Split Windows” que se basa en la BTD 11 μ m-12 μ m, y permite distinguir partículas de agua y/o hielo de aquellas que se componen de ceniza volcánica (ver Sección 2). Las limitaciones de esta técnica fueron documentadas por (Rodríguez y otros, 2021). Este método se basa en la diferencia de temperatura de brillo entre los canales 13 y 15 del sensor ABI (ver Tabla 1). Para este método se realiza una prueba obteniendo tres categorías: CENIZA (rojo) que es válida si $BTD_{(C13-C15)}$ es menor o igual que cero y el producto CSM es igual a 1, NO CENIZA (blanco) si la $BTD_{(C13-C15)}$ es mayor a cero y el producto CSM es igual a cero e INCIERTO (gris) que corresponde a los pixeles que no pertenecen a las condiciones definidas anteriormente y el producto CSM es igual a uno, indicando aquellos pixeles donde la presencia de nubes meteorológicas imposibilita la detección de ceniza o SO₂ (ver Tabla 3).

Tabla 3: Categorías y condiciones de clasificación de ceniza volcánica correspondientes al método de dos bandas (M2B)

Método	Categoría	Condición	Color
M2B	CENIZA	$[BTD_{(C13-C15)} \leq 0.0K] \& [CSM=1]$	
	NO CENIZA	$[BTD_{(C13-C15)} > 0.0K] \& [CSM=0]$	
	INCIERTO	No incluido en CENIZA 1 y 2 & $[CSM=1]$	

4.1.3. Método de 3 bandas

El método de tres bandas (M3B) fue utilizado por Pavolonis (2010), Pavolonis y Sieglaff (2010), Francis y otros (2012) y Guéhenneux y otros (2015) para distintos sensores a bordo de satélites de órbita geoestacionaria. Para el sensor ABI se utiliza el canal de 8,4 μ m para generar la $BTD_{(C11-C13)}$ donde valores positivos indican la presencia de pixeles contaminados por cenizas debido a la absorción del SO₂ (ver Tabla 2). Este método permite detectar pixeles mixtos, es decir pixeles con ceniza volcánica y SO₂ y se obtienen cuatro categorías (ver Tabla 4):

- **CENIZA 1 (rojo):** si la $BTD_{(C13-C15)}$ es menor o igual a -0.7K y $BTD_{(C11-C13)}$ mayor o igual a -1.2K, que considera pixeles que contienen ceniza y SO₂ en niveles bajos de la estratósfera y donde el producto CSM es igual a 1.
- **CENIZA 2 (naranja):** si los valores de $BTD_{(C13-C15)}$ son mayores que -0.7K y menores o iguales a 1.0K y $BTD_{(C11-C13)}$ con valores mayores o iguales a -0.1K que representa la condición de pixeles con ceniza y mixtos pero que es menos estricta que CENIZA 2 al tomar valores positivos de $BTD_{(C13-C15)}$ y donde el producto CSM es igual a 1.
- **NO CENIZA (blanco):** que corresponde a los pixeles no incluidos en las condiciones de CENIZA 1 y 2 y donde el producto CLEAR SKY MASK es igual a 0.

- **INCIERTO (gris):** a los pixeles que no cumplen con las condiciones de CENIZA 1 y 2 y donde CSM es igual a 1 indicando aquellos pixeles donde la presencia de nubes meteorológicas imposibilita la detección de ceniza o SO₂.

Tabla 4: Categorías y condiciones de clasificación de ceniza volcánica correspondientes al método de 3 bandas (M3B)

Método	Categoría	Condición	Color
M3B	CENIZA 1	$[BTD_{(C13-C15)} \leq -0.7K] \& [BTD_{(C11-C13)} \geq -1.2K] \& [CSM=1]$	Rojo
	CENIZA 2	$[-0.7K < BTD_{(C13-C15)} \leq 1.0K] \& [BTD_{(C11-C13)} \geq -0.1K] \& [CSM=1]$	Naranja
	NO CENIZA	No incluido en CENIZA 1 y 2 & $[CSM=0]$	Blanco
	INCIERTO	No incluido en CENIZA 1 y 2 & $[CSM=1]$	Gris

4.1.4. Método de 5 bandas

Para mejorar la detección de la nube de ceniza volcánica y basado en las BTDs de los canales del M3B se agrega la BTD entre las bandas térmicas de 7,3 um y 6.9 um ($BTD_{(C10-C09)}$) en adelante llamado “método de cinco bandas” (M5B) el cual permite la detección de columnas estratosféricas de SO₂ de altos niveles y cuyos valores menores o iguales a 0 representan la presencia del gas de SO₂. Se obtienen cuatro categorías (ver Tabla 5):

- **CENIZA 1 (rojo):** si $BTD_{(C13-C15)}$ es menor o igual a $-0,7K$ y $BTD_{(C11-C13)}$ es mayor o igual a $-1,2K$ o si la $BTD_{(C10-C09)}$ es menor o igual a cero y CSM es igual a 1 y representa la mezcla de ceniza y SO₂.
- **CENIZA 2 (naranja):** si los valores de $BTD_{(C13-C15)}$ son mayores a $-0.7K$ y menores o iguales a $1,0K$ y $BTD_{(C11-C13)}$ es mayor o igual a $-0,1K$ o si la $BTD_{(C10-C09)}$ es menor o igual a 0 y CSM es igual a 1 considerando pixeles con ceniza junto con otros que tienen mezcla de ceniza y SO₂ en capas medias y altas de la estratósfera. En este método la condición CENIZA 1 es más estricta que CENIZA 2 porque en su argumento, la $BTD_{(C13-C15)}$ considera valores negativos como ceniza volcánica.
- **NO CENIZA (blanco):** considera a los pixeles no incluidos en CENIZA 1 y CENIZA 2 y donde CSM es igual a 1.
- **INCIERTO (gris):** a los pixeles que no cumplen con las condiciones de CENIZA 1 y 2 y donde CSM es igual a 1 indicando aquellos pixeles donde la presencia de nubes meteorológicas imposibilita la detección de ceniza o SO₂.

Tabla 5: Categorías y condiciones de clasificación de ceniza volcánica correspondientes al método de 5 bandas (M5B)

Método	Categoría	Condición	Color
M5B	CENIZA 1	[$BTD_{(C13-C15)} \leq -0.7K$] and [$BTD_{(C11-C13)} \geq -1.2K$] or [$BTD_{(C10-C09)} \leq 0.0K$] and [CSM=1]	
	CENIZA 2	[$-0.7K < BTD_{(C13-C15)} \leq 1.0K$] and [$BTD_{(C11-C13)} \geq -0.1K$] or [$BTD_{(C10-C09)} \leq 0.0K$] and [CSM=1]	
	NO CENIZA	No incluido en CENIZA 1 y 2 and [CSM=0]	
	INCIERTO	No incluido en CENIZA 1 y 2 and [CSM=1]	

4.2. Composiciones RGB

Se utilizan composiciones RGB para analizar las nubes de ceniza volcánica y así poder detectar algunas características a través de los colores que estas representan y compararlas con la clasificación obtenida. A continuación, se describen los productos RGB utilizados en la presente Nota Técnica.

4.2.1. Color Verdadero

Para las composiciones en Color Verdadero se utiliza la fórmula propuesta por (Bah y otros, 2018) en la que considerando las bandas espectrales de $0,74 \mu m$, $0,64 \mu m$ y $0,865 \mu m$ (que llamaremos C1, C2 y C3 respectivamente), se le asigna el color rojo a C2, el verde a $(0.45 \cdot C2) + (0.10 \cdot C3) + (0.45 \cdot C1)$ y el azul a C3.

4.2.2. Ceniza Volcánica

Para detectar la presencia de ceniza volcánica se utiliza el producto RGB de Ceniza Volcánica¹⁵ propuesto por Pavolonis (2013) que combina la BTD $12,3 \mu m - 10,3 \mu m$ a la cual asigna al color rojo, la BTD $10,3 \mu m - 8,7 \mu m$ al verde y la temperatura de brillo en $10,3 \mu m$ al azul. En esta composición la ceniza volcánica se muestra en tonos que van del rojo al magenta, en color amarillo la mezcla de partículas de ceniza y SO_2 , en verde claro la presencia del SO_2 y en ocre nubes espesas compuestas con partículas de hielo. Los colores dependen del ángulo de visión, la concentración, la transparencia de las nubes, su temperatura, la emisividad superficial y el contenido de vapor de agua presente en la atmósfera.

4.2.3. Dióxido de Azufre (SO_2)

En la mayoría de los casos, las erupciones volcánicas están compuestas de ceniza volcánica y una mezcla de gases, como son el vapor de agua y el SO_2 . Para el producto RGB de SO_2 ¹⁶ se utiliza el producto desarrollado

¹⁵<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jgrd.50173>

¹⁶https://rammb.cira.colostate.edu/training/rmtc/docs/QuickGuides/QuickGuide_5O2RGBes.pdf

por la Agencia Meteorológica de Japón (JMA, por sus siglas en inglés), para el satélite Himawari, donde la BTD $6,9\mu\text{m}-7,3\mu\text{m}$ se asigna al rojo, la BTD $12,3\mu\text{m}-10,3\mu\text{m}$ al verde y la temperatura de brillo de $10,3\mu\text{m}$ al azul.

5. RESULTADOS

5.1. Cronología del evento

A continuación, se describen los resultados obtenidos en forma cronológica correspondiente a las imágenes de color verdadero (Fig. 5), RGB de ceniza (Fig. 6) y RGB de SO_2 (Fig. 7) que se describen en la Sección 4.2. Por otra parte, se muestran los resultados obtenidos en la clasificación para las escenas del 19 de julio de 2019 y el 20 de julio de 2019.

Para el día 19 de julio de 2019 a las 15:30 UTC se observa la nube de ceniza volcánica emanando del volcán. En la Figura 5a del producto de color verdadero la nube de ceniza se ve en tonos marrones y en algunas zonas se superpone con la nubosidad meteorológica (en color blanco). En la Figura 6a del producto RGB de ceniza, los colores magenta corresponden a ceniza volcánica variando su intensidad de brillante a más claro a medida que la nube se desplaza hacia el este donde los tonos amarillos corresponden a la mezcla de ceniza y SO_2 . Corriente abajo, los tonos verdes claro indican la presencia exclusiva de SO_2 y se observa tonos ocres dentro de la nube de ceniza que corresponden a nubes altas de gran espesor óptico que contienen partículas de hielo. Por otra parte, se observa al sudeste del volcán, una región donde predomina el color magenta menos intenso y que también corresponde a nube de ceniza volcánica coincidiendo con lo observado en tonos marrones en las imágenes de color verdadero. En la Figura 7a del producto RGB de SO_2 , los tonos naranjas brillantes indican la presencia de SO_2 en niveles superiores de la atmósfera dentro de un entorno frío, pero a medida que la nube se desplaza hacia el este van perdiendo intensidad y se observan tonos amarillos respondiendo a la señal de SO_2 en niveles superiores dentro de un entorno cálido. Por otra parte, al sudeste del volcán y al sur de la zona naranja brillante no hay contribución de la componente roja (C09–C10) y en el verde (C13–C11) es mínima, pero hay gran contribución en el canal azul (C13). De ahí la poca presencia de SO_2 en niveles bajos.

Para el día 19 de julio de 2019 a las 18:00 UTC la nube se desplazó hacia el este, corriente abajo. En la Figura 5b algunos tonos marrones de la nube de ceniza se superponían con la nubosidad meteorológica como en la escena de las 15:30 UTC. En la Figura 6a los tonos del magenta son más tenues (llegando aproximadamente hasta el centro de Bolivia). Y a partir de allí corriente abajo, los tonos amarillos indican la mezcla de ceniza volcánica con SO_2 y los tonos verdes la presencia exclusiva de SO_2 . Por otra parte, los tonos ocres continúan indicando la presencia de nubosidad meteorológica. En la Figura 7b los tonos naranjas brillante y amarillo se localizan hacia el este. Corriente abajo se observa una zona en tono verde claro, indicando la presencia de SO_2 en niveles bajos, y un pulso de tono amarillo que probablemente se desprendió de la pluma principal de SO_2 .

Para el día 20 de julio de 2019 a las 03:10 UTC (día siguiente de la primera erupción), se observa en la Figura 6c la nube de ceniza volcánica en tonos magenta, en forma de franja, atravesando el centro, este-sudeste de Bolivia y norte de Paraguay y que en la Figura 7c se ve en tonos de azul tenues debido a poca presencia de SO_2 . Por otra parte, en el norte de Paraguay y en la región Mato Grosso del Sur (al oeste de Brasil) los colores magenta se intensifican y al noreste se observa una zona en color amarillo que corresponde a la mezcla de ceniza volcánica y SO_2 (Fig. 6c) y que en la Figura 7c se ve en tono amarillo-anaranjado claro respondiendo a la presencia de SO_2 de niveles superiores dentro de un entorno cálido.

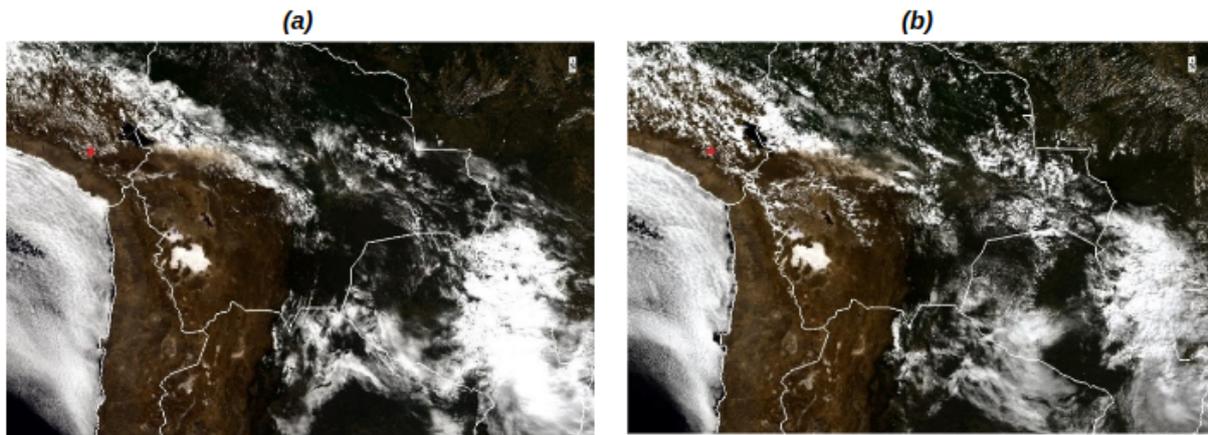


Figura 5: Producto RGB Color verdadero para el día 19 de julio de 2019 a las (a) 15:30 UTC y (b) 18:00 UTC. La ubicación del Volcán Ubinas se indica con un triángulo rojo.

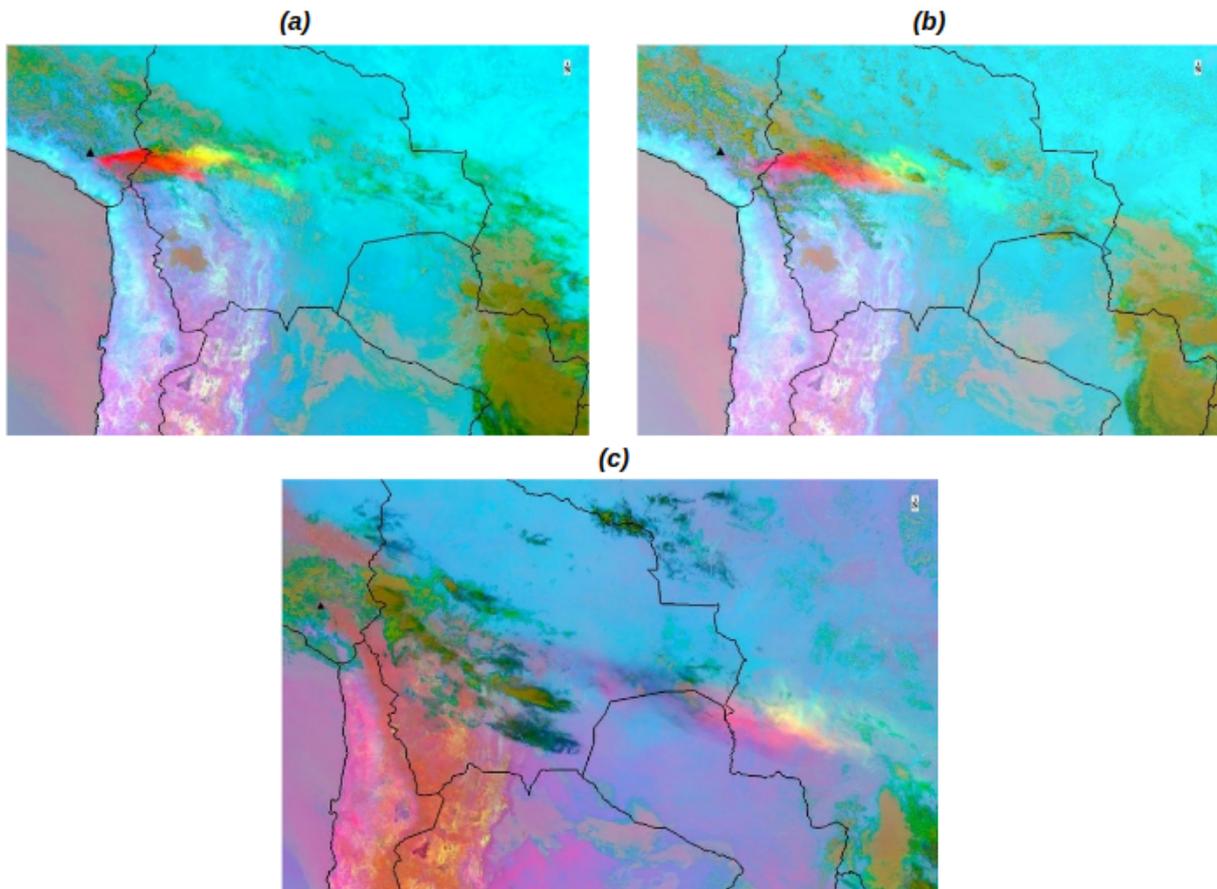


Figura 6: Producto RGB Ceniza volcánica para el día 19 de julio de 2019 a las (a) 15:30 UTC y (b) 18:00 UTC, y para 20 de julio a las 03:10 UTC (c). La ubicación del Volcán Ubinas se indica con un triángulo negro

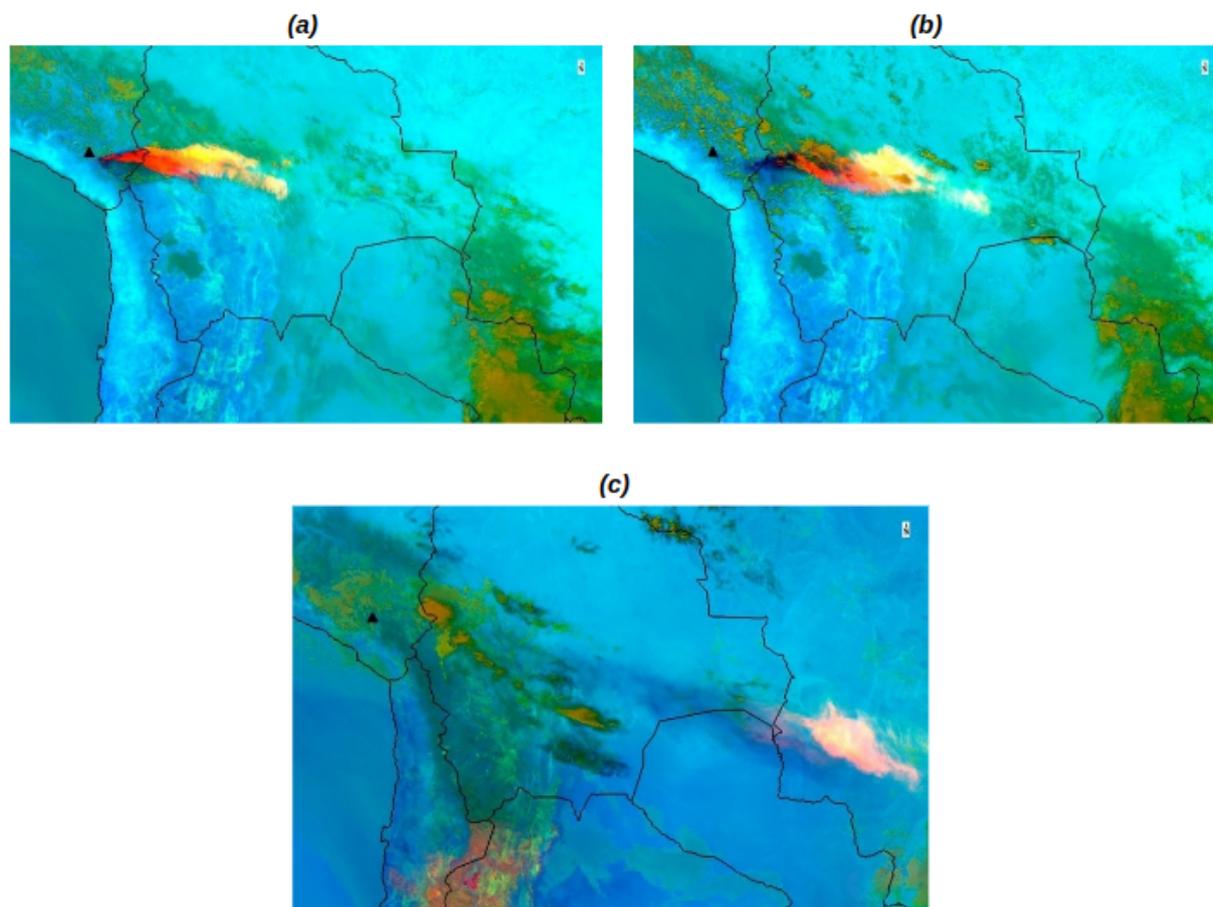


Figura 7: Producto RGB de SO_2 para el día 19 de julio de 2019 a las (a) 15:30 UTC y (b) 18:00 UTC, y para el 20 de julio a las 03:10 UTC (c). La ubicación del Volcán Ubinas se indica con un triángulo negro

5.2. Resultados para el 19 de julio de 2019 a las 15:30 UTC

En el M2B (Fig. 8a) la categoría CENIZA (rojo) corresponde a la nube de ceniza volcánica saliendo del volcán y coincide con los tonos magenta brillante, naranja y algunos amarillos del producto RGB de ceniza (Fig. 8b). Sin embargo, al sureste del volcán hay una zona donde el RGB de ceniza toma color magenta claro y los píxeles no son detectados por este método. Por otra parte, el M2B muestra falsas alarmas sobre el Océano Pacífico y las regiones áridas. Al incluir el producto CSM se genera la categoría INCIERTO (gris) y gran cantidad de píxeles de la región árida son descartados, sin embargo, siguen permaneciendo las falsas alarmas que se encuentran en el Océano Pacífico coincidiendo con nubosidad estratiforme (ver Fig. 8c).

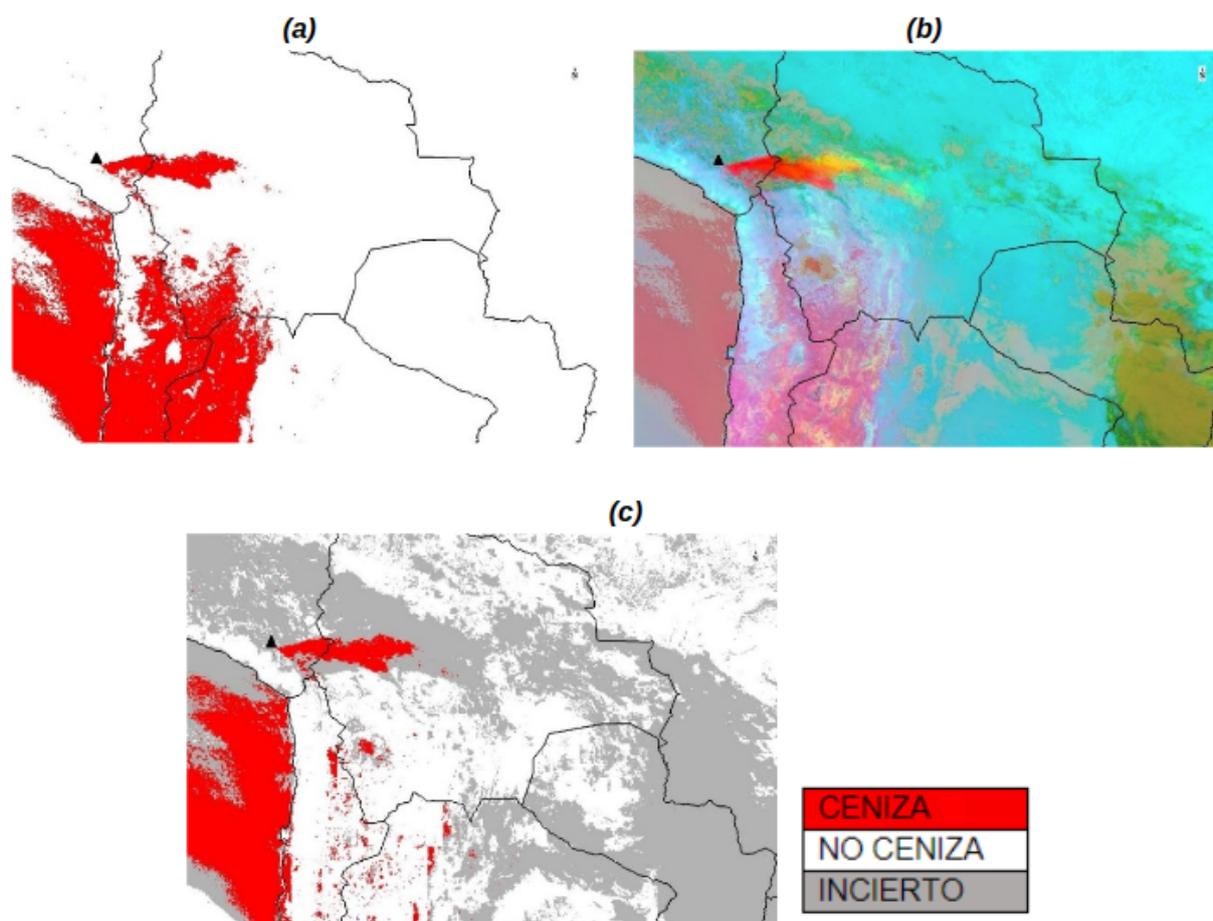


Figura 8: Resultados de aplicar el método de clasificación de dos bandas (M2B), para el día 19 de julio de 2019 a las 15:30 UTC. Donde (a) es el resultado de la clasificación, (b) es la superposición de la clasificación con el RGB de ceniza volcánica y (c) la clasificación final aplicando el producto CSM. La ubicación del Volcán Ubinas se indica con un triángulo negro.

En el M3B (Fig. 9a) las categorías de CENIZA 1 (rojo) y CENIZA 2 (naranja) corresponden a la nube de ceniza volcánica saliendo del volcán y detecta la mezcla de ceniza y SO_2 en niveles bajos de la estratósfera. Los tonos magenta brillante/claros y naranjas del RGB de ceniza coinciden con la categoría CENIZA 1 y los magentas más claros ubicados al sudeste del volcán con CENIZA 2, (ver Fig. 9b). El M3B mejora la detección de la nube de ceniza ubicada al sudeste del volcán CENIZA 2, (naranja), pero no detecta los píxeles hacia el este de la nube que detectaba el M2B. Sin embargo, descarta las falsas alarmas en el Océano Pacífico, permaneciendo todavía algunas en zonas áridas. Al agregar el producto CSM se genera la categoría INCIERTO (gris) y se filtran más aún los píxeles de la región árida (ver Fig. 9c).

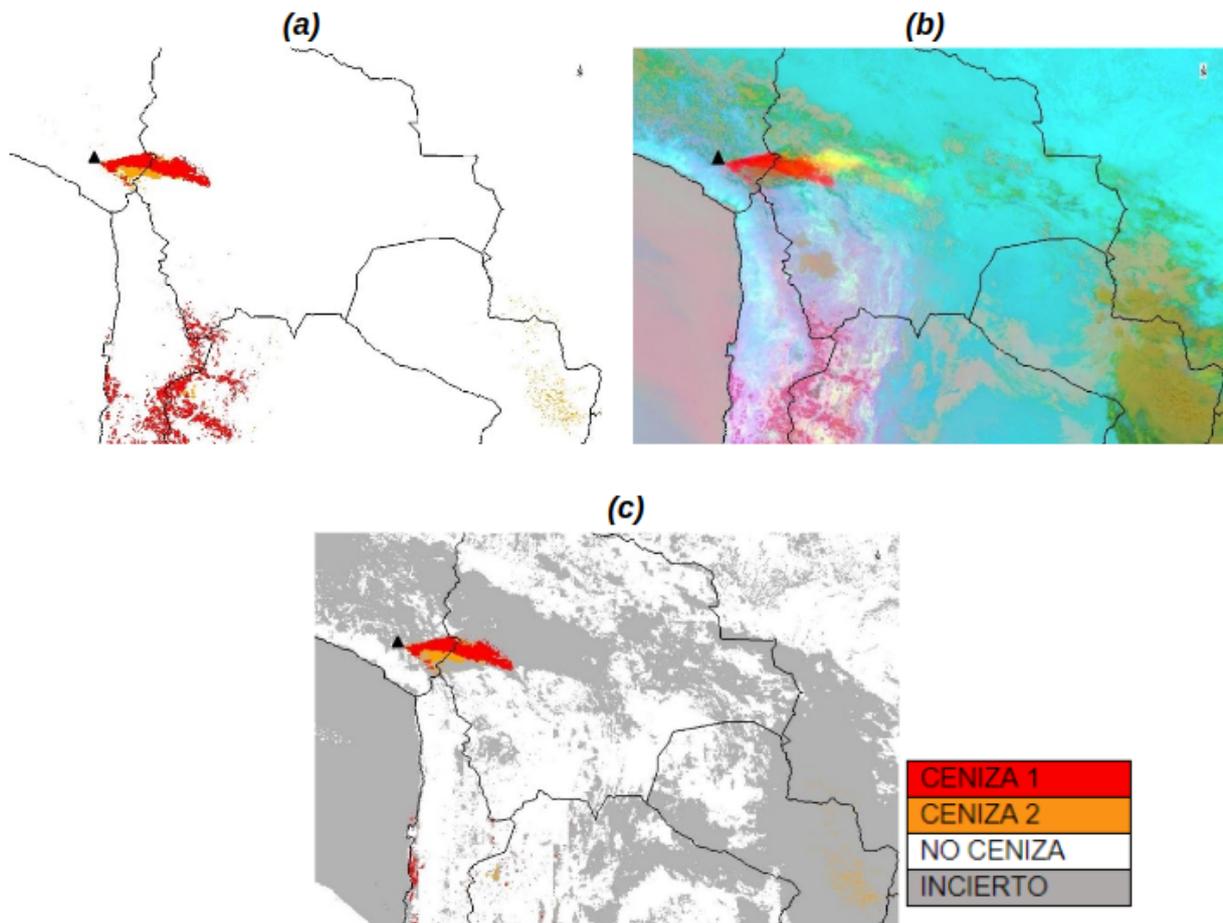


Figura 9: Ídem Fig. 8 pero para el Método de clasificación de tres bandas (M3B), del día 19 de julio de 2019 a las 15:30 UTC. La ubicación del Volcán Ubinas se indica con un triángulo negro.

En el M5B (Fig. 10a) las categorías CENIZA 1 (rojo) y CENIZA 2 (naranja) corresponden a la nube de ceniza volcánica saliendo del volcán y detecta la mezcla de ceniza y SO₂ en niveles bajos, medios y/o altos de la estratósfera incluyendo los pixeles que se encuentran hacia el este y que el M3B no detectaba. La superposición del M5B con el producto RGB de ceniza coincide con los tonos magenta brillante/claros, naranja y amarillos (ver Fig. 10b). Al agregar el producto CSM se genera la categoría INCIERTO (gris) y se filtran más aun los pixeles de la región árida, aunque siguen apareciendo al sudeste de Paraguay algunos pixeles que el M5B detecta como CENIZA 2 y que son falsas alarmas (ver Fig. 10c).

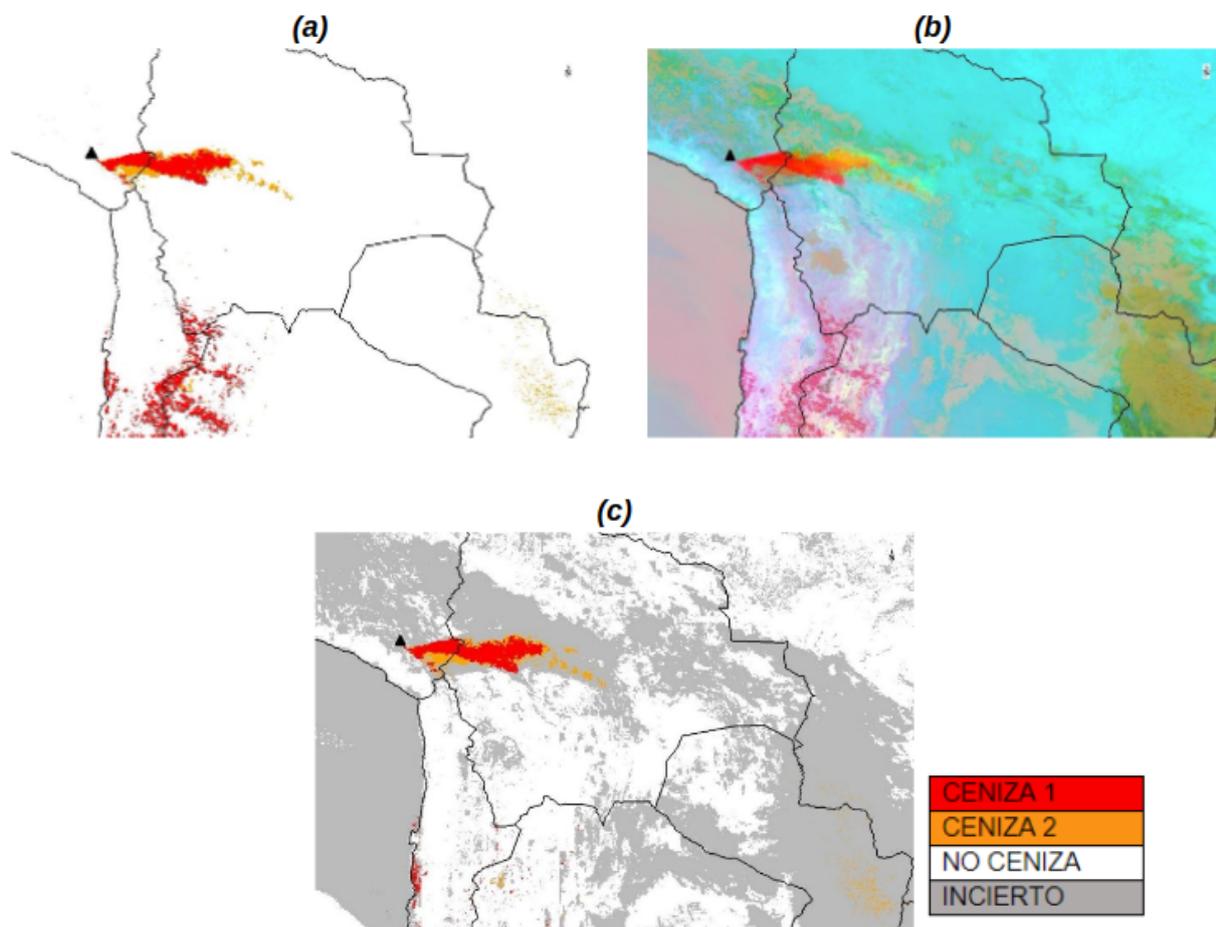


Figura 10: Ídem Fig. 8 pero para el método de clasificación de cinco bandas (M5B), del día 19 de julio de 2019 a las 15:30 UTC. La ubicación del Volcán Ubinas se indica con un triángulo negro.

5.3. Resultados para el 19 de julio de 2019 a las 18:00 UTC

En el M2B (Fig. 11a) la categoría CENIZA (rojo) corresponde a la nube de ceniza volcánica saliendo del volcán y coincide con los tonos magenta brillante, naranja y algunos amarillos del producto RGB de ceniza, sin embargo, al sudeste del volcán en la zona donde el RGB de ceniza toma color magenta claro los pixeles no son detectados por este método al igual que la escena de las 15:30 UTC (Fig. 11b). Por otra parte, el M2B muestra falsas alarmas sobre el Océano Pacífico y las regiones áridas. Al agregar el producto CSM se genera la categoría INCIERTO (gris) y se filtran aún más los pixeles de la región árida, pero siguen permaneciendo las falsas alarmas en el Océano Pacífico (Fig. 11c).

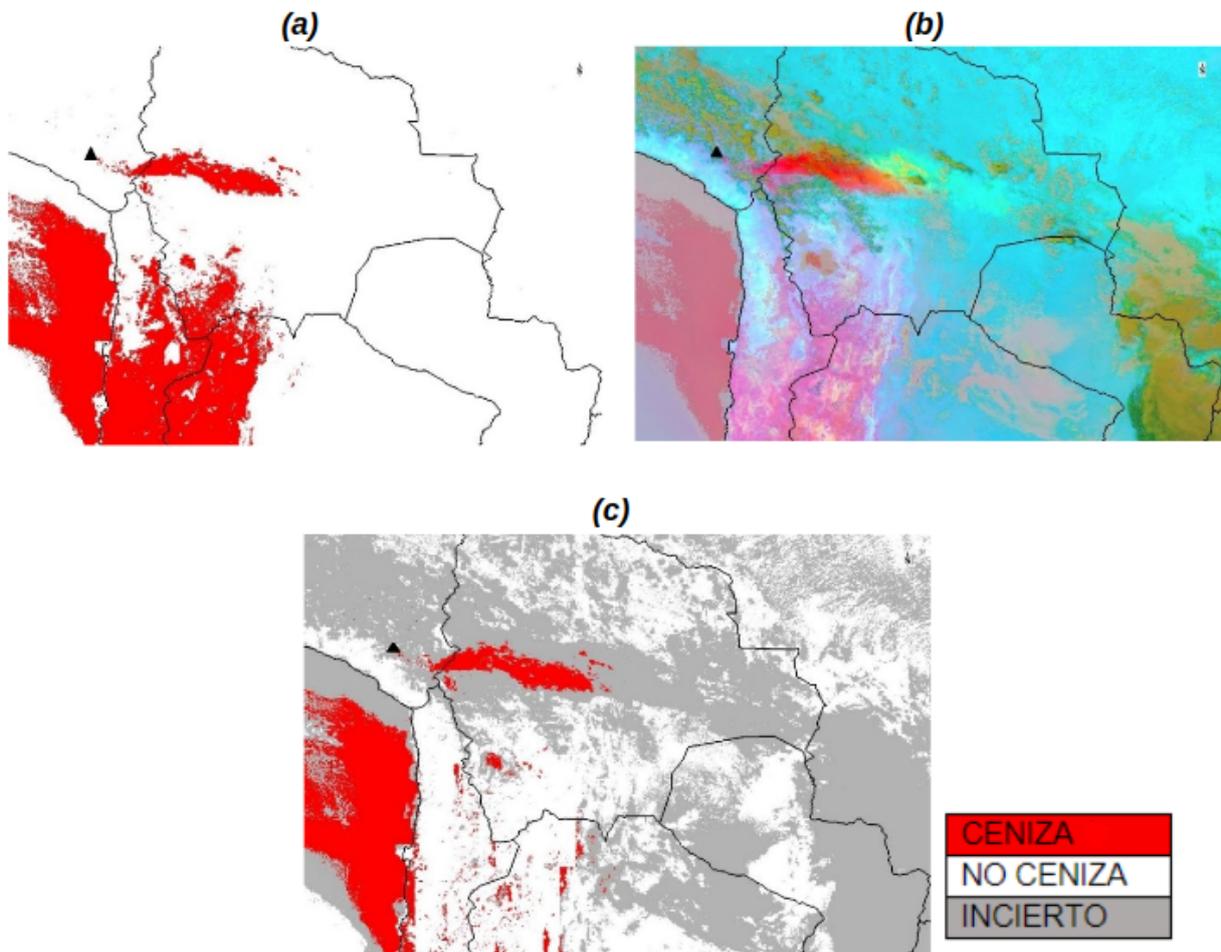


Figura 11: Resultados de aplicar el método de clasificación de dos bandas (M2B), para el día 19 de julio de 2019 a las 18:00 UTC. Donde (a) es el resultado de la clasificación, (b) es la superposición de la clasificación con el RGB de ceniza volcánica y (c) la clasificación final aplicando el producto CSM. La ubicación del Volcán Ubinas se indica con un triángulo negro.

En el M3B (Fig. 12a) las categorías de CENIZA 1 (rojo) y CENIZA 2 (naranja) corresponden a la nube de ceniza volcánica saliendo del volcán y detectan la mezcla de ceniza volcánica y de SO₂ en niveles bajos de la estratósfera. La misma coincide con los tonos magenta brillante/claros, naranjas algunos amarillos del producto RGB de ceniza (Fig. 12b). El M3B mejora la detección de la nube de ceniza ubicada al sudeste del volcán CENIZA 2, pero al igual que en la escena de 15:30 UTC no detecta los píxeles que se encuentran hacia el este de la nube y que el M2B sí detectaba. Descarta las falsas alarmas en el Océano Pacífico, pero todavía permanecen las falsas alarmas en algunas zonas áridas. Al agregar el producto CSM se genera la categoría INCIERTO (gris) se filtran más aun los píxeles de la región árida (Fig. 12c).

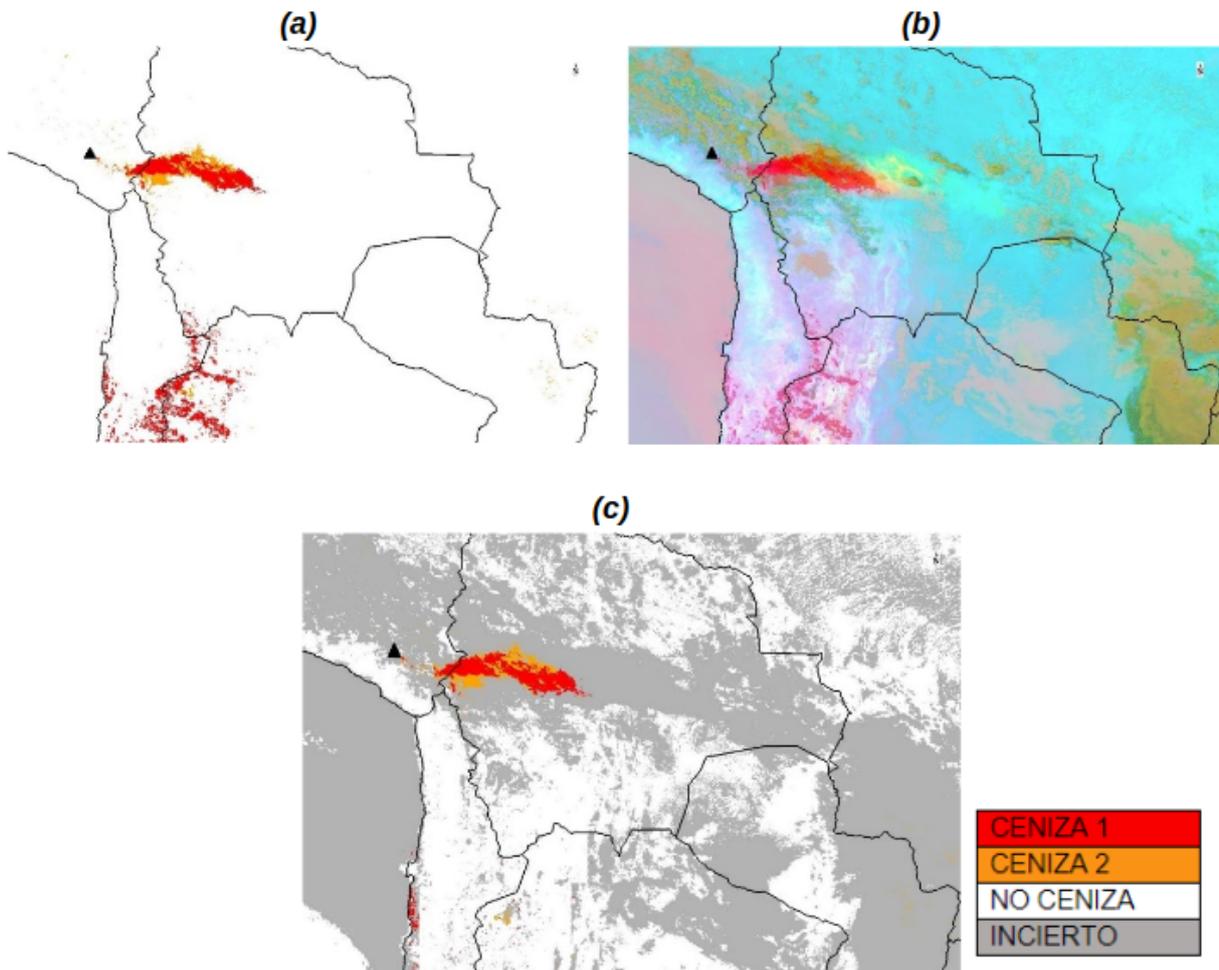


Figura 12: Ídem Fig. 11 pero para el Método de clasificación de tres bandas (M3B), del día 19 de julio de 2019 a las 18:00 UTC. La ubicación del Volcán Ubinas se indica con un triángulo negro.

En el M5B (Fig. 13a) las categorías CENIZA 1 y CENIZA 2 corresponden a la nube de ceniza volcánica saliendo del volcán y detecta la mezcla de ceniza volcánica y SO_2 en niveles bajos, medios y/o altos de la estratósfera incluyendo pixeles que se encuentran hacia al este y que el M3B no detectaba. La superposición del M5B con el producto RGB de ceniza coincide con los tonos magenta brillante/claros, naranja y amarillos (Fig. 13b). Al agregar el producto CSM se genera la categoría INCIERTO (gris) y se filtran aún más los pixeles de la región árida (Fig. 13c).

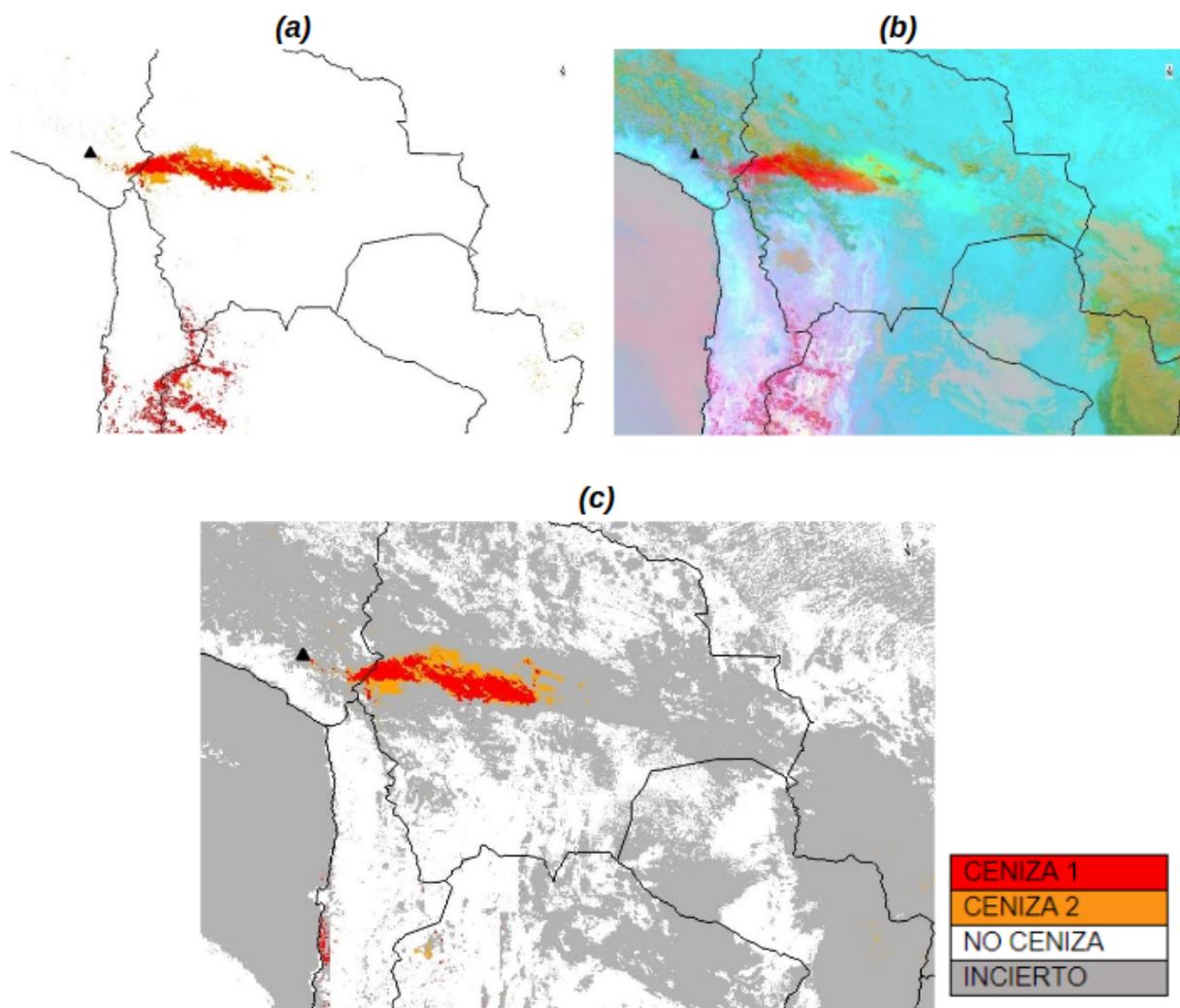


Figura 13: Ídem Fig. 11 pero para el Método de clasificación de tres bandas (M5B), del día 19 de julio de 2019 a las 18:00 UTC. La ubicación del Volcán Ubinas se indica con un triángulo negro.

5.4. Resultados para el 20 de julio de 2019 a las 03:10 UTC

La Figura 14a corresponde al M2B donde la nube principal de CENIZA (rojo) se desplazó hacia el este y se localiza en Brasil con dirección al Estado de San Pablo. Al igual que en las imágenes del 19 de julio a las 15:30 UTC (Fig. 8a) y 18:00 UTC (Fig. 11a) se observan falsas alarmas sobre el Océano Pacífico y regiones áridas, aunque en este caso la región es más extensa. En la superposición con el producto RGB de ceniza (Fig. 14b) se observa coincidencia con los tonos magenta claro y amarillo de la nube principal de ceniza. Al noroeste de la nube de ceniza principal se encuentra una franja en tono magenta muy claro que no es detectada por este método y que corresponde a parte de una pluma de ceniza volcánica muy traslucida. Al agregar el producto CSM (Fig. 14c) se genera la categoría INCIERTO (gris) que descarta la mayor parte de los píxeles que corresponden nube de ceniza volcánica principal y los de zonas áridas y continúan apareciendo falsas alarmas en el Océano Pacífico al igual que en las imágenes del 19 de julio de 2019.

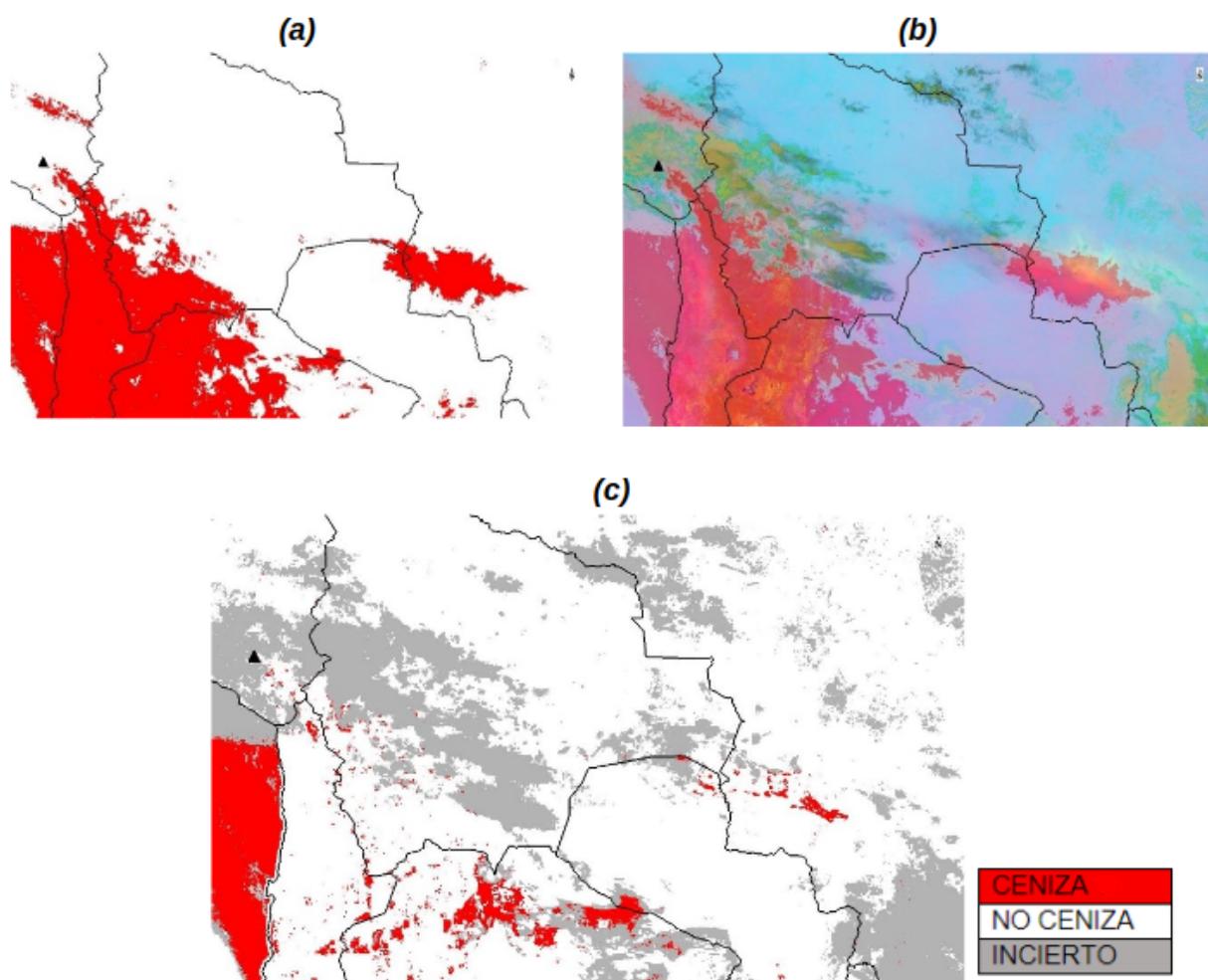


Figura 14: Resultados de aplicar el método de clasificación de dos bandas (M2B), para el día 20 de julio de 2019 a las 03:10 UTC. Donde (a) es el resultado de la clasificación, (b) es la superposición de la clasificación con el RGB de ceniza volcánica y (c) la clasificación final aplicando el producto CLEAR SKY MASK. La ubicación del Volcán Ubinas se indica con un triángulo negro.

En la Figura 15a del M3B, la cantidad de píxeles detectados como CENIZA 1 (rojo) de la nube de ceniza principal es mucho menor que en el M2B. Por otra parte, en la región árida continúan apareciendo píxeles que corresponden a CENIZA 1 (rojo) y algunos a CENIZA 2 (naranja) pero se descartan las falsas alarmas en el Océano Pacífico. En la Figura 15b que corresponde a la superposición de la clasificación del M3B con el producto de ceniza Volcánica RGB se observa que nube de ceniza volcánica principal detectada por el M3B coincide en gran parte con el magenta claro del producto RGB de ceniza, sin embargo, en la región de la nube donde prevalecen los tonos amarillos (mezcla de ceniza y SO_2) el M3B no lo detecta. Al agregar el producto CSM (Fig. 15c) se genera la categoría INCIERTO (gris) y los píxeles que corresponden a la nube de ceniza y que eran detectados como CENIZA 1 son descartados, detectando unos pocos como CENIZA 1 y 2 en las zonas áridas. Esto sucede porque en este caso el producto CSM no detecta nubosidad en la región en la que se encuentra la nube de ceniza volcánica.

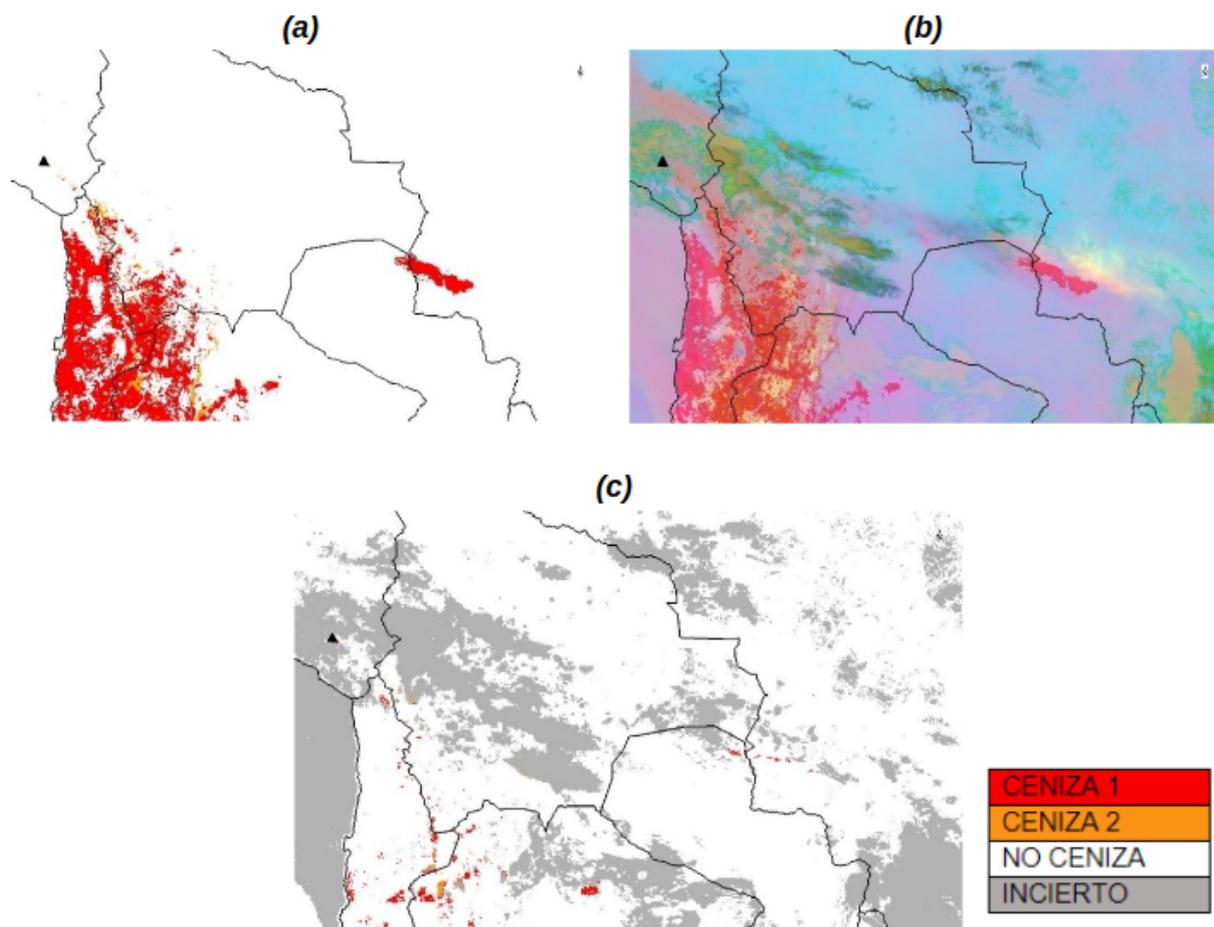


Figura 15: Ídem Fig. 14 pero para el Método de clasificación de tres bandas (M3B), del día 20 de julio de 2020 a las 03:10 UTC. La ubicación del Volcán Ubinas se indica con un triángulo negro.

En el M5B (Fig. 16a) las categorías CENIZA 1 (rojo) y CENIZA 2 (naranja) que corresponden a la nube de ceniza volcánica principal, detectan la mezcla de ceniza volcánica y SO₂ de niveles bajos, medios y/o altos de la estratósfera, a diferencia del M3B. Sin embargo, el M5B sigue sin detectar la franja color magenta claro que se encuentra al noroeste de la nube de ceniza principal y continúan apareciendo falsas alarmas en la región árida. En la superposición del M5B con el producto RGB de ceniza se observa como coinciden los tonos magenta y amarillos claros con la nube de ceniza (Fig. 16b). Al agregar el producto CSM (Fig. 16c) se genera la categoría INCIERTO (gris) y gran parte de los pixeles que corresponden a la nube de ceniza y que eran detectados como CENIZA 1 y 2 son descartados, sin embargo, disminuyen notablemente las falsas alarmas en la región árida.

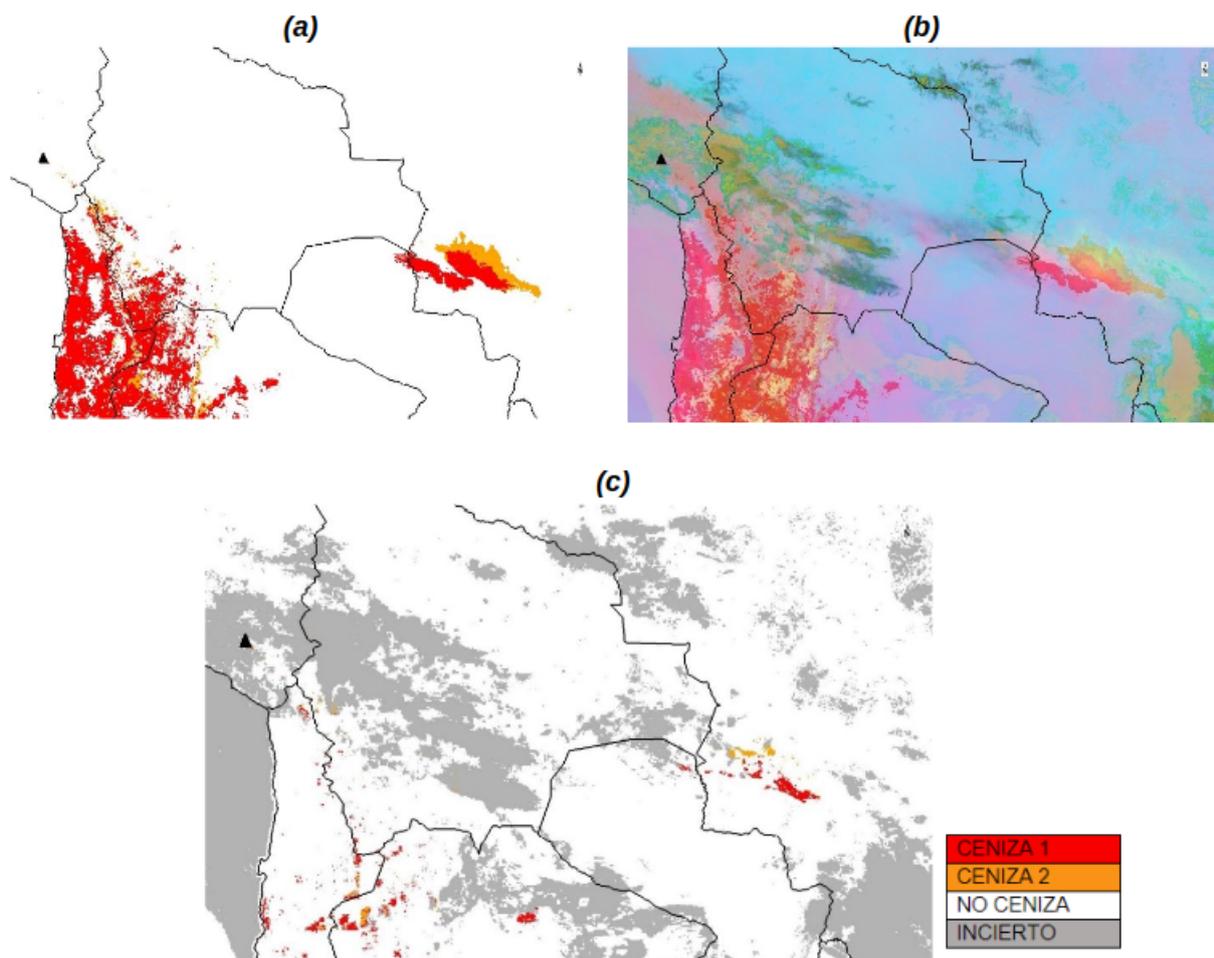


Figura 16: Ídem Fig. 14 pero para el método de clasificación de cinco bandas (M5B), del día 20 de julio de 2019 a las 03:10 UTC. La ubicación del Volcán Ubinas se indica con un triángulo negro.

6. CONCLUSIONES

En esta Nota Técnica se analizan los resultados de la implementación de tres métodos de clasificación (M2B, M3B y M5B) utilizando hasta cinco bandas del espectro infrarrojo del sensor ABI a bordo del satélite GOES-16 para la detección de píxeles mixtos de ceniza y SO_2 para un caso de estudio de las erupciones del Volcán Ubinas (Perú) registradas los días 19 y 20 de julio de 2019.

Los resultados muestran que el método M2B sobrestima la presencia de ceniza, con una gran cantidad de falsas alarmas en regiones áridas y en zonas oceánicas. Mientras que el M3B, al incorporar la $\text{BTD}_{(C11-C13)}$ y la $\text{BTD}_{(C13-C15)}$ permite incluir píxeles mixtos (ceniza volcánica y SO_2) sin embargo aún sigue sin incluir los píxeles que contienen únicamente ceniza. No obstante, las condiciones impuestas en M3B reducen las falsas alarmas en el Océano Pacífico y en zonas áridas, pero en cuanto a la nube de ceniza principal, el número de píxeles de la categoría CENIZA 1 disminuye, restringiendo la detección de ceniza con respecto a M2B y agrega la categoría CENIZA 2 que corresponde a píxeles no contemplados en M2B. Por su parte, M5B muestra un mejor desempeño respecto de los métodos M2B y M3B, al detectar píxeles mixtos (ceniza volcánica y SO_2) e inciertos incluyendo la mayor cantidad de píxeles que corresponden a la nube de ceniza volcánica (CENIZA 1 y CENIZA 2) a partir de realizar una

comparación subjetiva con la imagen RGB de ceniza volcánica. A su vez este método logra incluir la mayor parte de los píxeles identificados como ceniza y SO₂ descartando al mismo tiempo falsas alarmas en el Océano Pacífico y en suelos áridos.

La inclusión del producto CSM permitió una mejora importante en los tres métodos ya que elimina las falsas alarmas sobre las regiones áridas. Además, permite identificar píxeles inciertos donde la presencia de nubes meteorológicas imposibilita la detección de ceniza y SO₂.

Para las dos escenas diurnas del 19 de julio los tres métodos detectan mejor la nube principal de ceniza volcánica que para la escena nocturna del 20 de julio del 2019, aunque también la nube de ceniza presenta un menor espesor óptico y esto puede ser una limitante para la detección. Por otra parte, en la escena nocturna los métodos presentados subestiman la detección de ceniza volcánica en gran parte, debido a que la nube de cenizas es translúcida.

Si bien los resultados son prometedores, el M5B debería utilizarse en combinación con el algoritmo clásico de detección de cenizas (BTD_(C13-C15)) para considerar no solo los píxeles mixtos sino también aquellos que contienen únicamente ceniza volcánica. Asimismo, para reducir las falsas alarmas producidas por los suelos áridos el M5B resulta una buena alternativa. Como trabajo futuro se planea probar el método de clasificación con más escenas con diferente tipo de suelos, tanto diurnas, como nocturnas y para erupciones menos intensas.

REFERENCIAS

- Carn, S. A., J. S. Pallister, L. Lara, J. W. Ewert, S. Watt, A. J. Prata, R. J. Thomas, y G. Villarosa, 2009: The unexpected awakening of chaitén volcano, Chile. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, **90 (24)**, 205–206, doi:<https://doi.org/10.1029/2009EO240001>.
- Casadevall, T. J., 1994a: The 1989–1990 eruption of Redoubt volcano, Alaska: impacts on aircraft operations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **62 (1)**, 301–316, doi:10.1016/0377-0273(94)90038-8.
- Casadevall, T. J., 1994b: Volcanic ash and aviation safety; proceedings of the first international symposium on volcanic ash and aviation safety. *Report USGS Numbered Series*, **(2047)**, doi:10.3133/b2047.
- Casadevall, T. J., P. J. D. Reyes, y D. J. Schneider, 1996: The 1991 Pinatubo eruptions and their effects on aircraft operations. *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*, 625–636, URL https://www.unisdr.org/files/3004_fireandmud.pdf.
- Casadevall, T. J., T. B. Thompson, y T. Fox, 1998: Evaluating geos imagery for volcanic cloud observations at the Soufrière Hills volcano, Montserrat. *EOS Trans AGU*, **(79)**, 505–507.
- Casadevall, T. J., T. B. Thompson, y T. Fox, 1999: Volcanic ash and aviation safety; proceedings of the first international symposium on volcanic ash and aviation safety. *Report USGS Numbered Series*, **(2700)**, doi:10.3133/i2700.
- Constantine, E. K., G. J. S. Bluth, y W. I. Rose, 2000: *Toms and Avhrr Observations of Drifting Volcanic Clouds from the August 1991 Eruptions of Cerro Hudson*, 45–64. American Geophysical Union (AGU), doi:<https://doi.org/10.1029/GM116p0045>, URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/GM116p0045>, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/GM116p0045>.

- Corradini, S., L. Merucci, A. J. Prata, y A. Piscini, 2010: Volcanic ash and so₂ in the 2008 kasatochi eruption: Retrievals comparison from different ir satellite sensors. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **115 (D2)**, doi:<https://doi.org/10.1029/2009JD013634>.
- Corradini, S., y coautores, 2021: Tropospheric volcanic so₂ mass and flux retrievals from satellite. the etna december 2018 eruption. *Remote Sensing*, **13 (11)**, doi:10.3390/rs13112225.
- Elissondo, M., y coautores, 2016: Chronology and impact of the 2011 cordón caulle eruption, chile. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **16 (3)**, 675–704, doi:10.5194/nhess-16-675-2016.
- Ellrod, G. P., B. H. Connell, y D. W. Hillger, 2003: Improved detection of airborne volcanic ash using multispectral infrared satellite data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **108 (D12)**, doi:<https://doi.org/10.1029/2002JD002802>.
- Francis, P. N., M. C. Cooke, y R. W. Saunders, 2012: Retrieval of physical properties of volcanic ash using meteosat: A case study from the 2010 eyjafjallajökull eruption. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **117 (D20)**, doi:10.1029/2011JD016788.
- Guffanti, M., T. J. Casadevall, y K. Budding, 2010: Encounters of aircraft with volcanic ash clouds: A compilation of known incidents, 1953-2009. *Report USGS Numbered Series*, (**545**), doi:10.3133/ds545.
- Guffanti, M., J. W. Ewert, G. M. Gallina, G. J. Bluth, y G. L. Swanson, 2005: Volcanic-ash hazard to aviation during the 2003–2004 eruptive activity of anatahan volcano, commonwealth of the northern mariana islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **146 (1)**, 241–255, doi:10.1016/j.jvolgeores.2004.12.011.
- Guéhenneux, Y., M. Gouhier, y P. Labazuy, 2015: Improved space borne detection of volcanic ash for real-time monitoring using 3-band method. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **293**, 25–45, doi:10.1016/j.jvolgeores.2015.01.005.
- Heidinger, A. K., M. J. Pavolonis, C. Calvert, J. Hoffman, S. Nebuda, W. Straka, A. Walther, y S. Wanzong, 2020: Chapter 6 - abi cloud products from the goes-r series. *The GOES-R Series*, S. J. Goodman, T. J. Schmit, J. Daniels, y R. J. Redmon, Eds., Elsevier, 43–62, doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814327-8.00006-8>.
- Holasek, R. E., S. Self, y A. W. Woods, 1996: Satellite observations and interpretation of the 1991 mount pinatubo eruption plumes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **101 (B12)**, 27 635–27 655, doi:<https://doi.org/10.1029/96JB01179>.
- Ishii, K., M. Hayashi, H. Ishimoto, y T. Shimbori, 2023: Prediction of volcanic ash concentrations in ash clouds from explosive eruptions based on an atmospheric transport model and the japanese meteorological satellite himawari-8: a case study for the kirishima-shinmoedake eruption on april 4th 2018. *Earth, Planets and Space*, **75 (37)**, doi:10.1186/s40623-023-01790-y.
- Labazuy, P., y coautores, 2012: Near real-time monitoring of the april-may 2010 eyjafjallajökull ash cloud: an example of a web-based, satellite data-driven, reporting system. *International Journal of Environment and Pollution*, **48 (1-4)**, 262–272, doi:10.1504/IJEP.2012.049673ff.
- Marchese, F., y coautores, 2021: Mt. etna paroxysms of february–april 2021 monitored and quantified through a multi-platform satellite observing system. *Remote Sensing*, **13 (16)**, doi:10.3390/rs13163074.
- Miller, T. P., y T. J. Casadevall, 2000: Volcanic ash hazards to aviation. *Encyclopedia of Volcanoes*, 915–930.

- Osores, S., G. Toyos, G. Pujol, J. Ruiz, E. Collini, y A. Folch, 2015: Mass loadings of the 2011 cordón caulle volcanic ash clouds. a quantitative comparison between modis and numerical simulations. *IUGG-IAVCEI General Assembly*.
- Pavlonis, M. J., 2010: Advances in extracting cloud composition information from spaceborne infrared radiances—a robust alternative to brightness temperatures. part i: Theory. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **49 (9)**, 1992–2012, doi:10.1175/2010JAMC2433.1.
- Pavlonis, M. J., W. F. Feltz, A. K. Heidinger, y G. M. Gallina, 2006: A daytime complement to the reverse absorption technique for improved automated detection of volcanic ash. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **23 (11)**, 1422–1444, doi:10.1175/JTECH1926.1.
- Pavlonis, M. J., A. K. Heidinger, y J. Sieglaff, 2013: Automated retrievals of volcanic ash and dust cloud properties from upwelling infrared measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **118 (3)**, 1436–1458, doi:https://doi.org/10.1002/jgrd.50173.
- Pavlonis, M. J., y J. Sieglaff, 2010: Goes-r advanced baseline imager (abi) algorithm theoretical basis document for volcanic ash (detection and height). version 2.0. *UW SSEC Publication*, **(10.09.P1)**, URL <https://www.star.nesdis.noaa.gov/goesr/docs/ATBD/VolAsh.pdf>.
- Pavlonis, M. J., J. M. Sieglaff, y J. L. Cintineo, 2020: Chapter 10 - remote sensing of volcanic ash with the goes-r series. *The GOES-R Series*, S. J. Goodman, T. J. Schmit, J. Daniels, y R. J. Redmon, Eds., Elsevier, 103–124, doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814327-8.00010-X, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012814327800010X>.
- Prata, A. J., 1989a: Infrared radiative transfer calculations for volcanic ash clouds. *Geophysical Research Letters*, **16 (11)**, 1293–1296, doi:10.1029/GL016i011p01293.
- Prata, A. J., 1989b: Observations of volcanic ash clouds in the 10-12 m window using avhrr/2 data. *International Journal of Remote Sensing*, **10 (4-5)**, 751–761, doi:10.1080/01431168908903916.
- Prata, A. J., 2009: Satellite detection of hazardous volcanic clouds and the risk to global air traffic. *Natural Hazards*, **51**, 303–324, doi:10.1007/s11069-008-9273-z.
- Prata, A. J., y I. F. Grant, 2001: Retrieval of microphysical and morphological properties of volcanic ash plumes from satellite data: Application to mt ruapehu, new zealand. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **127 (576)**, 2153–2179, doi:10.1002/qj.49712757615.
- Prata, A. J., y J. Kerkmann, 2007: Simultaneous retrieval of volcanic ash and so2 using msg-seviri measurements. *Geophysical Research Letters*, **34 (5)**, doi:10.1029/2006GL028691.
- Prata, A. J., y A. Tupper, 2009: Aviation hazards from volcanoes: the state of the science. *Natural Hazards*, **51**, 239–244, doi:10.1007/s11069-009-9415-y.
- Rodriguez, D., L. Vidal, y S. Osores, 2021: Algoritmo de identificación de nubes de ceniza volcánica en imágenes satelitales - parte 1: sensor viirs. *Nota Técnica SMN 2021-116*.
- Rose, W., D. Delene, D. Schneider, y et al, 1995: Ice in the 1994 rabaul eruption cloud: implications for volcano hazard and atmospheric effects. *Nature*, **375**, 477–479, doi:10.1038/375477a0.
- Rose, W. I., y G. C. Mayberry, 2000: Use of goes thermal infrared imagery for eruption scale measurements, soufrière hills, montserrat. *Geophysical Research Letters*, **27 (19)**, 3097–3100, doi:10.1029/1999GL008459.

- Schmit, T. J., M. M. Gunshor, W. P. Menzel, J. J. Gurka, J. Li, y A. S. Bachmeier, 2005: Introducing the next-generation advanced baseline imager on goes-r. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **86 (8)**, 1079–1096, doi: <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-8-1079>.
- Schneider, D. J., W. I. Rose, L. R. Coke, G. J. S. Bluth, I. E. Sprod, y A. J. Krueger, 1999: Early evolution of a stratospheric volcanic eruption cloud as observed with toms and avhrr. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **104 (D4)**, 4037–4050, doi:<https://doi.org/10.1029/1998JD200073>.
- Schneider, D. J., W. I. Rose, y L. Kelley, 1995: Tracking of 1992 eruption clouds from crater peak vent of mount spurr volcano, alaska, using avhrr. *U.S. Geological Survey Bulletin*, **2139**, 27–36, URL <https://digitalcommons.mtu.edu/geo-fp/94/>.
- Watson, I., V. Realmuto, W. Rose, A. Prata, G. Bluth, Y. Gu, C. Bader, y T. Yu, 2004: Thermal infrared remote sensing of volcanic emissions using the moderate resolution imaging spectroradiometer. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **135 (1)**, 75–89, doi:10.1016/j.jvolgeores.2003.12.017.

Instrucciones para publicar Notas Técnicas

En el SMN existieron y existen una importante cantidad de publicaciones periódicas dedicadas a informar a usuarios distintos aspectos de las actividades del servicio, en general asociados con observaciones o pronósticos meteorológicos.

Existe no obstante abundante material escrito de carácter técnico que no tiene un vehículo de comunicación adecuado ya que no se acomoda a las publicaciones arriba mencionadas ni es apropiado para revistas científicas. Este material, sin embargo, es fundamental para plasmar las actividades y desarrollos de la institución y que esta dé cuenta de su producción técnica. Es importante que las actividades de la institución puedan ser comprendidas con solo acercarse a sus diferentes publicaciones y la longitud de los documentos no debe ser un limitante.

Los interesados en transformar sus trabajos en Notas Técnicas pueden comunicarse con Ramón de Elía (rde-lia@smn.gob.ar), Luciano Vidal (lvidal@smn.gob.ar) o Martín Rugna (mrugna@smn.gob.ar) de la Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios, para obtener la plantilla WORD o los archivos Tex que sirven de modelo para la escritura de la Nota Técnica. Una vez armado el documento deben enviarlo en formato PDF a los correos antes mencionados. Antes del envío final los autores deben informarse del número de serie que le corresponde a su trabajo e incluirlo en la portada.

La versión digital de la Nota Técnica quedará publicada en el Repositorio Digital del Servicio Meteorológico Nacional. Cualquier consulta o duda al respecto, comunicarse con Melisa Acevedo (macevedo@smn.gob.ar).