



MONOGRAFÍA: DETECCIÓN DE DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂) VOLCÁNICO CON SENSORES REMOTOS SATELITALES, CASO DE ESTUDIO VOLCÁN NEVADO DEL RUÍZ - COLOMBIA

Claudia Ximena Angola Zapata

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Civil
Popayán, Colombia
2024

MONOGRAFÍA: DETECCIÓN DE DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂) VOLCÁNICO CON SENSORES REMOTOS SATELITALES, CASO DE ESTUDIO VOLCÁN NEVADO DEL RUÍZ - COLOMBIA

Claudia Ximena Angola Zapata

Trabajo de grado modalidad profundización presentado como requisito para optar al título de
Magister en Geomática

Directora:

Doctora Yady Tatiana Solano Correa

Línea de Investigación:

Sensores remotos satelitales y contaminantes atmosféricos

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Civil
Popayán, Colombia
2024

DETECCIÓN DE DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂) VOLCÁNICO

**FIRMA DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO Y FIRMA DE LOS
JURADOS**

Directora del trabajo de grado:

Tatiana Solano

Firma digital

PhD. Yady Tatiana Solano Correa

Ingeniera Física (Universidad del Cauca)

Doctora en Informática y Telecomunicaciones. Universidad de Trento (Italia)
Docente tiempo completo en la Universidad Tecnológica de Bolívar (Cartagena)

Jurado Interno.

Ing. MSc. **Lady Susana Montenegro Arboleda**

Ingeniera Ambiental (Universidad del Cauca)

Especialista en Ingeniería Ambiental y Sanitaria (Universidad del Valle)

Especialista en SIG (Universidad de Manizales)

Magister en Geomática (Universidad del Cauca)

Jurado externo.

Ing. MSc. **Jorge Armando Alpala Agullar**

Ingeniero Civil (Universidad del Cauca)

Especialista en SIG (Universidad de Manizales)

Magister en Geomática (Universidad del Cauca)

Asesor Técnico en la Agencia Nacional de Tierras

Resumen

En este proyecto, se llevó a cabo una descripción de las características de los sensores remotos satelitales capaces de detectar SO₂ volcánico, centrándonos en los sensores remotos que cubren la zona de Colombia, con el propósito de determinar los mejores sensores satelitales y posteriormente aplicarlos en un caso de estudio específico. Como resultado de estudio, se pudo concluir que el Instrumento de Monitoreo de la Tropósfera (TROPOMI, por sus siglas en inglés), caracterizado por ofrecer cobertura diaria global y una alta resolución espacial, destaca como el sensor más idóneo. La aplicación de este sensor se presenta en un caso de estudio donde se compara los datos recopilados por TROPOMI, con aquellos obtenidos in-situ a través de las estaciones ScanDOAS pertenecientes a la red de monitoreo geoquímico del Volcán Nevado del Ruiz (VNR). En este ejercicio, se consideró el año 2020 como periodo de estudio, utilizando los datos de concentración de dióxido de azufre SO₂ del sensor que coincide con la misma fecha de los datos disponibles de las estaciones ScanDOAS. Se realizaron mapas con los datos del sensor para visualizar las áreas con mayor concentración, junto con gráficos que representan la distribución de las concentraciones obtenidas de las estaciones en comparación con los datos del sensor. Además, gracias a los datos recopilados por TROPOMI, se logró una descripción de la variabilidad espacio-temporal del dióxido de azufre (SO₂) volcánico. En cuanto a los resultados, se destaca que los datos medidos en la troposfera mediante TROPOMI muestran dinámicas diferentes en comparación con los datos medidos en tierra por las estaciones ScanDOAS.

Palabras clave: emisiones, dióxido de azufre, volcanes, sensores, satélites

Abstract

In this project, a description of the characteristics of satellite remote sensors capable of detecting volcanic SO₂ was carried out, focusing on remote sensors covering the Colombia region. The purpose was to determine the best satellite sensors and subsequently apply them in a specific case study. As a result of the study, it was concluded that the Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI), characterized by providing daily global coverage and high spatial resolution, stands out as the most suitable sensor. The application of this sensor is presented in a case study where the data collected by TROPOMI is compared with those obtained in-situ through the ScanDOAS stations belonging to the geochemical monitoring network of the Nevado del Ruiz Volcano (VNR). In this exercise, the year 2020 was considered as the study period, using sulfur dioxide (SO₂) concentration data from the sensor that coincides with the same date as the available data from ScanDOAS stations. Maps were created using sensor data to visualize areas with higher concentration, along with graphs representing the distribution of concentrations obtained from the stations compared to the sensor data. Furthermore, thanks to the data collected by TROPOMI, a description of the space-time variability of volcanic sulfur dioxide (SO₂) was achieved. Regarding the results, it is highlighted that the data measured in the troposphere by TROPOMI exhibit different dynamics compared to the data measured on land by the ScanDOAS stations.

Keywords: emissions, sulfur dioxide, volcanoes, sensors, satellites

Contenido

Resumen.....	4
Abstract.....	5
1 Introducción	11
2 Descripción del Problema	12
3 Justificación	14
4 Objetivos.....	15
4.1 Objetivo General.....	15
4.2 Objetivos Específicos.....	15
5 Marco Teórico.....	16
5.1 Emisiones Volcánicas	16
5.2 Fundamentos Técnicos de las Observaciones Satelitales	17
5.2.1 <i>Sensores Remotos Pasivos</i>	18
5.2.2 <i>Sensores Remotos Activos</i>	18
5.2.3 <i>Resoluciones de los Sensores</i>	19
5.2.4 <i>Espectro Electromagnético</i>	19
5.2.4.1 Espectro de Absorción del SO ₂	20
5.3 Sensores Remotos Satelitales para la Detección de Gases y Aerosoles	21
5.3.1 <i>Instrumento de Monitoreo de la Tropósfera -TROPOMI</i>	25
5.3.2 <i>Generador de Imágenes de Línea de Base Avanzada – ABI</i>	27
5.3.3 <i>Conjunto de Radiómetros de Imágenes Infrarrojas Visibles -VIIRS</i>	28
5.3.4 <i>Conjunto de Mapeo y Perfilado de Ozono – OMPS</i>	30
5.3.5 <i>Experimento de Monitoreo Global de Ozono-2 (GOME-2)</i>	31

5.3.6	<i>Interferómetro de Sondeo Atmosférico Infrarrojo - IASI</i>	32
5.3.7	<i>Lidar de Aerosoles y Nubes con Polarización Ortogonal - CALIOP</i>	33
5.3.8	<i>Instrumento de Monitoreo de Ozono - OMI</i>	34
5.3.9	<i>Sonda Infrarroja Atmosférica – AIRS</i>	35
5.3.10	<i>Generador Giratorio Mejorado de Imagen Visible e Infrarroja - SEVIRI</i>	36
5.3.11	<i>Radiómetro Avanzado de muy Alta Resolución - AVHRR/3</i>	37
5.3.12	<i>Espectroradiómetro de Imágenes de Media Resolución– MODIS</i>	39
5.3.13	<i>Radiómetro Avanzado de Emisión Térmica y Reflexión Espacial - ASTER</i>	40
5.4	Sensores Remotos Satelitales Especializados en la Detección del SO ₂	41
5.5	Estaciones de monitoreo del SO ₂ en volcanes en Colombia.....	46
5.6	Plataformas de monitoreo del dióxido de azufre	47
5.7	Casos de Estudio Sobre Detección de Emisiones de SO ₂ Volcánico	48
5.8	Tendencias en el Monitoreo de Gases Trazas.....	50
6	Área de Estudio.....	52
6.1.1	Volcán Nevado del Ruiz (VNR)	52
6.2	Eventos Importantes del Área de Estudio.....	52
6.3	Red Monitoreo Geoquímica.....	53
6.4	Comportamiento de las Precipitaciones en Colombia	55
7	Metodología	56
7.1	Revisión Bibliográfica	58
7.2	Identificación y Priorización del Periodo de Estudio	58
7.3	Selección de los Datos	59
7.3.1	<i>Datos de los Sensores Remotos Satelitales TROPOMI</i>	59
7.3.2	<i>Datos de las Estaciones ScanDOAS del Volcán Nevado del Ruiz</i>	59
7.4	Procesamiento de los Datos	59

7.5	Comparación de los Resultados	62
8	Resultados y Discusión de Resultados.....	63
8.1	Datos del TROPOMI	63
8.2	Datos de las Estaciones ScanDOAS del VNR.....	67
8.3	Comparación de Resultados.....	67
8.3.1	Resultados de la Estación ScanDOAS Alfombrales	67
8.3.2	Resultados de la Estación ScanDOAS Olleta	70
8.3.3	Resultados de la Estación ScanDOAS Recio 3	72
9	Conclusiones y Recomendaciones	76
9.1	Conclusiones.....	76
9.2	Epílogo.....	77
9.3	Recomendaciones	78
10	Referencias Bibliográficas	79
11	Anexos	86

Lista de Figuras

Figura 1. Interacciones químicas en una erupción volcánica.	16
Figura 2. Principio de medición de un sensor remoto satelital. Ejemplo de sensor TROPOMI.	18
Figura 3. Espectro electromagnético.....	20
Figura 4. Espectro de absorción del SO ₂ . La absorción de la radiación por la molécula de SO ₂ en <i>cm</i> ² /moléculas versus las longitudes de onda de la radiación en nm.....	20
Figura 5. Ventana espectral de TROPOMI comparada con GOME, SCIAMACHY y OMI. .	26
Figura 6. Localización del área de estudio y las estaciones telemétricas ScanDOAS del VNR	54
Figura 7. Comportamiento de las precipitaciones para los años 2012 al 2021.....	55
Figura 8. Metodología general.....	57
Figura 9. Mapa de Concentración de SO ₂ del 3 al 7 de enero de 2020.	64
Figura 10. Mapa de Concentración de SO ₂ de enero de 2020.	65
Figura 11. Distribución espacio temporal de SO ₂ sobre el Volcán Nevado del Ruiz.....	66
Figura 12. Distribución de la concentración SO ₂ datos de la estación Alfombrales con respecto a los datos TROPOMI.....	69
Figura 13. Gráfico de dispersión de concentraciones SO ₂ datos de la estación Alfombrales con respecto a los datos TROPOMI.	69
Figura 14. Distribución de la concentración SO ₂ datos de la estación Olleta con respecto a los datos TROPOMI.	71
Figura 15. Gráfico de dispersión de concentraciones SO ₂ datos de la estación Olleta con respecto a los datos TROPOMI.	72
Figura 16. Distribución de la concentración SO ₂ datos de la estación Recio 3 con respecto a los datos TROPOMI.....	73
Figura 17. Gráfico de dispersión de concentraciones SO ₂ datos de la estación Recio 3 con respecto a los datos TROPOMI	74

Lista de Tablas

Tabla 1. Sensores y satélites que proporcionan información de gases y aerosoles.	22
Tabla 2. Características de rendimiento de las bandas espectrales de TROPOMI.	25
Tabla 3. Cobertura espectral de las bandas del sensor ABI.	27
Tabla 4. Cobertura espectral de las bandas del sensor VIIRS.	28
Tabla 5. Parámetros de rendimiento de los espectrómetros OMPS.	30
Tabla 6. Parámetros del sensor GOME-2.	31
Tabla 7. Parámetros del sensor IASI.	32
Tabla 8. Definiciones de canales del instrumento CALIOP.	33
Tabla 9. Cobertura espectral de las bandas del sensor OMI.	34
Tabla 10. Definiciones de canales del instrumento SEVIRI.	36
Tabla 11. Cobertura espectral de los canales del sensor AVHRR/3.	38
Tabla 12. Cobertura espectral de las bandas del sensor MODIS.	39
Tabla 13. Cobertura espectral de las bandas del sensor ASTER.	40
Tabla 14. Sensores remotos satelitales y sus características para la detección de SO ₂	44
Tabla 15. Coordenadas del Área de estudio del VNR.	52
Tabla 16. Eventos importantes de la actividad del VNR.	53
Tabla 17. Coordenadas de las estaciones telemétricas ScanDOAS del VNR.	53
Tabla 18. Número total de datos de TROPOMI obtenidos por mes.	63
Tabla 19. Número total de datos de las estaciones ScanDOAS por mes.	67
Tabla 20. Datos de concentraciones de SO ₂ de TROPOMI y datos estación Alfombrales.	67
Tabla 21. Datos de concentraciones de SO ₂ de TROPOMI y datos estación Olleta.	70
Tabla 22. Datos de concentraciones de SO ₂ de TROPOMI y datos estación Recio 3.	72

1 Introducción

En las emisiones volcánicas, el dióxido de azufre (SO₂) es el tercer gas más abundante, y uno de los gases de efecto invernadero monitoreado constantemente por sensores remotos dado su potencial influencia en el clima. A escala global, el SO₂ es peligroso para los humanos en su forma gaseosa y también porque se oxida formando aerosoles de sulfatos que producen la lluvia ácida y la degradación ambiental, junto con la reducción de la visibilidad por las cenizas volcánicas generando problemas para la aviación y los efectos sobre la salud.

El objetivo del presente trabajo fue investigar sobre diferentes sensores remotos satelitales empleados para el monitoreo de emisiones de SO₂ volcánicos. Para cumplir con dicho objetivo se realizó una revisión bibliográfica y análisis de productos satelitales que relacionen datos de gases volcánicos para determinar la concentración de SO₂ que los volcanes liberan a la atmósfera. Este estudio buscó detallar los resultados de las investigaciones de emisiones de SO₂ volcánico y obtener las potencialidades de los diferentes sensores remotos satelitales en proveer información sobre dispersión, transporte y transformación de gases volcánicos y finalmente realizar detección de SO₂ para el Volcán Nevado del Ruiz en Colombia con los sensores remotos satelitales con mejores características e identificados como los más aptos para la zona de estudio y comparar sus resultados. Durante este ejercicio se concluyó un solo sensor remoto satelital como el más óptimo y para comparar los resultados del sensor aplicado se procedió a comparar sus resultados con los datos in-situ de las estaciones de la red de monitoreo geoquímica.

2 Descripción del Problema

En la actualidad, existen diferentes fuentes de emisiones de SO₂, la mayor fuente de emisión es antropogénico originada durante la quema de combustibles fósiles como carbón en las centrales eléctricas y otras instalaciones industriales como refinerías de petróleo y gas (*Sulfur Dioxide Basics / US EPA*, s. f.). Por otro lado, el 30% de SO₂ que ingresa a la atmósfera terrestre es a través de procesos naturales (Sulphur Dioxide | TROPOMI, 2022), considerando los volcanes una de las mayores fuentes naturales de SO₂ a nivel mundial, emitiendo a la atmósfera 23 ± 2 millones de toneladas métricas anualmente (Jiménez-Escalona et al., 2018).

El SO₂ volcánico ingresa a la atmósfera durante erupciones volcánicas y la desgasificación de cuerpos de magma que no erupcionan; pero la mayor parte de las emisiones de SO₂ volcánico y los aerosoles permanecen en la troposfera como su principal sumidero (Loyola et al., 2008). Además, la inyección de SO₂ en la troposfera superior y la estratosfera inferior puede provocar cambios significativos en el clima global (Robock, 2000). El SO₂ es un precursor de los aerosoles de sulfato (Theys et al., 2019) un importante contribuyente natural a los cambios climáticos relevantes. Las observaciones satelitales y los modelos han demostrado que los volcanes que se desgasifican continuamente tienen un efecto potencialmente grande en la carga de aerosol de fondo natural y el estado de radiación de la atmósfera (Schmidt et al., 2012).

Los aerosoles atmosféricos o troposféricos son las partículas y las pequeñas gotitas líquidas suspendidas en el aire (Préndez B. et al., 1991). La importancia del papel que juegan los aerosoles atmosféricos se refiere en esencia a que: (1) dispersan y absorben tanto la radiación solar como la terrestre y por tanto afectan el balance calorífico de la tierra; (2) actúan como núcleos de condensación del vapor de agua y por lo tanto juegan un papel importante en la formación de nubes, (3) pueden actuar como núcleos de congelación de influir sobre las precipitaciones de nieve y granizo (Préndez B. et al., 1991).

Las partículas secundarias provenientes de la transformación de SO₂ a sulfato y a ácido sulfúrico y asociadas a las menores de 0.41 μm destacan como irritantes químicos y son fundamentales en la disminución de la visibilidad y el deterioro ambiental (Préndez B. et al., 1991). Además, el SO₂ es un importante precursor de PM_{2.5} (material particulado de tamaño de hasta 2,5 micrómetros), que es un importante problema de salud y uno de los principales contribuyentes a la mala visibilidad. Estos datos son utilizados por los Centros de Avisos de

Cenizas Volcánicas para asesorar a las aerolíneas en la toma de decisiones operativas (*Air Quality / Earthdata*, s. f.).

Los estudios existentes sobre la composición de las columnas volcánicas generalmente interpretan la presencia de aerosoles de sulfato como el resultado de una oxidación del SO₂ gaseoso. En la actualidad existen sensores a bordo de constelaciones satelitales diseñados específicamente para el monitoreo de la atmósfera que pueden detectar los gases y aerosoles liberados, mediante el uso de imágenes obtenidas desde el espacio. Estos sensores resultan útiles para el monitoreo de nubes volcánicas y la recopilación de los datos puede ser desde sensores satelitales en órbita terrestre baja como Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (AVHRR, por sus siglas en inglés) a bordo de NOAA y MetOp, TROPOMI en Sentinel 5P y sensores satelitales de órbita geoestacionaria como Generador giratorio mejorado de imágenes visible e infrarrojo (SEVIRI, por sus siglas en inglés) en Meteosat Segunda Generación (MSG) y Generador de imágenes de línea de base avanzada (ABI, por sus siglas en inglés) en GOES-16 (R).

Basado en lo anterior, surge la pregunta: ¿Cuáles son las características clave de los sensores satelitales utilizados en la detección de emisiones de SO₂ volcánico y cuáles son las tendencias emergentes en el desarrollo de sensores que podrían mejorar la eficacia de esta detección en el futuro?.

3 Justificación

Los volcanes durante las erupciones liberan grandes cantidades de gases de efecto invernadero y otros aerosoles, formando nubes masivas que se acumulan en la atmósfera (George, 2014). Las columnas con cantidades de SO₂ van desde nubes de erupción frescas hasta nubes pasivas de penachos de desgasificación y penachos de fundición, e incluso nubes concentradas de contaminación del aire (Oppenheimer et al., 2014). Además, los gases se liberan por el movimiento del magma a través de grietas, cráteres, fumarolas, suelos porosos y por el agua que alimenta lagos volcánicos y manantiales termales (Scott & Lindsey, 2016).

Los procesos donde el magma o rocas fundidas del interior de la tierra y sus gases asociados ascienden hacia la superficie de la tierra y la atmósfera se define como vulcanismo (Sieron, s. f.), el impacto atmosférico de este involucra el estudio de las emisiones de gases volcánicos durante las erupciones esporádicas, las emisiones persistentes y la desgasificación pasiva. Las columnas de estos tipos de actividades presentan entornos diferentes: (i) columnas ricas en cenizas (erupciones y/o emisiones persistentes) que se elevan hasta la alta atmósfera y (ii) columnas casi transparentes pobres en cenizas y ricas en agua (H₂O) y otros gases volcánicos (emisiones pasivas) (Schiavo et al., 2021).

Los instrumentos de sensado remoto se utilizan para identificar, rastrear y en algunos casos cuantificar los componentes atmosféricos desde plataformas espaciales y es útil para detectar nubes peligrosas de ceniza y gases, principalmente SO₂, emitidas por volcanes (Prata, 2009). Desde 1978, los instrumentos satelitales han proporcionado mediciones de las emisiones volcánicas globales de SO₂ (Carn et al., 2016). Dadas las complejidades al momento de realizar las mediciones de concentraciones de SO₂, porque usualmente son muy difíciles de medir, requiriendo de instrumentación muy especializada y costosa. En este contexto, el uso de mediciones confiables provenientes de otros instrumentos, como los de sensado remoto, se vuelve de gran importancia. No obstante, en el contexto Colombiano, pocos trabajos pueden ser encontrados en literatura en donde se detallen las diversas características de estos sensores y se evalúen sus capacidades en las mediciones de SO₂.

4 Objetivos

4.1 Objetivo General

Evaluar el potencial de sensores remotos a bordo de plataformas satelitales para la detección de gases de SO₂ emitidos por volcanes para interpretación de cambios en la composición atmosférica.

4.2 Objetivos Específicos

- **Objetivo No.1.** Caracterizar los sensores existentes y su pertinencia para la detección de emisiones de SO₂ volcánico en el caso de Colombia.
- **Objetivo No.2.** Detectar concentraciones de SO₂ al caso de estudio: Volcán Nevado del Ruiz.
- **Objetivo No.3.** Comparar y evaluar los resultados de sensores satelitales aplicados al caso de estudio: Volcán Nevado del Ruiz.

5 Marco Teórico

5.1 Emisiones Volcánicas

En la Figura 1 se reflejan las interacciones químicas durante la erupción volcánica explosiva cuando inyectan vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), dióxido de azufre (SO₂), cloruro de hidrógeno (HCl), fluoruro de hidrógeno (HF) y cenizas (roca pulverizada y piedra pómez) en la atmósfera a alturas de 10 a 20 millas sobre la superficie de la Tierra. Los aerosoles de sulfato también promueven reacciones químicas complejas en sus superficies que alteran las especies químicas de cloro y nitrógeno en la estratósfera. Este efecto, junto con el aumento de los niveles de cloro estratosférico debido a la contaminación por clorofluorocarbonos, genera monóxido de cloro (ClO), que destruye el ozono (O₃). A medida que los aerosoles crecen y se coagulan, se asientan en la tropósfera superior donde sirven como núcleos para las nubes cirros y modifican aún más el balance de radiación de la Tierra. La mayor parte del HCl y el HF se disuelven en las gotas de agua en la nube de erupción y caen rápidamente al suelo en forma de lluvia ácida. La ceniza inyectada también cae rápidamente desde la estratosfera; la mayor parte se elimina en varios días a unas pocas semanas (McGee et al., 1997).

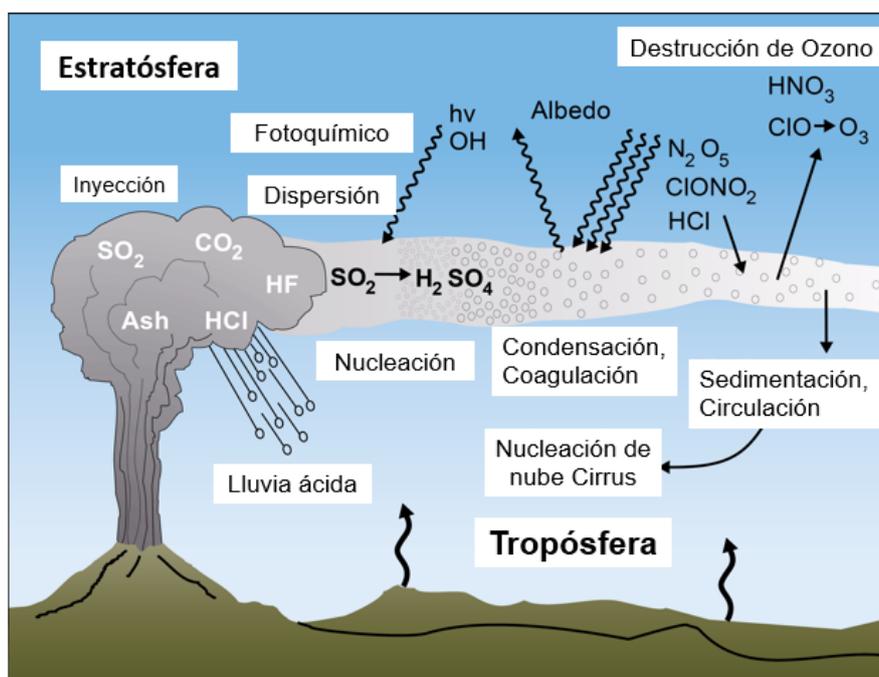


Figura 1. Interacciones químicas en una erupción volcánica. (Adaptado de Impacts of Volcanic Gases on Climate, the Environment, and People (p. 6), por K. McGee, M. Doukas, R. Kessler et al., 1997, U.S. Geological Survey).

5.2 Fundamentos Técnicos de las Observaciones Satelitales

Los satélites son plataformas espaciales que llevan uno o más instrumentos de sensado remoto que proporcionan observaciones de la tierra y la atmósfera. Esta forma de observación se le denomina sensado remoto, teledetección o percepción remota, porque consiste en recopilar información sobre un objeto sin estar en contacto físico directo con él (Prados et al., 2020). Los sensores remotos pueden hacer observaciones desde diferentes orbitas alrededor de la Tierra, la más común es la órbita terrestre baja denominada polar (aproximadamente de 160 a 2000 km sobre la tierra) y la órbita geoestacionaria (por encima de los 35.500 km sobre la Tierra). Los satélites que orbitan a 35.786 km se encuentran a una altitud en la que su velocidad orbital coincide con la rotación del planeta, por lo que se denomina Órbita Geosincrónica (OSG). Además, un satélite OSG directamente sobre el ecuador tendrá una Órbita Geoestacionaria por lo que son satélites regionales, lo cual permite que el satélite mantenga su posición directamente sobre el mismo lugar en la superficie de la Tierra (Gupta & Follette-cook, 2018), pero también pueden obtener una cobertura global con dos y/o más satélites geoestacionarios (Gupta et al., 2022).

El sensado remoto es la medición de la energía que es emitida por un objeto hacia el sensor. Si la fuente de energía radiante surge de fuentes naturales como el Sol, la Tierra, otros cuerpos calientes es llamado sensado remoto pasivo, pero, si la energía medida es proporcionada de forma artificial desde el sensor es definido sensado activo (Podest, 2018). El principio básico del funcionamiento de los sensores remotos es la percepción del reflejo de los objetos sometidos a diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, teniendo en cuenta que el porcentaje de reflectancia, varía en función de las características físicas del objeto (Zapata Arbeláez & Anaya Acevedo, 2013). Durante el sensado remoto la intensidad de la radiación reflejada y emitida al espacio es influida por las condiciones en la superficie terrestre y atmósfera. Los satélites miden esta radiación reflejada y emitida, por lo que contienen información acerca de las condiciones en la superficie y la atmósfera. Por ende, se puede conocer los espectros de absorción distintos de cada gas (Prados et al., 2020).

En la Figura 2 se muestra la medición de TROPOMI como ejemplo del principio de medición de un sensor remoto satelital.

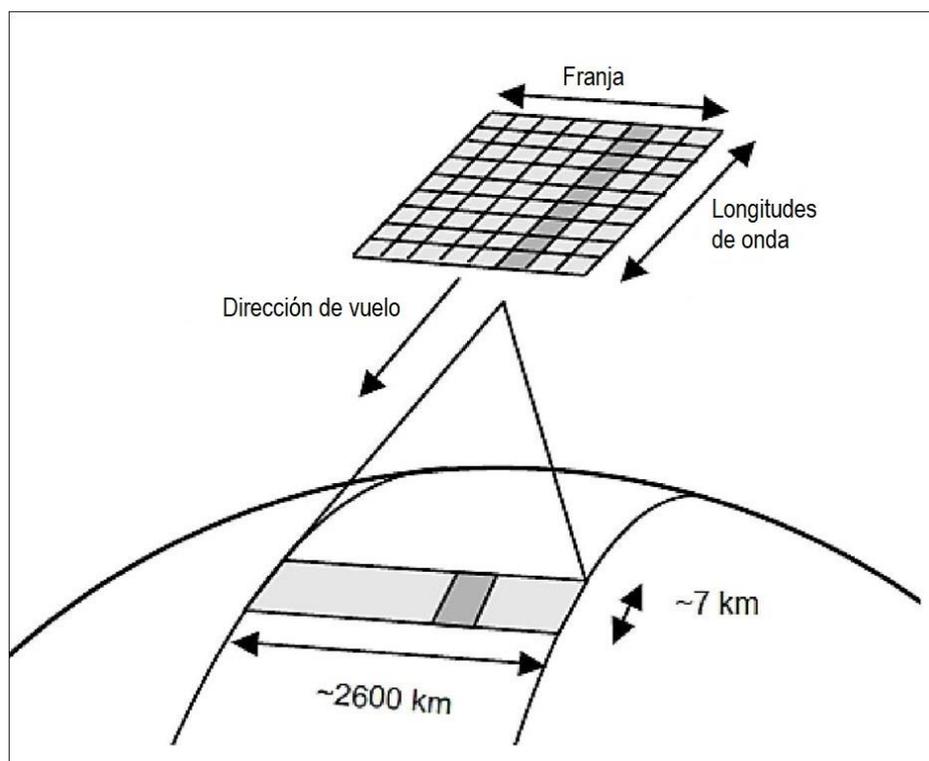


Figura 2. Principio de medición de un sensor remoto satelital. Ejemplo de sensor TROPOMI. (Adaptado de (Copernicus: Sentinel-5P, s. f.). (2023, mayo 27). Recuperado de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/copernicus-sentinel-5p#TROPOMI-tropospheric-monitoring-instrument>).

5.2.1 Sensores Remotos Pasivos

Los sensores pasivos detectan la energía emitida o reflejada por un objeto e incluyen diferentes tipos de radiómetros y espectrómetros. La mayoría de los sistemas pasivos utilizados en aplicaciones de teledetección operan en las porciones del espectro electromagnético que abarcan el visible, el infrarrojo, el infrarrojo térmico y la banda de microondas (*Passive Sensors / Earthdata*, s. f.).

5.2.2 Sensores Remotos Activos

Los sensores activos proporcionan su propia fuente de energía para la iluminación. La mayoría de los sensores activos opera en la región de las microondas en el espectro electromagnético, lo que permite penetrar la atmósfera bajo la mayoría de las condiciones y se pueden usar de día o de noche. Tienen una variedad de aplicaciones relacionadas con la meteorología y la observación de la superficie y atmósfera de la Tierra (NASA Applied Remote Sensing Training Program [NASA ARSET], s. f.).

5.2.3 *Resoluciones de los Sensores*

Se refiere a la capacidad del sensor para distinguir y capturar detalles en una imagen o medir con precisión una característica específica. Se pueden distinguir 4 tipos principales de resoluciones:

Resolución Espectral. Significa el número y el ancho de las bandas espectrales del sensor. Cuanto más alta sea la resolución espectral, más angosta será la gama de longitudes de onda para un determinado canal o banda. Un mayor número de canales espectrales más finos permite la teledetección de diferentes partes de la superficie Terrestre. Por lo general, las imágenes multiespectrales se refieren a 3 hasta 10 bandas, mientras que las imágenes hiperespectrales consisten en centenares o millares de bandas (más angostas, es decir, una resolución espectral más alta). La pancromática es una sola banda ancha que recolecta una amplia gama de longitudes de onda.

Resolución Espacial. Significa la superficie que forma un píxel en la imagen. Normalmente se presenta como un valor único representando la longitud de un lado de un cuadrado. Por lo general, cuanto más alta es la resolución espacial, menor es el área cubierta por una sola imagen.

Resolución Temporal. El tiempo que tarda un satélite para completar un ciclo de órbita también llamado “tiempo de revisita”, depende de las capacidades del satélite/sensor, solapa del barrido y latitud. Algunos satélites tienen una mayor resolución temporal porque pueden maniobrar sus sensores y tienen una mayor solapa a latitudes mayores.

Resolución Radiométrica. Describe la capacidad de un sensor para discriminar diferencias en energía (o radiancia). Una mejor resolución radiométrica significa que el sensor es más sensitivo a pequeñas diferencias en energía, cuando mayor sea este número, más alta será la resolución radiométrica y más nítida la imagen (NASA Applied Remote Sensing Training Program [NASA ARSET], s. f.).

5.2.4 *Espectro Electromagnético*

El espectro electromagnético es el conjunto de todas las frecuencias (número de ciclos de la onda por unidad de tiempo) posibles a las que se produce radiación electromagnética. Al flujo saliente de energía de una fuente en forma de ondas electromagnéticas se le denomina radiación electromagnética. Esta radiación puede ser de origen natural o artificial. El espectro electromagnético se divide convencionalmente en segmentos o bandas de frecuencia, porque

no todas las ondas electromagnéticas tienen el mismo comportamiento en el medio de propagación, la misma procedencia o la misma forma de interacción con la materia (Luque, 2012). En la Figura 3 se muestra el espectro electromagnético.

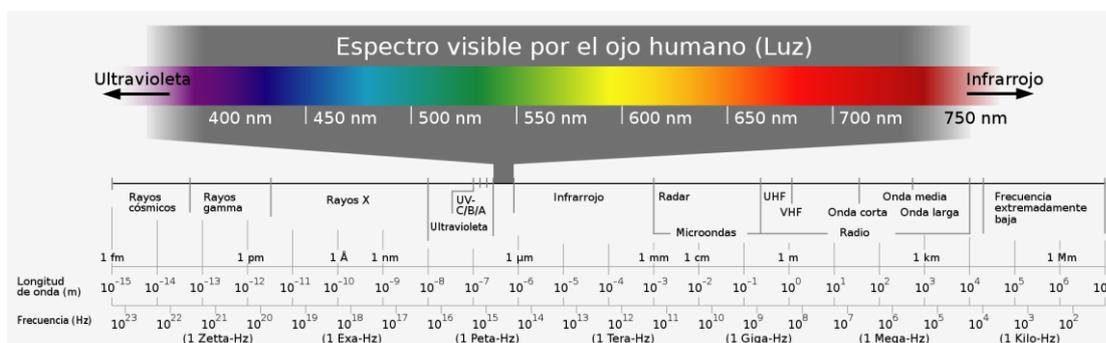


Figura 3. Espectro electromagnético. (Adaptado de (Luque, 2012). (2023, junio 12). Recuperado de https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/062017.pdf).

5.2.4.1 Espectro de Absorción del SO₂

El espectro de absorción del SO₂ corresponde a un espectro de bandas, el cual está constituido por varios grupos de líneas tan estrechamente cercanas que no están definidas con claridad. En la Figura 4, el SO₂ exhibe dos sistemas de bandas en el rango de 240 a 390 nm: un sistema relativamente alto entre 260 a 320 nm y un sistema débil en el rango de 320 a 390 nm. En espectrometría ultravioleta para la medición del SO₂ se utiliza el rango espectral entre 290 y 310 nm, ya que, en el aire el SO₂ es el que domina en la absorción de este rango del espectro (Geoffroy, 2014).

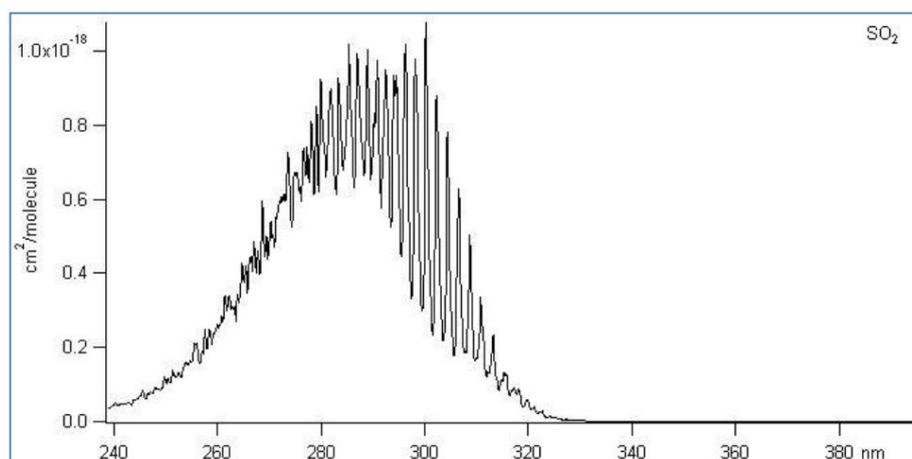


Figura 4. Espectro de absorción del SO₂. La absorción de la radiación por la molécula de SO₂ en $\text{cm}^2/\text{molécula}$ versus las longitudes de onda de la radiación en nm. (Adaptado de

Estimación de la emisión de dióxido de azufre en penachos volcánicos mediante una cámara ultravioleta (p. 17), por Geoffroy, C. 2014, Universidad de Chile).

5.3 Sensores Remotos Satelitales para la Detección de Gases y Aerosoles

Existen diversos sensores satelitales que detectan las emisiones volcánicas e identifican los penachos de SO₂, CO₂ o cenizas. En la Tabla 1 se relacionan algunos sensores satelitales que proporcionan información de emisiones de gases volcánicos, aerosoles y cenizas para América.

Tabla 1. Sensores y satélites que proporcionan información de gases y aerosoles.

No	Sensor	Plataforma	Información proporcionada	Altura Orbita	Resolución Espacial	Resolución Espectral	Resolución Temporal	Acceso	Portales / Plataformas Acceso
1	Instrumento de Monitoreo de la Tropósfera - TROPOMI	Sentinel-5P	ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, formaldehidos, monóxido de carbono y metano, o el espesor óptico de aerosoles (AOD)	824 km	7 km x 3,5 km, 7 km x 28 km, 7 km x 7 km	4 espectrómetros: 2 UV, 2 VIS, 2 NIR y 2 SWIR (8 bandas)	1 día	Libre	1. Google Earth Engine 2. Copernicus Open Access Hub 3. NASA Earthdata
2	Generador de imágenes de línea de base avanzada - ABI	GOES-16 (R)	aerosoles, tormentas de polvo, erupciones volcánicas e incendios forestales	35.785 km	0.5 km, 1 km, 2 km	16 bandas (incluye 2 canales visibles, 4 canales de infrarrojo cercano y 10 canales infrarrojo)	15 minutos disco completo	Libre	1. Google Earth Engine 2. GOES-R Series Product Download 3. NOAA CLASS
3	Conjunto de radiómetros de imágenes infrarrojas visibles - VIIRS	Suomi NPP y NOAA20 (JPSS1)	temperatura, vapor de agua, aerosoles, gases traza, humo, polvo, espesor óptico de aerosol (OAD)	834 km	500 m, 1000 m, 5600 m	0.600 - 0.680 μm, 3.55 - 3.93 μm, 10.5 - 12.4 μm (22 bandas)	1 día	Libre	1. NOAA CLASS 2. NASA Worldview 3. NASA Earthdata
4	Conjunto de Mapeo y Perfilado de Ozono - OMPS	Suomi-NPP	columna total de ozono, total columna de dióxido de azufre (SO ₂), franja de perfil de ozono vertical e índice de aerosol	834 km	50 km x 50 km,	250 - 420 nm	1 día	Libre	1. NOAA CLASS 2. ESRL GMD Ozone and Water Vapor Group 3. NASA Earthdata
5	Experimento de Monitoreo Global de Ozono-2 (GOME-2)	MetOp-A retirada en a finales de 2021, MetOp-B y MetOp-C todavía en órbita.	columna total y perfiles estratosféricos y troposféricos de ozono, cantidades de columna de H ₂ O y otros gases traza NO ₂ , OClO, BrO, SO ₂ y HCHO.	800 km	40 km x 40 km 40 km x 5 km	240 - 790 nm (UV, VIS) (4 canales)	1 día	Libre	1. EUMETSAT Data Centre 2. ESA Earth Online

No	Sensor	Plataforma	Información proporcionada	Altura Orbita	Resolución Espacial	Resolución Espectral	Resolución Temporal	Acceso	Portales / Plataformas Acceso
6	Interferómetro de Sondeo Atmosférico Infrarrojo IASI	Metop	temperatura y la humedad atmosférica, nubes, vapor de H ₂ O y otros gases traza NO ₂ , CH ₄ y SO ₂ . Cantidad de columna CH ₄	705 km	circular de 12 km	8 a 70 nm (0.35 a 0.5 cm ⁻¹) (3 bandas)	2 veces al día	Libre	1. EUMETSAT Data Centre 2. ESA Earth Online
7	Lidar Nube-Aerosol con Polarización Ortogonal - CALIOP	CALIPSO	datos sobre la estructura vertical de las nubes y las capas de aerosoles	705 km	333 m	532 nm, 1064 nm (2 bandas)	16 días	Libre	1. NASA ASDC CALIPSO Data 2. NASA Earthdata
8	Instrumento de Monitoreo de Ozono -OMI	Aura	ozono, aerosoles, gases traza, índice de aerosol (IA)	705 km	13 km x 24 km, 3 km x 48 km para el perfil de ozono	270 - 365 nm UV 365 a 500 nm Visible (740 bandas)	1 día	Libre	1. GES DISC OMI Data 2. NASA Earthdata
9	Sonda Infrarroja Atmosférica - AIRS	Aqua	vapor de agua y perfiles de temperatura, gases traza, nubes	705 km	13.5 km	3.74 - 15.4 μm (2378 canales infrarrojos)	1 día	Libre	1. NASA Earthdata 2. NASA Worldview
10	Generador giratorio mejorado de imágenes visible e infrarrojo (SEVIRI)	Meteosat Segunda Generación (MSG)	niebla, temperatura de la superficie de tierra y parte superior de las nubes, patrones de ozono	35.800 km	1 km, 3 km, 2 km	0.4 – 13.4 μm (5 bandas)	15 minutos	Libre	1. EUMETSAT Data Centre 3. EUMETView
11	Radiómetro avanzado de muy alta resolución (AVHRR)	NOAA y Metop	temperatura superficie terrestre y marina, cobertura de nubes, cobertura de nieve y hielo, la humedad del suelo y los índices de vegetación. Seguimiento de erupciones volcánicas	830 a 870 km	1.1 km	0.5 – 12.5 μm (5 bandas)	12 horas	Libre	1. USGS Earth Explorer 2. NOAA CLASS 3. ERS Data Access

No	Sensor	Plataforma	Información proporcionada	Altura Orbits	Resolución Espacial	Resolución Espectral	Resolución Temporal	Acceso	Portales / Plataformas Acceso
12	Espectroradiómetro de imágenes de media resolución–MODIS	Terra y Aqua	nubes, vapor de agua, aerosoles, gases traza y las propiedades de la superficie del océano y la tierra, espesor óptico de aerosol (OAD)	690 km	250 m, 500 m, 1000 m	0.4 μm - 14.4 μm (36 bandas)	1 día	Libre	1. USGS Earth Explorer 2. NASA Earthdata
13	Radiómetro Avanzado de Emisión Térmica y Reflexión Espacial ASTER	Terra	temperatura, evaporación vegetal, características de la vegetación y del suelo, ciclo hidrológico, procesos volcánicos	706 km	15m VNIR 30 m SWIR 90 m TIR	0.52 – 0.86 μm 1.600 – 2.430 μm 8.125 – 11.65 μm (14 bandas)	16 días todas las bandas y 5 días bandas VNIR	Libre	1. NASA Earthdata 2. ASTER GDEM Data Access

(Adaptado de (*Sensors / Earthdata*, s. f.). (2022, octubre 27). Recuperado de <https://www.earthdata.nasa.gov/sensors>, (*Satellite Missions catalogue*, s. f.). (2023, julio 7). Recuperado de <https://www.eoportal.org/satellite-missions>, (Campion et al., 2010), (Corradini et al., 2009), (Callies et al., 2000) y (Corradini et al., 2010)).

A continuación, se realiza una descripción básica de los sensores mencionados en la Tabla 1, donde se resaltan la entidad encargada de la operación del sensor, el objetivo de la misión del sensor, las características de resoluciones espaciales y espectrales. Al igual que los productos de datos que estos sensores generan.

5.3.1 Instrumento de Monitoreo de la Tropósfera -TROPOMI

El Instrumento de Monitoreo de la Tropósfera (TROPOMI, por sus siglas en inglés) a bordo del satélite Sentinel-5P (S5P) es un instrumento hiperspectral de retrodispersión solar UV-VIS-NIR-SWIR de última generación con la capacidad de mapear una multitud de gases traza y aerosoles. Operado conjuntamente por la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Oficina Espacial de los Países Bajos (NSO). TROPOMI es un Espectrómetro de Absorción Óptica Diferencial – DOAS avanzado con visión nadir que tiene un ancho de franja de 2600 km (aproximadamente 104° de ancho) con un muestreo espacial de 7 km x 7 km y genera cartografía del planeta todos los días. La hora local del cruce del nodo ascendente del satélite es 13:30 h (*Sentinel-5P - Missions - Sentinel Online - Sentinel Online*, s. f.). El diseño del instrumento TROPOMI es herencia de SCIAMACHY y OMI; todos son espectrógrafos pasivos de retrodispersión solar que utilizan las longitudes de onda ultravioleta a SWIR (*Copernicus: Sentinel-5P*, s. f.). En la Tabla 2 se enuncian las características de las bandas espectrales de TROPOMI.

Tabla 2. Características de rendimiento de las bandas espectrales de TROPOMI.

Banda No	Banda espectral	Resolución espectral (µm)	Resolución espacial (km ²)	Productos de datos
1	UV1	270-300	21 x 28	Perfil vertical de ozono (O ₃)
2	UV2	300-320	7 x 7	Dióxido de azufre (SO ₂)
3	UVIS	310-405	7 x 7	Ozono total (O ₃), aerosol, formaldehído (HCHO), monóxido de bromo (BrO), nube, absorción de aerosoles
4	VIS	405-500	7 x 7	Dióxido de nitrógeno (NO ₂), aerosol, nube
5	NIR1	675-725	7 x 7	Nube y vapor de agua
6	NIR2	725-775	7 x 1.8	Perfil de aerosol y nube
7	SWIR	2305-2385	7 x 7	Monóxido de carbono (CO) y metano (CH ₄)

(Adaptado de (*Copernicus: Sentinel-5P*, s. f.). (2023, mayo 27). Recuperado de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/copernicus-sentinel-5p#TROPOMI-tropospheric-monitoring-instrument>).

TROPOMI observará una parte más pequeña del espectro en comparación con SCIAMACHY, como se muestra en la Figura 5.

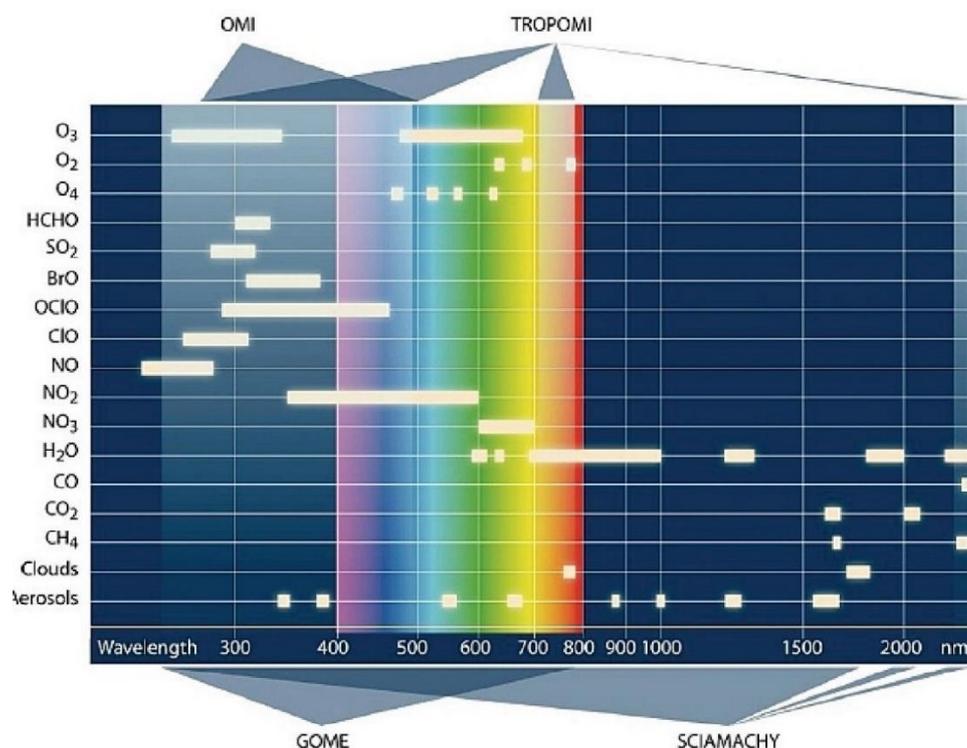


Figura 5. Ventana espectral de TROPOMI comparada con GOME, SCIAMACHY y OMI. (Adaptado de (*Copernicus: Sentinel-5P*, s.f.). (2023, mayo 27). Recuperado de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/copernicus-sentinel-5p#TROPOMI-tropospheric-monitoring-instrument>).

El sensor TROPOMI, al igual que los sensores GOME-2 y OMI se ha empleado para determinar la altura de la nube de SO₂ volcánico después de una erupción volcánica, por medio del algoritmo de recuperación 'Full-Physics Inverse Learning Machine' (FP ILM) que combina el análisis de componentes principales y la red neuronal, que realiza una recuperación extremadamente rápida de la altura de la nube SO₂ basada en mediciones satelitales UV. El algoritmo se optimizó y validó en el marco del proyecto de Innovaciones Sentinel-5p de la ESA (S5P+I) y ya está realizando recuperaciones de altura de la nube SO₂ en un entorno operativo casi en tiempo real. En 2022 se realizó estudio para determinar la altura de la nube de SO₂ basados en mediciones de GOME-2, OMI/OMPS y TROPOMI de las erupciones volcánicas de Raikoke (Islas Kuriles) en junio-julio de 2019 (Hedelt et al., 2022).

5.3.2 *Generador de Imágenes de Línea de Base Avanzada – ABI*

El Generador de Imágenes de Línea de Base Avanzada (ABI, por sus siglas en inglés) es un generador de imágenes multiespectrales a bordo de los satélites ambiental operativo geostacionario del programa GOES-R, para el monitoreo del clima operado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) y la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA). ABI tiene 3 sectores de imagen, “full-disk” es la observación de la tierra de disco completo en 15 minutos, “CONUS” es la observación de la tierra de disco cada 5 minutos y el sector de mesoescala cubre una región nominal de 1000 km x 1000 km (en la proyección del nadir) cada 30 segundos. Esta misión de cuatro satélites incluye GOES-R (GOES-16, lanzado en 2016), GOES-S (GOES-17, lanzado en 2018), GOES-T (GOES-18, lanzado en 2022), y GOES-U. Los satélites GOES-16 y 17, observan continuamente los Estados Unidos, México, América Central, América del Sur, el Caribe y gran parte de los océanos Pacífico y Atlántico. El lanzamiento de GOES-U está programado actualmente para 2024 (*GOES-R (Geostationary Operational Environmental Satellite-R)*, s. f.). En la Tabla 3 se enuncian las características de las bandas de ABI.

Tabla 3. Cobertura espectral de las bandas del sensor ABI.

Banda	Resolución espectral FWHM (µm)	Resolución espacial (km)	Productos de datos
1	0.45-0.49	1	Aerosol diurno sobre tierra, mapeo de aguas costeras
2	0.59-0.69	0.5	Nubes diurnas niebla, insolación, vientos
3	0.846-0.885	1	Vegetación diurna/cicatriz de quemadura y aerosoles sobre el agua, vientos
4	1.371-1.386	2	Nube cirro diurna
5	1.58-1.64	1	Fase superior de la nube durante el día y tamaño de las partículas, nieve
6	2.225-2.275	2	Propiedades de la tierra/nubes durante el día, tamaño de partículas, vegetación, nieve
7	3.80-4.00	2	Superficie y nube, niebla por la noche, fuego, vientos
8	5.77-6.6	2	Vapor de agua atmosférico de alto nivel, vientos, precipitaciones
9	6.75-7.15	2	Vapor de agua atmosférico de nivel medio, vientos, precipitaciones
10	7.24-7.44	2	Vapor de agua a niveles inferiores, vientos y SO ₂
11	8.3-8.7	2	Agua total para estabilidad, fase de nubes, polvo, SO ₂ , lluvia
12	9.42-9.8	2	Ozono total, turbulencia, vientos
13	10.1-10.6	2	Superficie y nube
14	10.8-11.6	2	Imágenes, SST, nubes, lluvia

Banda	Resolución espectral FWHM (μm)	Resolución espacial (km)	Productos de datos
15	11.8-12.8	2	Agua total, cenizas, SST
16	13.0-13.6	2	Temperatura del aire, alturas y cantidades de nubes

(Adaptado de (*GOES-R (Geostationary Operational Environmental Satellite-R)*, s. f.). (2023, mayo 21). Recuperado de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/goes-r#inr-image-navigation-and-registration>).

5.3.3 Conjunto de Radiómetros de Imágenes Infrarrojas Visibles -VIIRS

El Conjunto de Radiómetros de Imágenes Infrarrojas Visibles (VIIRS, por sus siglas en inglés) es un instrumento a bordo de NOAA-20 y Suomi NPP. El VIIRS combina la precisión radiométrica del AVHRR-3 (Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución). El VIIRS es un generador de imágenes y radiómetro avanzado, modular y multibanda (22 bandas) con el objetivo de proporcionar observaciones globales (resolución espacial moderada) de parámetros terrestres, oceánicos y atmosféricos a altas velocidades temporales (*JPSS-1/NOAA-20*, s. f.). En la Tabla 4 se enuncian la cobertura espectral de las bandas del sensor VIIRS.

Tabla 4. Cobertura espectral de las bandas del sensor VIIRS.

Banda	Onda central (μm)	Ancho de banda (μm)	Comentario (requisitos de observación de EDR de conducción)
Región espectral VNIR (Visible Infrarrojo Cercano)			
DNB	0.70	0.40	Day Night Band, el ancho de banda amplio maximiza la señal (banda reflejada nocturna esencial)
M1	0.412	0.02	Color del océano, materia en suspensión, flujo de calor neto, carga de masa
M2	0.445	0.018	Color del océano, materia en suspensión, flujo de calor neto, carga de masa
M3	0.488	0.02	Color del océano EVI, tipo de superficie, materia en suspensión de aerosoles, flujo de calor neto, carga de masa
M4	0.555	0.02	Color del océano, tipo de superficie, materia en suspensión, flujo de calor neto, carga de masa
I1	0.640	0.05	Imágenes, NDVI, máscara/cobertura de nubes, propiedades ópticas de las nubes, tipo de superficie, albedo, nieve/hielo, humedad del suelo
M5	0.672	0.02	Color del océano, aerosoles, materia en suspensión, flujo de calor neto, transporte litoral, carga masiva
M6	0.746	0.015	Color del océano, carga masiva
I2	0.865	0.039	Imágenes NDVI (banda de herencia NDVI), nieve/hielo, tipo de superficie, albedo

Banda	Onda central (μm)	Ancho de banda (μm)	Comentario (requisitos de observación de EDR de conducción)
M7	0.865	0.039	Color del océano, máscara/cobertura de nubes, aerosoles, humedad del suelo, flujo de calor neto, carga de masa
Región espectral SWIR (infrarrojo de onda corta)			
M8	1.24	0.02	Propiedades ópticas de las nubes (esenciales sobre nieve/hielo), fuegos activos
M9	1.378	0.015	Máscara/cobertura de nubes (detección de cirros delgados), aerosoles, flujo de calor neto
M10	1.61	0.06	Aerosoles, propiedades ópticas de las nubes, máscara/cobertura de nubes (detección de nubes/nieve), incendios activos, humedad del suelo, flujo de calor neto
I3	1.61	0.06	Imágenes nieve/hielo (diferenciación nube/nieve), tipo de superficie, albedo
M11	2.25	0.05	Aerosoles (espesor óptico óptimo del aerosol sobre la tierra), propiedades ópticas de las nubes, tipo de superficie, incendios activos, flujo de calor neto
Región espectral MWIR (infrarrojo de onda media)			
I4	3.74	0.38	Imágenes (identificación de estratos bajos y oscuros), incendios activos
M12	3.70	0.18	SST (Temperatura de la superficie del mar), máscara/cobertura de nubes, EDR de nubes, tipo de superficie, temperatura de la superficie terrestre/del hielo, aerosoles
M13	4.05	0.155	SST (esencial para la SST de la piel en los trópicos y durante el día), temperatura de la superficie terrestre, incendios activos, agua precipitable
Región espectral TIR (Infrarrojo Térmico)			
M14	8.55	0.3	Máscara/cobertura de nubes (fundamental para la detección de fase de nubes por la noche, propiedades ópticas de nubes)
M15	10.763	1.00	TSM, EDR de nubes y SDR (Registros de datos científicos), temperatura de la superficie terrestre/hielo, tipo de superficie
I5	11.450	1.9	Imágenes (banda de imágenes nocturnas)
M16	12.013	0.95	TSM, máscara/cobertura nubosa, temperatura de la superficie terrestre/hielo, tipo de superficie

(Adaptado de (JPSS-1/NOAA-20, s.f.). (2023, mayo 22). Recuperado de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/suomi-npp>

El VIIRS al igual que el sensor MODIS posee capacidades de detección infrarroja que se han aprovechado para identificar anomalías térmicas terrestres. Aunque comúnmente se usan para observar las firmas térmicas características de los incendios activos, estos datos también tienen utilidad en la observación de superficies volcánicas activas. Las principales diferencias entre la observación de superficies volcánicas activas, en comparación con los

incendios, son que: 1) es probable que los rangos de temperatura sean más altos (con lava presente tanto fresca como fría o enfriándose), 2) es probable que las fuentes de calor sean más omnipresentes, y 3) es probable que haya un mayor contraste de temperatura entre las superficies calientes y las superficies circundantes no volcánicas de gran altitud. Para analizar el potencial de VIIRS, se realiza una comparación con el sensor MODIS, centrándose en los volcanes de Indonesia, los resultados indican que la capacidad de detección de emisiones del VIIRS dada la mayor resolución espacial nominal del VIIRS y sus técnicas mejoradas de escaneo y muestreo es mejor con respecto a la de su predecesor MODIS (Blackett, 2015).

5.3.4 Conjunto de Mapeo y Perfilado de Ozono – OMPS

El Conjunto de Mapeo y Perfilado de Ozono (OMPS, por sus siglas en inglés) es un espectrómetro de imágenes hiperespectrales ultravioleta con visualización de extremidades y nadir, a bordo del Suomi NPP que es un satélite meteorológico operado por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) y la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). El objetivo es medir la cantidad total de ozono en la atmósfera y la variación de la concentración de ozono. El OMPS es herencia de SBUV/2, TOMS y GOME (*Suomi NPP (National Polar-orbiting Partnership)*, s. f.). En la Tabla 5 se enuncian los parámetros de rendimiento de los espectrómetros OMPS.

Tabla 5. Parámetros de rendimiento de los espectrómetros OMPS.

Parámetro	Columna total de nadir (mapeador de nadir)	Perfil de Nadir	Sondeos de extremidades
Rango espectral	300-380 nanómetro	250-310 nanómetro	290-1000nm
Rango de radiación espectral [fotones/ (s cm ² sr nm)]	9 el 3 (380 nm)	2 el 3 (310 nm)	9 el 3 (600 nm)
	8 el 1 (308 nm)	1.5 el 8 (252 nm)	5 el 0 (300 nm)
SNR (relación señal-ruido) mínimo	1000	35 (252 nm)	320 (290 mn a 60 km)
		400 (310 nm)	1200 (600 mn a 15 km)
Tiempo de integración	7.6 s	38 segundos	38 segundos
Resolución espectral	1 nm FWHM	1 nm FWHM	2.8-54 nm FWHM
	2.4 muestras/FWHM	2.4 muestras/FWHM	1 muestra/FWHM
campo de visión	110° x 1.0° (transversal x longitudinal)	16.6° x 0.26°	8.5° x 1.9° (3 juegos)

Parámetro	Columna total de nadir (mapeador de nadir)	Perfil de Nadir	Sondeos de extremidades
Tamaño de celda	49 km x 50 km (nadir)	250 km x 250 km (célula única en el nadir)	Intervalo de muestreo vertical de 1 km
Tiempo de revisión	A diario		4 días (promedio)
Franja transversal	2800 km	250 km	500 km (3 cortes verticales a lo largo de la vía)

(Adaptado de (*Suomi NPP (National Polar-orbiting Partnership)*, s. f.). (2023, mayo 27). Recuperado de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/suomi-npp>

El instrumento satelital OMPS por sus imágenes hiperespectrales ultravioleta se ha utilizado para el monitoreo del SO₂ atmosférico, sus datos se utilizaron para actualizar el catálogo global de fuentes importantes de SO₂. Esta segunda versión del catálogo incluye información sobre un total de 759 fuentes puntuales que emiten desde aproximadamente 10 hasta más de 4000 kt/año de SO₂ (Fioletov et al., 2023).

5.3.5 Experimento de Monitoreo Global de Ozono-2 (GOME-2)

El Experimento de Monitoreo Global de Ozono-2 (GOME-2, por sus siglas en inglés) es un espectrómetro de barrido transversal y de visión nadir de resolución media del legado GOME-1 volado en ERS-2 (lanzamiento en 1995). Este sensor viaja a bordo de los satélites MetOp-B y MetOp-C todavía en órbita. GOME-2 mide la radiación solar transmitida o dispersada desde la atmósfera terrestre o desde su superficie (*MetOp (Meteorological Operational Satellite Program of Europe)*, s. f.). En la Tabla 6 se relacionan los parámetros del sensor GOME-2.

Tabla 6. Parámetros del sensor GOME-2.

Canal	Rango espectral	Resolución espectral (FWHM)	Productos de datos
1	240 - 315 nm	0.24 – 0.29 nm	Detección de ozono, perfil O ₃ y dióxido de azufre (SO ₂).
2	311 - 403 nm	0.26 – 0.28 nm	Detección de ozono (O ₃) SO ₂ ,
3	401 - 600 nm	0.44 – 0.53 nm	Detección de aerosoles, estimación de la intensidad de la radiación ultravioleta en la superficie terrestre
4	590 - 790 nm	0.44 – 0.53 nm	Detección de vapor de agua y para la estimación de la altura de las nubes. cobertura de nubes

(Adaptado de (Callies et al., 2000)).

5.3.6 Interferómetro de Sondeo Atmosférico Infrarrojo - IASI

El Interferómetro de Sondeo Atmosférico Infrarrojo (IASI, por sus siglas en inglés) es un interferómetro de imágenes de visión nadir que fue desarrollado por la Agencia Espacial Francesa (CNES) y construido por Thales Alenia Space. Comprende un espectrómetro de transformada de Fourier (FTS) y un generador de imágenes asociado. El sistema IASI tiene como objetivo observar y medir dos veces al día el espectro de radiación infrarroja emitida por la Tierra desde una órbita heliosincrónica, en una franja de 2000 km de ancho (*MetOp (Meteorological Operational Satellite Program of Europe)*, s. f.). En la Tabla 7 se relacionan las características de las bandas del sensor IASI

Tabla 7. Parámetros del sensor IASI.

Banda	Resolución espectral FWHM	Productos de datos
Banda 1	15.5 – 8.26 μm (resolución no podizada)	Recuperaciones de perfiles de temperatura y ozono 650-770 cm^{-1} - Sondeo de temperatura (banda de CO ₂) 770-980 cm^{-1} - Propiedades de superficie y nubes 1000-1070 cm^{-1} - Sondeo de ozono 1080-1150 cm^{-1} - Propiedades de la superficie y la nube
Banda 2	8.26-5 μm (resolución apodizada)	Recuperaciones de humedad y algunos gases traza 1210-1650 cm^{-1} - Sondeo de vapor de agua, N ₂ O, CH ₄ y SO ₂
Banda 3	5 – 3.62 μm (resolución apodizada)	Recuperaciones de temperatura y gases traza 2100-2150 cm^{-1} - Cantidad de columna de CO 2150-2250 cm^{-1} - Sondeo de temperatura, cantidad de columna de N ₂ O 2350-2420 cm^{-1} - Sondeo de temperatura 2420-2700 cm^{-1} - Propiedades de superficie y nubes 2700-2760 cm^{-1} - Cantidad de columna CH ₄

(Adaptado de (*MetOp (Meteorological Operational Satellite Program of Europe)*, s. f.). (2023, junio 11). Recuperado de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/metop#gome-2-global-ozone-monitoring-experiment-2>).

En el monitoreo de erupciones volcánicas explosivas para determinar el flujo de SO₂ volcánico, se ha utilizado el infrarrojo térmico (IASI), ya que este abarca un rango espectral que cubre tres bandas de absorción de SO₂. Además, se han utilizado instrumentos satelitales de alta resolución espectral que operan tanto en el rango ultravioleta-visible OMI/Aura y GOME-2/MetOp-A, junto con instrumentos satelitales multispectrales que operan en el infrarrojo térmico MODIS/Terra-Aqua. La salida estándar de las recuperaciones de SO₂ de satélites no es un flujo, sino una columna vertical (VC, por sus siglas en inglés). La recuperación de SO₂ desde el sensor IASI combina las diferencias de temperatura medidas

entre los canales de línea de base y los canales en la banda B3 de absorción de SO₂. Aunque, la sensibilidad vertical al SO₂ se ve afectada por la absorción de vapor de agua y está limitada a las capas atmosféricas por encima de los 3-5 km de altura. La conversión de la señal medida en una columna vertical de SO₂ se realiza utilizando una gran tabla de búsqueda y perfiles operativos de presión, temperatura y humedad de EUMETSAT. En cuanto las recuperaciones de columnas verticales de SO₂ por GOME-2 se realiza a partir de la técnica de DOAS (Theys et al., 2013)

En la validación de estas técnicas, se llevaron a cabo tres casos de estudio, donde se analizaron los resultados de los flujos de SO₂ obtenidos mediante las diferentes técnicas aplicadas a cada uno de los tres volcanes examinados: Puyehue-Cordón Caulle, Nyamuragira y Nabro. Se concluyó que al inicio de la erupción, el SO₂ se inyecta masivamente a altas altitudes y se encuentra que la recuperación de IASI es óptima, gracias a su amplia aplicabilidad de columna y a su tiempo de revisión de 12 horas (en contraste con las 24 horas de GOME-2. Pero, poco después del primer episodio de inyección, el SO₂ se distribuye de manera más uniforme en toda la atmósfera, condiciones para las cuales GOME-2 proporciona información sobre la columna total de SO₂ en la atmósfera, incluyendo la contribución de la baja troposfera (que no se sondea tan eficientemente con IASI) (Theys et al., 2013).

5.3.7 Lidar de Aerosoles y Nubes con Polarización Ortogonal - CALIOP

El instrumento Lidar Nube-Aerosol con Polarización Ortogonal (CALIOP, por sus siglas en inglés) utiliza un transmisor láser de dos longitudes de onda para obtener perfiles verticales de nubes y aerosoles a partir de la retrodispersión detectada, frecuencias de longitud de onda dual desde una geometría de visualización nadir durante las fases diurna y nocturna de la órbita (*CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)*, s. f.). En la Tabla 8 se evidencia las características de los canales del sensor CALIOP.

Tabla 8. Definiciones de canales del instrumento CALIOP.

Canal	Resolución espectral	Resolución vertical	Productos de datos
1	532 nm	30 metros	perfiles verticales de retrodispersión elástica (distribuciones de aerosoles y nubes)
2	1064 nm	30 metros	

(Adaptado de *CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)*, s. f.). (2023, mayo 27). Recuperado de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/calipso>).

CALIPSO es el primer satélite que proporciona información sobre la estructura vertical de nubes y aerosoles, así como estimaciones resueltas verticalmente de la cantidad de lluvia y hielo en las nubes. Estas observaciones se utilizan luego para evaluar en qué medida las nubes y los aerosoles contribuyen al calentamiento global (*CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)*, s. f.). En el caso de estudio de la erupción del volcán Raikoke en 2019, que fue observada por varios sensores satelitales como OMI, TROPOMI, OMPS y CALIOP, se identificó el fenómeno de presencia de nubes estratosféricas compactas de SO₂. Estas nubes son parte de la nube original resultante de la erupción del volcán Raikoke y se formaron un mes después de la erupción en la misma área donde se encuentra el volcán. Para describir la estructura vertical de las nubes se utilizaron las imágenes lidar de CALIOP para aerosoles, específicamente la señal de retrodispersión total atenuada a 532 nm con una resolución espacial de 40 km a lo largo de la pista y una resolución vertical de 120 m (altitud < 20 km) y 360 m (altitud > 20 km). Teniendo en cuenta que el proceso de conversión de SO₂ a aerosol es de 8 a 10 días, el pico de aerosol de sulfato ocurre 1.5 meses después del momento de máxima liberación de SO₂. En el estudio de nubes estratosféricas compactas de SO₂, que fue observado durante 2.5 meses, se identificó que las nubes incorporaron el flujo estival de vientos del este en la estratosfera y demostró una tasa de calentamiento diabático de "autoelevarse" de aproximadamente 3 K por día (Gorkavyi et al., 2021).

5.3.8 Instrumento de Monitoreo de Ozono - OMI

El Instrumento de Monitoreo de Ozono (OMI, por sus siglas en inglés) es un espectrómetro de imágenes de luz ultravioleta y visible que mide la radiación solar retrodispersada de la atmósfera y la superficie de la Tierra en longitudes de onda de 270 nm a 500 nm. OMI es un instrumento de la nave espacial Aura que continúa con el registro del espectrómetro de mapeo de ozono total (TOMS) y otros parámetros atmosféricos relacionados con la química del ozono y el clima (*Aura (EOS/Chem-1)*, s. f.). En la Tabla 9 se enuncian la cobertura espectral de las bandas del sensor OMI.

Tabla 9. Cobertura espectral de las bandas del sensor OMI.

Canal	Resolución espectral	Productos de datos
UV-1	270 - 314 nm 270 - 310 nm	Perfil O ₃
UV-2	306 - 380 nm 310 - 365 nm	Perfil de O ₃ , columna de O ₃ (TOMS & DOAS), BrO, OCIO, SO ₂ , HCHO, aerosol, UV-B de superficie, reflectancia de superficie, presión en la cima de la nube, cobertura de nubes
VIS	350 - 500 nm 365 - 500 nm	NO ₂ , aerosol, OCIO, UV-B de superficie, reflectancia de superficie, presión en la parte superior de la nube, cobertura de nubes

(Adaptado de *(Aura (EOS/Chem-1), s.f.). (2023, mayo 27). Recuperado de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/aura#omi-ozone-monitoring-instrument>*).

Dado la importancia de reducir las emisiones atmosféricas de SO₂ en Estados Unidos como en Canadá, se han desarrollado métodos para ajustar los datos de densidades de columna vertical (VCD, por sus siglas en inglés) de los sensores. Para ello las observaciones del OMI y las mediciones in situ en tierra se examinan para verificar si los cambios observados en las mediciones de la abundancia de SO₂ son cuantitativamente consistentes con los cambios informados de las emisiones. Para establecer esta conexión, se desarrolló un método para vincular las emisiones de SO₂ y las mediciones satelitales de SO₂. El método se basa en ajustar las (VCD) de SO₂ del satélite a un conjunto de funciones de las coordenadas de píxeles de OMI y las velocidades del viento, donde cada función representa un modelo estadístico de una pluma de una única fuente puntual (Fioletov et al., 2017).

5.3.9 Sonda Infrarroja Atmosférica – AIRS

El instrumento Sonda Infrarroja Atmosférica (AIRS, por sus siglas en inglés) a bordo del satélite Aqua operado por la NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio, EE. UU.), el INPE (Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales, Brasil) y la JAXA (Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón) es un espectrómetro infrarrojo de resolución media que proporciona mediciones de alta resolución espectral de los perfiles de temperatura y humedad en la atmósfera. AIRS contiene más de 2300 canales espectrales que tienen una resolución espacial de 0.4 a 14.4 μm , con un campo de visión instantáneo (IFOV) de 1.1°, un campo de visión (FOV) de $\pm 49.5^\circ$ y un ancho de franja de 1650 km (13.5 km horizontal en el nadir, 1 km en posición vertical). Este sensor realiza mediciones de las radiaciones infrarrojas ascendentes de la tierra en el rango espectral de 3.74 – 15.4 μm ,

simultáneamente en 2378 frecuencias (bandas), y también están presentes cuatro canales de longitud de onda visible (*Aqua (EOS/PM-1)*, s. f.).

La cantidad de dióxido de azufre SO₂ liberado por actividad volcánica en la atmósfera puede ser cuantificada mediante el empleo de diversos instrumentos satelitales con distintas órbitas y resoluciones. Los resultados de investigaciones indican que al combinar varios instrumentos de manera coordinada se logra un enfoque más completo para detectar erupciones volcánicas. Esto se demuestra a través del uso del sensor AIRS que tiene el potencial de recuperar varios productos volcánicos, ya que el rango de longitudes de onda incluye el espectro de absorción de SO₂, el sensor cuenta con 2378 canales infrarrojos y tiene una cobertura global diaria del 95%, con una resolución espacial de 14 km en el nadir y un ancho de escaneo de 1650 km. Similarmente, el sensor MODIS, al compartir longitudes de onda en el infrarrojo térmico con AIRS, posee la capacidad de recuperar información sobre cenizas, sulfatos y SO₂, con una resolución espectral de 1 km². Por otro lado, el sensor OMI destaca por su resolución espacial de 13 x 624 km² y espectral en el rango ultravioleta, permitiendo mediciones tanto de desgasificación pasiva como de nubes volcánicas explosivas. Las recuperaciones de AIRS y MODIS a 7.3 μm son capaces de detectar el SO₂ en erupciones de altas latitudes y también son efectivas durante la noche. Por otro lado, el sensor OMI, al operar en longitudes de onda UV, puede detectar el SO₂ en la baja troposfera. Por lo tanto, para lograr series temporales completas de datos, se debe considerar la integración de los datos de los sensores infrarrojos AIRS y MODIS junto con los del sensor OMI (Thomas et al., 2011).

5.3.10 Generador Giratorio Mejorado de Imagen Visible e Infrarroja - SEVIRI

El Generador Giratorio Mejorado de Imagen Visible e Infrarroja (SEVIRI) es el principal instrumento a bordo de los satelitales de la serie Meteosat de segunda generación desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA) y Agencia Europea de Satélites Operativos para la Vigilancia del Tiempo (EUMETSAT). Este instrumento es un radiómetro multiespectral que se utiliza para el seguimiento del clima, monitorear los campos de temperatura y humedad atmosférica, viento atmosférico, tipo de nube, cantidad y temperatura, tasa de precipitación, ozono, balance de radiación y vegetación (*Meteosat Second Generation*, s. f.). En la Tabla 10 se enuncian la cobertura espectral de las bandas del sensor SEVIRI.

Tabla 10. Definiciones de canales del instrumento SEVIRI.

No. Canal	Canal		Banda espectral nominal (μm)
	Nombre	Centro de λ (μm)	
12	HRV (alta resolución visible)	Banda ancha (respuesta de silicio, alrededor de 0,4-1,1)	
1	VIS 0.6	0.635	0,56-0,71
2	VIS 0.8	0.81	0,74-0,88
3	IR 1.6	1.64	1,50-1,78
4	IR 3.9	3.90	3.48-4.36
5	VM 6.2	6.25	5.35-7.15
6	VM 7.3	7.35	6.85-7.85
7	IR 8.7	8.70	8.30-9.10
8	IR 9.7	9.66	9.38-9.94
9	IR10.8	10.80	9.80-11.80
10	IR 12.0	12.00	11.00-13.00
11	IR 13.4	13.4	12.40-14.40

(Adaptado de (*Meteosat Second Generation*, s. f.). (2023, julio 9). Recuperado de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/meteosat-second-generation#sensor-complement>).

Se ha demostrado que los sensores infrarrojos (IR) satelitales son adecuados para el monitoreo de nubes volcánicas. En este caso, se desarrolló un enfoque de Aprendizaje Automático (ML, por sus siglas en inglés) en Google Earth Engine (GEE) para detectar una nube volcánica y clasificar sus componentes principales utilizando imágenes infrarrojas de satélite SEVIRI. Implementando un algoritmo de máquina de vectores de soporte supervisado (SVM) para segmentar una combinación de bandas de infrarrojos térmicos (TIR) adquiridas por el sensor geoestacionario SEVIRI. Este algoritmo de Aprendizaje Automático se aplicó a algunos de los eventos explosivos paroxísticos que ocurrieron en el Monte Etna entre 2020 y 2022. Donde descubrieron que el enfoque de Aprendizaje Automático que utiliza una combinación de bandas TIR del satélite geoestacionario es muy eficiente, logrando una precisión de 0.86, siendo capaz de detectar, rastrear y mapear automáticamente nubes de cenizas volcánicas casi en tiempo real. El algoritmo (SVM) devuelve como salida una imagen con cuatro clases: ceniza, mezcla de ceniza y SO₂ (o simplemente mezcla) y fondo (Torrisi et al., 2022).

5.3.11 Radiómetro Avanzado de muy Alta Resolución - AVHRR/3

El Radiómetro Avanzado de muy Alta Resolución (AVHRR/3, por sus siglas en inglés) es un instrumento de tercera generación de AVHRR que monitorea la energía reflejada en las

porciones visible e infrarroja del espectro electromagnético. Su objetivo es generar imágenes diurnas y nocturnas en 6 bandas espectrales. Este sensor agrega un sexto canal en el rango IR a 1.61 μm (denominado canal 3a, que opera durante la parte diurna de la órbita) (*NOAA POES Series - 5th Generation*, s. f.). En la Tabla 11 se enuncian los parámetros espectrales de los canales AVHRR/3.

Tabla 11. Cobertura espectral de los canales del sensor AVHRR/3.

Canal	Cobertura espectral central (μm)	Rango espectral FWHM (μm)	Productos de datos
1	0.630 (VIS)	0.58 – 0.68	Mapeo diurno de nubes y superficies
2	0.862 (VNIR)	0.725 – 1.00	Límites tierra-agua, detección de la vegetación, estimación de las propiedades ópticas de los aerosoles.
3a	1.61 (TIN)	1.58 – 1.64 (día seleccionable)	Detección de nieve y hielo
3b	3.74 (ventana IR)	3.55 - 3.93 (noche seleccionable)	Mapeo de nubes nocturnas, temperatura de la superficie del mar
4	10.80 (ventana IR)	10.30 - 11.30	Mapeo de nubes nocturnas, temperatura de la superficie del mar
5	12.00 (ventana IR)	11.50 - 12.50	Temperatura de la superficie del mar, la detección de las características de las nubes.

(Adaptado de (*NOAA POES Series - 5th Generation*, s. f.) (2023, mayo 27): Recuperado de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/noaa-poes-series-5th-generation#avhrr3-advanced-very-high-resolution-radiometer>).

Los sensores satelitales con bandas en el infrarrojo térmico pueden detectar SO₂ y ceniza volcánica expulsadas durante una erupción explosiva. Esto se ilustra claramente en el caso de la erupción del volcán Kasatochi en agosto de 2008, donde se demostró la capacidad para discriminar entre ceniza volcánica y nubes meteorológicas utilizando dos canales infrarrojos centrados en las características de absorción de las ventanas de 7.3 y 8.7 μm para las recuperaciones de SO₂, y de 10 y 12 μm para las recuperaciones de ceniza. En el estudio se emplearon diversas mediciones satelitales en el infrarrojo recopiladas por los sensores MODIS, AVHRR y AIRS. Dado el contenido columnar de SO₂ obtenido en el estudio, sugiere que la recuperación de SO₂ en la troposfera inferior debería llevarse a cabo utilizando el canal de 8.7 μm (Corradini et al., 2010).

5.3.12 Espectroradiómetro de Imágenes de Media Resolución– MODIS

El Espectroradiómetro de Imágenes de Media Resolución (MODIS, por sus siglas en inglés) es el instrumento principal de los satélites Terra y Aqua operado por la NASA, el INPE y la JAXA. Este sensor proporciona imágenes en 36 bandas discretas entre 0.4 y 14.5 μm , el objetivo es medir procesos biológicos y físicos de forma global en escalas de tiempo de 1 a 2 días (*Terra (EOS/AM-1)*, s. f.). En la Tabla 12 se enuncian las características de las bandas del sensor MODIS.

Tabla 12. Cobertura espectral de las bandas del sensor MODIS.

Uso primario	Nro. de banda	Ancho de banda(μm)	Resolución espacial en el nadir
Límites de tierra/nubes	1	0.620 – 0.670	250 metros
	2	0.841 – 0.876	
Propiedades de tierra/nube	3	0.459 – 0.479	500 metros
	4	0.545 – 0.565	
	5	1.230 – 1.250	
	6	1.628 – 1.652	
	7	2.105 – 2.155	
Color del océano/ Fitoplancton/ Biogeoquímica	8	0.405 – 0.420	1000 metros
	9	0.438 – 0.448	
	10	0.483- 0.493	
	11	0.526- 0.536	
	12	0.546 – 0.556	
	13	0.662-0.672	
	14	0.673 – 0.683	
	15	0.743 – 0.753	
Vapor de agua atmosférico	16	0.862 – 0.877	1000 metros
	17	0.890 – 0.920	
	18	0.931 – 0.941	
Temperatura de la superficie/nube	19	0.915 – 0.965	1000 metros
	20	3.660 - 3.840	
	21	3.929 - 3.989	
	22	3.929 - 3.989	
Temperatura Atmosférica	23	4.020 - 4.080	1000 metros
	24	4.433 - 4.598	
Nubes cirros	25	4.482 - 4.549	1000 metros
	26	1.360 - 1.390	
Vapor de agua	27	6.535 - 6.895	1000 metros
	28	7.175 - 7.475	
	29	8.400 - 8.700	
Ozono	30	9.580 - 9.880	1000 metros
Temperatura de la superficie/nube	31	10.780 - 11.280	1000 metros
	32	11.770 - 12.270	

Uso primario	Nro. de banda	Ancho de banda(μm)	Resolución espacial en el nadir
Altitud de la cima de la nube	33	3.185 - 13.485	1000 metros
	34	13.485 -13.785	
	35	13.785- 14.085	
	36	14.085 - 14.385	

(Adaptado de (*Terra (EOS/AM-1)*, s. f.). (2023, mayo 22). Recuperado de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/terra#mission-status>).

Los datos infrarrojos adquiridos por el instrumento MODIS son empleados por el algoritmo MODVOLC para el monitoreo satelital casi en tiempo real de la actividad volcánica global. MODVOLC monitorea la superficie de la Tierra en busca de señales de emisión térmica de erupciones volcánicas, incendios forestales y fuentes de calor antropogénicas (*MODVOLC*, s. f.). El algoritmo entró en funcionamiento el 28 febrero de 2000 después del lanzamiento del satélite Terra e incorporó datos MODIS del satélite Aqua en junio de 2002 (Wright, 2015) y este algoritmo se encarga de generar el umbral que discrimina los valores del Índice Térmico Normalizado (NTI, por sus siglas en inglés), el cual opera en las bandas 21 o 22, y 32 correspondientes al infrarrojo medio y termal, respectivamente, con el fin de visualizar los lugares de mayor actividad volcánica (Luna, 2022).

5.3.13 Radiómetro Avanzado de Emisión Térmica y Reflexión Espacial - ASTER

El Radiómetro Avanzado de Emisión Térmica y Reflexión Espacial (ASTER, por sus siglas en inglés) es un instrumento japonés patrocinado por METI (Ministerio de Economía, Comercio e Industria) y un proyecto cooperativo con la NASA. El objetivo es promover imágenes multiespectrales y de alta resolución de la superficie terrestre y las nubes para una mejor comprensión de los procesos físicos que afectan el cambio climático. ASTER puede observar cualquier punto del globo al menos una vez dentro de los 16 días en las 14 bandas, excepto las bandas VNIR que es una vez cada 5 días (*Terra (EOS/AM-1)*, s. f.). En la Tabla 13 se enuncian la cobertura espectral de las bandas del sensor MODIS.

Tabla 13. Cobertura espectral de las bandas del sensor ASTER.

Región de longitud de onda	Nro. de banda	Rango espectral (μm)	Región de longitud de onda	Nro. de banda	Rango espectral (μm)
VNIR	1	0.52 – 0.60	SWIR	8	2.295 - 2.365

Región de longitud de onda	Nro. de banda	Rango espectral (µm)	Región de longitud de onda	Nro. de banda	Rango espectral (µm)
	2	0.63 – 0.69		9	2.360 - 2.430
	3	0.76 – 0.86		10	8.125 - 8.475
SWIR	4	1.60 – 1.70	TIR	11	8.475 - 8.825
	5	2.145 - 2.185		12	8.925 - 9.275
	6	2.185 - 2.225		13	10.25 - 10.95
	7	2.235 - 2.285		14	10.95 - 11.65

(Adaptado de (*Terra (EOS/AM-1)*, s. f.). (2023, mayo 22). Recuperado de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/terra#mission-status>).

Las imágenes multiespectrales TIR de ASTER fueron empleados para detectar el SO₂ en la troposfera inferior en dos casos de estudio: los volcanes Miyakejima (Japón) y Etna (Italia), donde se aplicó un método que ajusta la cantidad de SO₂ en la columna, basándose en simulaciones de relaciones de bandas, logrando reducir el efecto de la humedad atmosférica, la altitud de la superficie y la emisividad de la superficie. Este método es directamente aplicable a cualquier imagen libre de nubes de un volcán en desgasificación, ya sea en una isla o en un continente (Campion et al., 2010). Además, el sensor ASTER hace parte del proyecto Archivo Volcánico ASTER (AVA, por sus siglas en inglés) del Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL, por sus siglas en inglés). Este proyecto se manifiesta a través de un sitio web que proporciona acceso a datos de imágenes de volcanes adquiridos por ASTER. El archivo se compone actualmente de más de 200.000 imágenes infrarrojas de volcanes ASTER en resolución completa, correspondientes a 1.542 volcanes activos enumerados en el Catálogo Global de Volcanes del Smithsonian, y su tamaño aumenta cada día. Los productos se proporcionan como imágenes HDF descargables con resoluciones de 15 m/píxel (Visible) a 90 m/píxel (TIR) y están disponibles como archivos kml de Google Earth (*JPL Science: ASTER Volcano Archive (AVA)*, s. f.).

5.4 Sensores Remotos Satelitales Especializados en la Detección del SO₂

Los sensores remotos satelitales que se especializan en la detección y monitoreo del SO₂ cuentan con bandas en el rango ultravioleta porque proporcionan una mejor sensibilidad y precisión para identificar y cuantificar el SO₂; dado que para medir el SO₂ presente el aire en la espectrometría ultravioleta, este domina el rango de 290 y 310 nm, aunque su espectro de absorción es de 240 a 390 nm (Geoffroy, 2014).

Además, existen sensores que durante la detección de cenizas volcánicas pueden detectar simultáneamente SO₂ volcánico en el infrarrojo térmico (TIR), aunque puede conducir a un error significativo en la recuperación de la columna de SO₂ (Corradini et al., 2009). El SO₂ tiene tres características principales de absorción en el rango espectral IR, alrededor de 4, 7.3 y 8.7 μm . La característica de absorción de 4 μm se encuentra en una ventana transparente, pero es muy débil y se ve afectada por la radiación solar dispersada durante el día. La firma de 7.3 μm es la más fuerte, pero debido a que se ve muy afectada por el vapor de agua atmosférico, generalmente se usa cuando las nubes volcánicas ascienden a la troposfera superior o estratosfera inferior. El canal de 8.7 μm se encuentra en una región relativamente transparente y generalmente se usa para recuperar la nube volcánica troposférica inferior, pero se ve afectado por la absorción de cenizas volcánicas y, en menor grado, por el vapor de agua (Corradini et al., 2010). Algunos sensores que realizan recuperaciones de SO₂ son: SEVIRI al igual que el MODIS aplica procedimientos de corrección de cenizas, el cual consisten en la estimación de cenizas y SO₂ utilizando un método de ajuste de mínimos cuadrados ponderado y los procedimientos de Diferencia de Temperatura de Brillo (BTD) (Corradini et al., 2009).

El sensor ABI también durante la detección de cenizas volcánicas ha detectado SO₂ en el rango de absorción de 7.3 y 8.3 μm , el canal de 7.3 μm es especialmente sensible al SO₂ de la troposfera/estratosfera superior (Pavolonis et al., 2019). Al igual el sensor AVHRR/3 cuenta con canales en la longitud de onda (10 y 12,5 μm), de acuerdo (Corradini et al., 2010) se ha realizado la detección de SO₂ en esta longitud de onda con el AVHRR de la primera generación.

Además, existen los sensores ASTER, AIRS e IASI que también operan en el TIR, para el sensor ASTER las moléculas de SO₂ en la pluma absorben la radiación IR emitida por la superficie terrestre y la atmósfera inferior en el rango de 8.1 a 9.5 μm , afectando principalmente la banda 11 y en menor medida las bandas 10 y 12 (Campion et al., 2010). En la recuperación de SO₂ el AIRS utiliza bandas en el rango de absorción de 7.3 μm (Corradini et al., 2010), en un primer paso se identifica los píxeles que contienen SO₂ y luego se usa un procedimiento de mínimos cuadrados para encontrar la cantidad de SO₂ en el píxel, el cual es un método propuesto (Prata & Bernardo, 2007). Finalmente, el IASI ha demostrado la capacidad para medir el SO₂ cerca de la superficie, para condiciones atmosféricas específicas a través del método que se basa en el cálculo de los índices de radiancia que representan la fuerza de los espectros SO₂ en la banda 3 de IASI (Bauduin et al., 2016).

En la Tabla 14 se relacionan las características de los sensores remotos satélites que detectan SO₂, Para AIRS e IASI, la resolución espacial para detección de SO₂ se refiere al diámetro de la huella circular del píxel.

Tabla 14. Sensores remotos satelitales y sus características para la detección de SO₂.

N	Sensor	Plataforma	Fecha de lanzamiento	Fecha provista fin de vida	Resolución temporal	Detección SO ₂			
						Canales / Bandas	Resolución espectral	Resolución espacial	Espectro UV
1	TROPOMI	Sentinel-5P	13-oct-17	Septiembre de 2027	1 día	UV2	300-320	7 x 7 km	✓
2	ABI	GOES-16 (R)	19-nov-16	1-ene-34	15 minutos disco completo	Banda TIR Banda TIR	7.34 μm 8.5 μm	2 km 2 km	X
3	VIIRS	Suomi NPP y NOAA20 (JPSS1)	28-oct-11	1-oct-26	1 día	Banda M14 Banda M15 Banda I5 Banda M16	8.5 μm 10.763 μm 11.450 μm 12.013 μm		X
4	OMPS	Suomi-NPP	28-oct-11	1-oct-26	1 día	Perfil nadir	250-310 nm	250 km	✓
5	GOME -2	MetOp-A retirada en a finales de 2021, MetOp-B y MetOp-C todavía en órbita	19-oct-06	31-dic-27	1 día	Canal 1 Canal 2	240 - 315 nm 311 - 403 nm	80 x 40 km	✓
6	IASI	Metop	19-oct-06	31-dic-27	2 veces al día	Banda 2	1210 - 2000 cm-1 con 0.5 cm-1 (resolución apodizada) 8.26 -5 μm	12.5 km	X
7	CALIOP	CALIPSO	28-abr-06	30-sep-23	16 días	Canal 1	532 nm		X

N	Sensor	Plataforma	Fecha de lanzamiento	Fecha provista fin de vida	Resolución temporal	Detección SO ₂			
						Canales / Bandas	Resolución espectral	Resolución espacial	Espectro UV
8	OMI	Aura	15-jul-04	30-sep-23	1 día	UV-2	306 - 380 nm 310 - 365 nm	13 x 24 km	✓
9	AIRS	Aqua	15-jul-04	30-sep-23	1 día	bandas con (7.3 μm)	7.3 μm	13.5 km	X
10	SEVIRI	Meteosat Segunda Generación (MSG)	28-ago-02	1-dic-33	15 minutos	Canal 9	(9.80 - 11.80 μm)	3 x 3 km	X
11	AVHRR/3	NOAA 15, 16 y 18 y Metop	13-may-98	1-oct-24	12 horas	Canal 4 Canal 5	10.30 - 11.30 μm 11.50 - 12.50 μm		X
12	MODIS	Terra y Aqua	18/12/1999 4/05/2002	30-sep-23	1 día	Banda 28 Banda 29 Banda 31 Banda 32	7.175 - 7.475 μm 8.400- 8.700 μm 10.770 - 10.280 μm 11.770 - 12.270 μm	1 x 1 km	X
13	ASTER	Terra	18-dic-99	1-oct-23	16 días todas las bandas y 5 días bandas VNIR	Banda 10 Banda 11 Banda 12 Banda 13 Banda 14	8.125 - 8.475 μm 8.475 - 8.825 μm 8.925 - 9.275 μm 10.25 - 10.95 μm 10.95 - 11.65 μm	90 x 90 m	X

(Adaptado de (*Sensors / Earthdata*, s. f.). (2022, octubre 27). Recuperado de <https://www.earthdata.nasa.gov/sensors>, (*Satellite Missions catalogue*, s. f.). (2023, julio 7). Recuperado de <https://www.eoportal.org/satellite-missions>, (Campion et al., 2010), (Corradini et al., 2009) y (Corradini et al., 2010)).

De acuerdo a la Tabla 14 los sensores remotos satelitales de órbita polar con canales y/o bandas en el rango ultravioleta de 240 a 390 nm que permiten la detección de SO₂ volcánico son TROPOMI, OMPS, GOME-2 y OMI, del cual TROPOMI es un sensor que presenta una resolución espacial mejorada en comparación con los sensores OMI, GOME-2, OMPS. Además, de acuerdo al estudio de (Theys et al., 2019) la capacidad de TROPOMI para detectar emisiones de desgasificación volcánica es mejor que la de cualquier otro sensor espacial, excepto ASTER principalmente por su mayor resolución espacial de 90×90 m², aunque ASTER no permite la cobertura diaria global como TROPOMI.

Por otro lado, las mediciones de SO₂ en el TIR generalmente se llevan a cabo utilizando cámaras infrarrojas térmicas (como ASTER y MODIS), pero con sensibilidad y precisión limitadas para el SO₂ troposférico inferior, por la interferencia con el vapor de agua o ceniza volcánica (u otros tipos de aerosoles), la falta de contraste térmico, la dependencia de la emisividad superficial variable y el bajo muestreo espectral. Pero el mejor límite de detección y selectividad de SO₂ se puede obtener de instrumentos TIR hiperespectrales, como IASI y AIRS, pero con tamaños de huella más grandes (Theys et al., 2019). El sensor ABI en el rango del infrarrojo térmico realiza la detección de SO₂ con la banda 7.34 μm y la banda 8.5 μm esta última permite la detección de nubes volcánicas con aerosoles de ácido sulfúrico, y proporcionan datos de disco completo (vista sinóptica de la Tierra, desde la órbita geoestacionaria que está en sincronía con la rotación de la Tierra) a una resolución espacial de 15 minutos (*GOES-R (Geostationary Operational Environmental Satellite-R)*, s. f.).

Por tanto, se decidió utilizar el sensor pasivo TROPOMI en el caso de estudio, ya que este sensor tiene la capacidad de detectar el SO₂ presente en el aire dentro del rango del espectro electromagnético donde el SO₂ domina la absorción.

5.5 Estaciones de monitoreo del SO₂ en volcanes en Colombia

El Servicio Geológico Colombiano lleva a cabo el monitoreo de volcanes a través de sus Observatorios Vulcanológico y Sismológico (OVS). Actualmente tienen una instrumentación multiparamétrica utilizada para monitoreo e investigación, que integra disciplinas como la geofísica, geoquímica, geodesia y vulcanología. Para monitorear la deformación en superficie se utilizan instrumentos de detección de deformación del suelo, incluyendo el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y los inclinómetros electrónicos. En el monitoreo geoquímico, se utilizan instrumentos de telemetría para la medición de SO₂

volcánico, CO₂, radón y temperatura. La medición de los datos de SO₂ se realiza con los instrumentos NOVAC ScanDOAS. Finalmente, el monitoreo electromagnético (EM) se realiza mediante una red de sensores de campo eléctrico y magnético. (Gómez et al., 2021). Estas estaciones están equipadas con un sistema de espectroscopia de absorción ultravioleta (UV) que opera mediante absorción óptica diferencial. Este sistema está específicamente diseñado para medir las emisiones de gas SO₂, transformando la luz ultravioleta detectada en señales digitales. Estas señales constituyen el espectro utilizado para evaluar la presencia del dióxido de azufre. (Servicio Geológico Colombiano [SGC], 2017).

La estimación del flujo diario del SO₂ emitido por el Volcán Nevado del Ruiz es registrada con la ayuda de las estaciones telemétricas ScanDOAS y calculada utilizando la información de la velocidad y dirección del viento proporcionada por estaciones meteorológicas, anemómetros y el modelo de pronóstico del tiempo WRF (Weather Research and Forecasting) del IDEAM (Duque & Vélez, 2023).

5.6 Plataformas de monitoreo del dióxido de azufre

Existen plataformas que proporcionan información del monitoreo del dióxido de azufre (SO₂) volcánico a nivel global, abordando las emisiones tanto de fuentes naturales como antropogénicas, con un enfoque particular en actividades volcánicas y procesos industriales. A continuación, se destacan algunas de las plataformas más relevantes:

Monitoreo Global de SO₂ de la NASA. es una página web que muestra un catálogo de las fuentes críticas naturales y antrópicas de emisión de dióxido de azufre (SO₂). Las mediciones de SO₂ obtenidas de los espectrómetros satelitales OMI, OMPS y TROPOMI se utilizaron para actualizar y ampliar el catálogo global previamente desarrollado de grandes fuentes de emisiones de SO₂. Esta versión 2 del catálogo global abarca desde el año 2005 e incluye un total de 759 fuentes puntuales de emisión, las cuales han sido identificadas y agrupadas por país y origen principal de la fuente: volcanes (106 fuentes), plantas de energía (477), fundiciones (74) y fuentes relacionadas con la industria del petróleo y gas (102) (V. E. Fioletov et al., 2022).

Programa Global de Vulcanismo (GVP, por sus siglas en inglés). es el centro de una red internacional para monitorear, informar y mantener datos relacionados con la actividad volcánica en todo el mundo del Instituto Smithsonian (IS). El GVP desempeña un papel de

liderazgo en la información global sobre volcanes: rastrea los eventos a medida que ocurren. La gran y creciente base de datos contiene las características geográficas, históricas y vulcanológicas de casi 3.000 volcanes activos de todo el mundo. Los informes mensuales sobre la actividad eruptiva en curso se publican en el Boletín de la Red Global de Vulcanismo. El GVP trabaja en estrecha colaboración con científicos y organizaciones ajenos a la IS que se preocupan por los peligros de los volcanes, la seguridad de las aerolíneas, la energía geotérmica y el cambio climático global (*Programs / Smithsonian National Museum of Natural History*, s. f.).

5.7 Casos de Estudio Sobre Detección de Emisiones de SO₂ Volcánico

En Colombia las primeras mediciones de gases volcánicos iniciaron en 1985 utilizando sensores remotos ópticos terrestres, durante la reactivación del volcán Nevado del Ruiz. Estos sensores remotos denominado COSPEC o Espectrómetro de Correlación, se utilizaron desde 1985 hasta 1997 en la medición del SO₂ desde plataformas terrestres alrededor de algunos volcanes colombianos (Garzón et al., 2008).

En la actualidad existen nuevas tecnologías en sensores remotos satelitales con aplicación en observaciones de calidad del aire, los cuales proporcionan datos para monitoreo de gases volcánicos. Se han llevado a cabo varios estudios donde se comparan los productos obtenidos entre sensores remotos satelitales. Además, otros investigadores han validado sus mediciones contrastándolas con datos recopilados de estaciones de tierra. A continuación, se mencionan algunos de estos estudios:

En 2009 la revista Nat Hazart publicó el artículo que realizó Carn et al, sobre monografía de estudios de detección y seguimiento de nubes de dióxido de azufre (SO₂) volcánicas a partir de sensores satélites de la constelación A-Train (que consta de varios satélites en órbita polar que vuelan en formación cerrada), donde se evidencia la alta sensibilidad de OMI para proporcionar información de emisiones SO₂ volcánico con una cobertura global contigua y una mejor resolución terrestre que los sensores GOME y el Espectrómetro de Imagen de Escaneo de Absorción para Cartografía Atmosférica (SCIAMACHY, por sus siglas en inglés). Además, la observación rápida por múltiples conjuntos de instrumentos A-Train permite la medición de la altitud del aerosol volcánico y la comparación de las recuperaciones de satélites como los datos del sensor AIRS y OMI que se pueden utilizar para revelar altitud de la nube SO₂ (Carn et al., 2009).

En Islandia, para la erupción de lava del volcán Bárðarbunga-Veiðivötn de 2014-2015 en Holuhraun se calculó la carga de masa de SO₂ promedio diario para el mes de septiembre de 2014 usando recuperaciones de Densidad de Columna Vertical (VCD) de SO₂ de los sensores OMI y IASI (Schmidt et al., 2015).

En 2018, Jiménez-Escalona et al, realizó la comparación de estimación del flujo de emisión de SO₂ derivadas del sensor COSPEC (Espectrómetro de Correlación) y el Espectroradiómetro de Imágenes de Media Resolución (MODIS, por sus siglas en inglés) para el Volcán Popocatepetl (México), donde describe que la detección del SO₂ es mucho más eficiente al utilizar métodos de percepción remota que otros gases volcánicos más abundantes en la pluma como el agua (H₂O) o el dióxido de carbono (CO₂), por las bajas concentraciones de fondo del SO₂ y sus firmas espectrales distintivas tanto en la región del Ultravioleta (UV) como en la región del Infrarrojo Térmico (TIR), para la estimación del flujo de SO₂ con MODIS se procesaron las imágenes en el programa MAP_SO₂ para recuperar la masa total de SO₂ y el área de la pluma volcánica dado que este software detecta la cantidad de radiancia que es absorbida por el SO₂ presente en la atmósfera en una longitud de onda de ~8.6 μm, como resultado del estudio se detectó una tendencia similar entre los datos del flujo de SO₂ obtenido de las imágenes MODIS y las mediciones de COSPEC (Jiménez-Escalona et al., 2018)

En 2019, Pavolonis et al, realizó una descripción de las aplicaciones cualitativas y cuantitativas de las mediciones del Generador de Imágenes de Línea de Base Avanzada (ABI, por sus siglas en inglés) a bordo de los GOES-R para el monitoreo de nubes volcánicas, y refiere que la detección remota cuantitativa del SO₂ en el canal de 7.3 μm de la banda 10 del ABI es el más adecuado porque es especialmente sensible al SO₂ troposférico/estratosférico, de acuerdo a la variabilidad espectral de la transmitancia de una atmósfera tropical con una nube de cenizas volcánicas (Pavolonis et al., 2019).

En 2019, Theys et al., realizó la comparación de detección de emisiones de SO₂ volcánico de los sensores TROPOMI y OMI a partir de los resultados de los datos de mediciones de radiancia retrodispersada para obtener las densidades de columna vertical de SO₂, para el período de medición de noviembre de 2017 a julio de 2018, en el cual se encontró que 58 volcanes desgasificadores fueron detectados sin ambigüedad en las mediciones de TROPOMI, siendo en un factor de 4 mejor las mediciones de TROPOMI, dado que con la resolución espacial gruesa de OMI la pluma del SO₂ cubre solo una fracción del píxel, lo que resulta en una reducción del VCD medido y esto es especialmente importante cerca de la fuente

donde el tamaño horizontal de la pluma puede ser pequeña, por tanto los datos de TROPOMI cerca a la fuente volcánica son más representativos que los datos OMI. Además, describe que las mediciones UV de SO₂ utilizan bandas de absorción en el rango de longitud de onda alrededor de 310-340 nm y tienen buena sensibilidad a la troposfera inferior y las mediciones TIR de SO₂ generalmente exploran bandas de absorción en 7.3µm o 8.6µm. Finalmente, comparó la capacidad de TROPOMI de detectar penachos de desgasificación pasiva SO₂ con otros sensores existentes (y pasados) para una detección de columna vertical para una pluma troposférica a 3 km de altura, donde resalto el aumento las mediciones de SO₂ de alta resolución espacial que se llevan a cabo utilizando cámaras infrarrojas térmicas (como ASTER y MODIS), pero con sensibilidad y precisión limitadas para el SO₂ troposférico; el mejor límite de detección y selectividad a SO₂ se puede obtener de instrumentos TIR hiperspectrales, como IASI y AIRS, pero con tamaños de huella más grandes. Pero, en la detección del VCD de SO₂ a una unidad de área de 1 km², la capacidad de TROPOMI para detectar emisiones de desgasificación volcánica es mejor que la de cualquier otro sensor espacial excepto ASTER, pero se debe principalmente a su mayor resolución espacial de 90×90 m² (Theys et al., 2019).

En Colombia para la ciudad de Bogotá se realizó un estudio de los productos (NO₂, O₃, CO y SO₂) del sensor TROPOMI a bordo de Sentinel 5P con respecto a los productos de las estaciones terrestres de calidad del aire de la ciudad, donde se observara la dinámica de la concentración de contaminación sobre tropósfera evidenciando los cambios espacio temporales de las distribuciones de NO₂, O₃, CO y SO₂ sobre la ciudad de Bogotá en la secuencia temporal del 17 de agosto del año 2018 al 17 de agosto del año 2019, a partir de la caracterización de la información de distribución y concentración de gases traza, mediante la densidad de columna vertical, como resultado de esta comparación se concluye que el producto troposférico de NO₂, O₃, CO y SO₂ de las bandas de TROPOMI muestra similitudes en las tendencias de las mediciones de CO y NO₂ con respecto a las mediciones terrestres, pero las concentraciones de O₃ y SO₂ mostraron dinámicas diferentes en la tropósfera respecto a los datos terrestres, para SO₂ las concentraciones en la tropósfera son sumamente menores que las concentraciones sobre la superficie (Forero, 2019).

5.8 Tendencias en el Monitoreo de Gases Trazas

En la actualidad los sensores remotos satelitales se caracterizan por tener un campo específico de monitoreo, la tendencia para detección de los gases trazas en la atmósfera terrestre

es el uso de la técnica Espectrometría de Absorción Óptica Diferencial (DOAS, por sus siglas en inglés). Algunos sensores tienen un alcance regional que permite la generación de información en minutos o horas, estos sensores viajan en plataformas espaciales de una mayor vida útil que brinda la oportunidad de ser utilizada para futuros instrumentos, como lo es:

Emisiones Troposféricas: Monitoreo de la Contaminación (TEMPO, por sus siglas en inglés): es un sensor lanzado el 7 de abril de 2023 y representa uno de los últimos avances en el monitoreo de la calidad del aire y sus impactos en la salud humana y el medio ambiente, este satélite geostacionario está diseñado para medir la concentración de varios contaminantes atmosféricos, incluyendo dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃), formaldehído (HCHO) y dióxido de azufre (SO₂). El objetivo de la misión es monitorear los principales contaminantes del aire desde la órbita geostacionaria, cubriendo todo el continente norteamericano cada hora durante el día. (*TEMPO (Tropospheric Emissions: Monitoring of Pollution)*, s. f.).

TEMPO utilizará el Portal de Información de Detección Remota (RSIG, por sus siglas en inglés) de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) para realizar subconjuntos, visualización y distribución de datos (*TEMPO Data*, s. f.). El sensor TEMPO es una herramienta de monitoreo continuo y comprensión de la calidad del aire, ya que proporciona información sin precedentes sobre la química atmosférica y la dinámica de la contaminación. Este sensor observará fuentes de emisión de pequeña escala que no hayan sido resueltas adecuadamente por misiones satelitales actuales, y tendrá la capacidad para cuantificar las emisiones suburbanas y los gradientes de contaminantes (Naeger, 2023). Las primeras imágenes de TEMPO, recopiladas cada hora durante un período de seis horas el 2 de agosto, ofrecen una vista previa de la capacidad de TEMPO para rastrear el dióxido de nitrógeno cada hora en áreas geográficas tan pequeñas como cuatro millas cuadradas lo que equivale a 10.36 km² (*TEMPO Instrument Captures Its First Images of Air Pollution Over Greater North America | Center for Astrophysics | Harvard & Smithsonian*, s. f.)

6 Área de Estudio

6.1.1 Volcán Nevado del Ruiz (VNR)

El Volcán Nevado del Ruiz en adelante (VNR) es un estratovolcán activo que se localiza a 4°53' 43" Latitud Norte y 75°19' 21" Longitud Oeste, sobre el eje de la cordillera Central entre los límites de los departamentos Caldas y Tolima, con jurisdicción entre los municipios Villamaría y Murillo. El Nevado del Ruiz tiene una altura de 5.321 metros sobre el nivel del mar (msnm), posee una forma alargada en dirección NE - SW, algo achatado y con un diámetro mayor en su base de 15 km de longitud, con un cráter activo de 870 x 830 m de diámetro y profundidad de 247 m (cráter Arenas). Además, posee dos conos parásitos, La Olleta al Oeste y La Piraña al Este (Servicio Geológico Colombiano [SGC], s. f.).

El área de estudio es aproximadamente 17.645,50 ha (176.454.946,82 m²), la cual está delimitada por las coordenadas de la Tabla 15. Dicha área se limitó a una ubicación específica cerca del volcán, porque se pueden realizar observaciones de diferentes concentraciones de SO₂ en las áreas afectadas por las emisiones volcánicas. Además, esta área de estudio abarca la mayoría de las estaciones de la red de monitoreo geoquímica del VNR.

Tabla 15. Coordenadas del Área de estudio del VNR.

Coordenadas WGS 84	
Latitud	Longitud
4° 56' 19.2" N	75° 21' 3.6" O
4° 53' 45.6" N	75° 21' 25.2" O
4° 57' 21.6" N	75° 21' 57.6" O
4° 51' 32.4" N	75° 19' 30" O

6.2 Eventos Importantes del Área de Estudio

El VNR ha experimentado eventos significativos, incluyendo el aumento de sismicidad, emisiones de cenizas y SO₂, lahares de lodos provocados por explosiones, entre otros. En 1985 presentó la erupción freatomagmática con flujos de lodo y durante la década de los 90 el VNR se mantuvo activo, y según los informes de seguimiento del Servicio Geológico Colombiano (SGC), el volcán continúa emitiendo gases a la atmósfera en la actualidad (SGC, 2023). En la Tabla 16 se describen algunos de estos eventos importantes de los boletines del Programa

Global de Vulcanismo (Instituto Smithsonian [IS], s. f.) y del boletín extraordinario del SGC de marzo de 2023 (Ministerio de Minas y Energía, 2023).

Tabla 16. Eventos importantes de la actividad del VNR

Año	Algunos eventos importantes del VNR
1985	Desde mayo se presentó un incremento de la sismicidad, actividad fumarólica anormal, emisión de cenizas, lahares provocados por explosiones y enjambres sísmicos
1989	Incremento de energía sísmica, fuerte emisión de SO ₂ , erupción freatomagmática, flujo de lodo
1994	Se reactivó la actividad sísmica, por enjambres de terremotos en marzo y abril ponen fin a dos años de baja actividad
2002	El mayor enjambre de terremotos desde 1985 ocurre en junio de 2002
2012 - 2023	Actividad recurrente, emisiones esporádicas de ceniza, gases, vapor y altas liberaciones de SO ₂ , crecimiento de los domos de lava dentro del cráter Arenas
2023	Marzo cambio de nivel amarillo a naranja por posible erupción, porque se ha presentado incremento de la actividad sísmica asociada a fracturamiento de roca dentro del edificio volcánico, incremento paulatino en la energía sísmica liberada y en las anomalías térmicas.

6.3 Red Monitoreo Geoquímica

El VNR cuenta con una red geoquímica y es monitoreado desde el observatorio vulcanológico y sismológico de Manizales. El monitoreo del área de Geoquímica en el VNR permite estimar las descargas de SO₂ usando las estaciones Telemétricas ScanDOAS Alfombrales, Olleta, El Camión y Recio 3 (SGC, 2017). De acuerdo a la información suministrada el 13 de julio de 2023 por el SGC, en la Tabla 17 se describen la altura sobre el nivel del mar, tiempo de medición y las coordenadas de las estaciones ScanDOAS y en la Figura 6 se ilustra la ubicación de las estaciones ScanDOAS y el área de estudio que abarca gran parte de los departamentos del Tolima y Caldas.

Tabla 17. Coordenadas de las estaciones telemétricas ScanDOAS del VNR.

Estaciones ScanDOAS	Altura (msnm)	Tiempo medición	Intervalos medición	Coordenadas WGS 84	
				Latitud	Longitud
Alfombrales	4492	06:00 hasta 18:00	10 a 20 minutos	4° 56' 19.2" N	75° 21' 3.6" O
Olleta	4680	06:00 hasta 18:00	10 a 20 minutos	4° 53' 45.6" N	75° 21' 25.2" O
El Camión	4187	06:00 hasta 18:00	10 a 20 minutos	4° 57' 21.6" N	75° 21' 57.6" O
Recio 3	4670	06:00 hasta 18:00	10 a 20 minutos	4° 51' 32.4" N	75° 19' 30.0" O

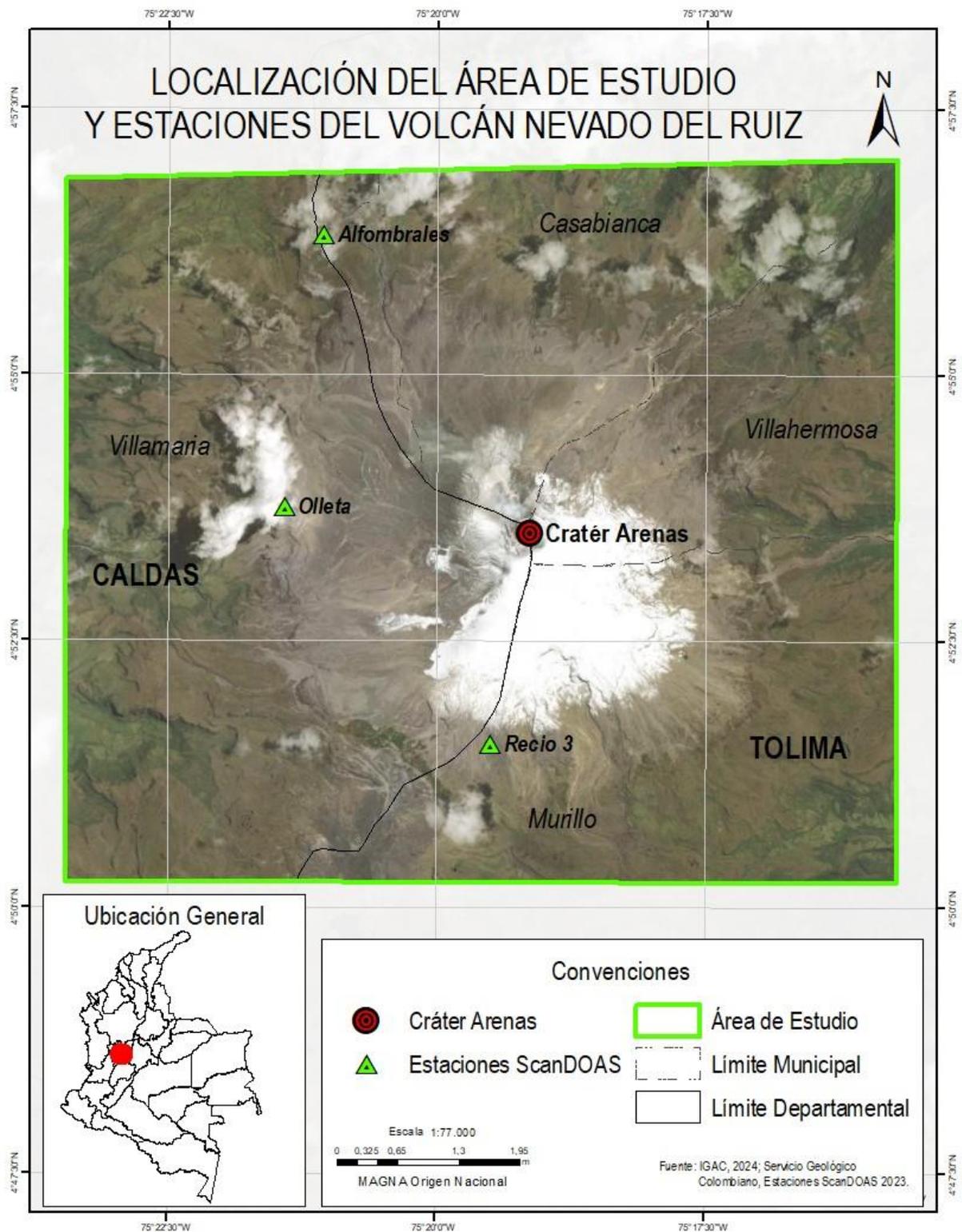


Figura 6. Localización del área de estudio y las estaciones telemétricas ScanDOAS del VNR. (Adaptado del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2023))

6.4 Comportamiento de las Precipitaciones en Colombia

De acuerdo con los datos de precipitaciones para el periodo desde el 2012 hasta 2021 del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) los años 2014, 2015, 2019 y 2020 presentaron precipitaciones menores en comparación con los demás años. Basándonos en lo expuesto, se optó por el año 2020 como el período de estudio, ya que en este lapso de tiempo el sensor TROPOMI ya contaba con datos disponibles, además en este año se presentaron emisiones periódicas de SO₂. En la Figura 7. se muestra los datos de precipitación acumulada anual (mm) para los años 2012 hasta 2021.

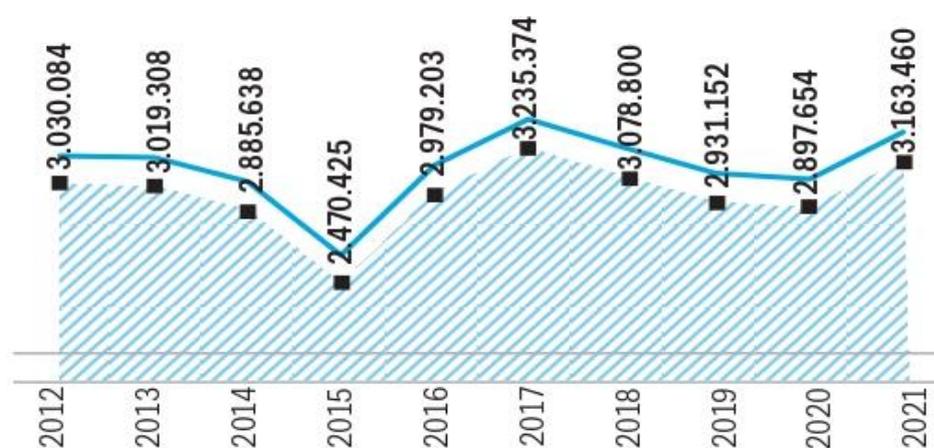


Figura 7. Comportamiento de las precipitaciones para los años 2012 al 2021. (Adaptado de (El Tiempo [ET], s. f.). (2023, julio 10). Recuperado de <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/lluvias-asi-han-aumentado-en-una-decada-las-precipitaciones-en-el-pais-682537>).

7 Metodología

La metodología desarrollada en este trabajo parte de realizar una investigación de los sensores remotos satelitales disponibles y que proporcionen información de gases volcánicos. Posteriormente se seleccionó el sensor con mejores características disponible para el área de estudio. En la segunda fase, se realizó una búsqueda de los datos del sensor remoto satelital seleccionado (TROPOMI) por medio de la plataforma de Google Earth Engine (GEE) para el periodo de estudio comprendido entre 1 de enero al 31 de diciembre 2020, ya que en este lapso de tiempo el sensor ya contaba con datos disponibles. En la tercera fase, se solicitan al Servicio Geológico Colombiano (SGC) los datos de detección de SO₂ de las estaciones ScanDOAS que conforman la red de monitoreo geoquímica del Volcán Nevado del Ruiz (VNR) para obtener la concentración de SO₂, aun que solo se tendrán en cuenta las estaciones dentro del área de estudio, y los datos de velocidad y dirección del viento al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) para el periodo de estudio. En la cuarta fase mediante el software Google Earth Engine (GEE) y por medio de un script del conjunto de datos de dióxido de azufre COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_SO2 (TROPOMI) se hace la extracción de los datos de concentración de SO₂ a partir de la Densidad de Columna Vertical (VCD). En la quinta fase se realiza una conversión de unidades de los datos de los sensores satelitales, para tener una uniformidad de unidades con los datos calculados a partir de las estaciones ScanDOAS. Finalmente, se realizó una comparación y evaluación de los resultados obtenidos.

A continuación, se presenta en la Figura 8 los pasos generales del esquema metodológico que se llevó a cabo en este trabajo.

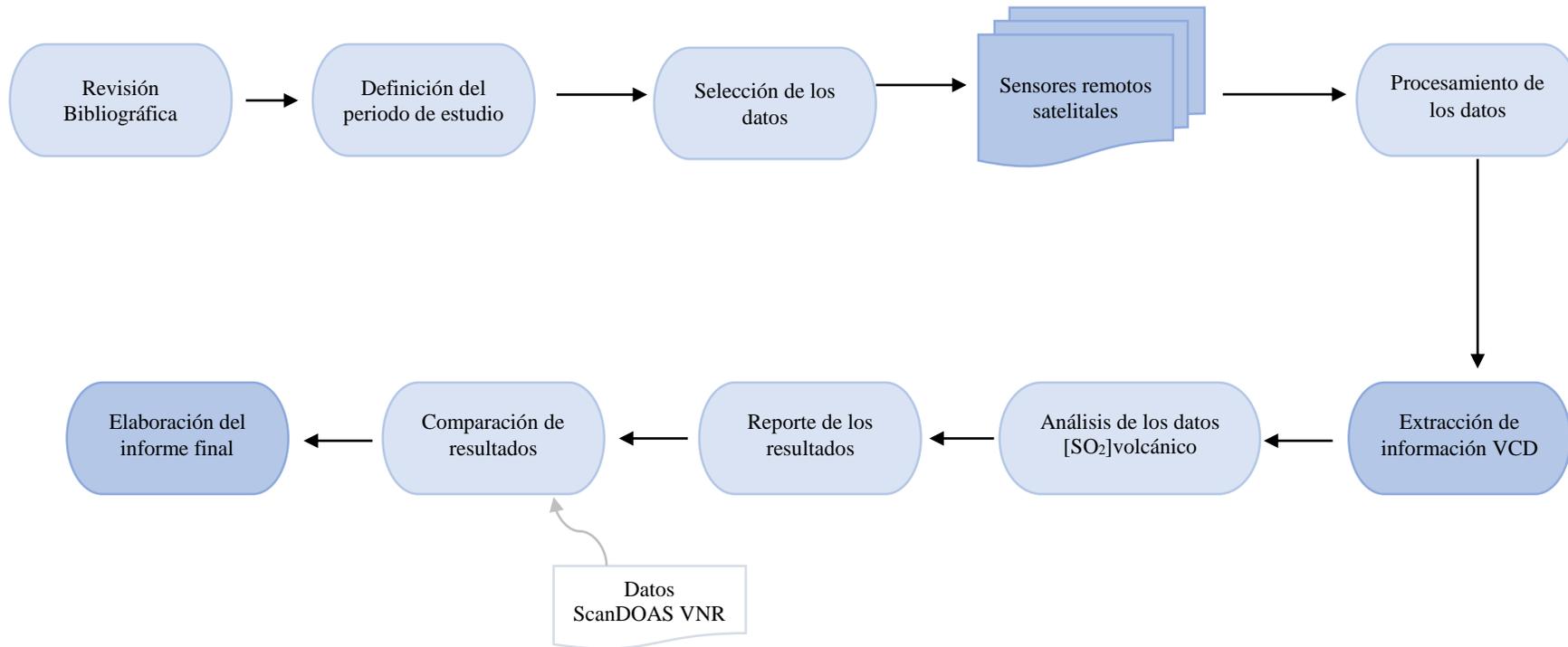


Figura 8. Metodología general.

7.1 Revisión Bibliográfica

Se realizó una revisión bibliográfica en temas sobre sensores satelitales que miden las emisiones volcánicas, métodos de monitoreo de los gases y aerosoles, detección de SO₂ volcánico, para realizar una caracterización de los sensores existentes y su pertinencia para el estudio de emisiones de SO₂ volcánico en el caso del Volcán Nevado del Ruiz. Este estudio se desarrolló a partir de las consultas de diversas fuentes bibliográficas como artículos de revistas indexadas, informes de entidades gubernamentales, trabajos de grado y demás documentos científicos. Además de los cursos de entrenamiento ofrecidos por las agencias espaciales encargadas de recoger datos de Observación de la Tierra, NASA ARSET: Applied Remote Sensing Training Program. Los resultados son los presentados en el capítulo 5.

7.2 Identificación y Priorización del Periodo de Estudio

Se realizó una revisión de la información de eventos históricos disponible en los boletines extraordinarios, semanales y mensuales de actividad volcánica del SGC para poder seleccionar el mejor periodo de estudio, enfocándose en aquellos periodos donde se hayan presentado emisiones de SO₂ periódicas durante la actividad volcánica del Volcán Nevado del Ruiz; se priorizará un periodo donde haya disponibilidad de datos del sensor más apto para la zona de estudio y un periodo de bajas precipitaciones para reducir la presencia de nubosidad.

Basándonos en lo anterior, la precipitación fue un criterio esencial tomado del análisis de datos proporcionados por el IDEAM para el período comprendido entre 2012 y 2021. La observación detallada de estos datos reveló que los años 2014, 2015, 2019 y 2020 se caracterizaron por tener precipitaciones menores en comparación con los demás años. Esta información fue importante, dado que, en los años de altas precipitaciones, la presencia de nubosidad en el área de estudio se incrementa, lo cual puede afectar la observación del sensor satelital. Considerando el análisis realizado, se optó por seleccionar el año 2020 como periodo de estudio. Esta elección se sustentó en dos consideraciones fundamentales: en primer lugar, durante dicho lapso, el sensor TROPOMI ya contaba con datos disponibles, facilitando la recopilación de información relevante para el análisis. En segundo lugar, se identificó que en el año 2020 se presentaron emisiones periódicas de SO₂, proporcionando un contexto propicio para evaluar la capacidad del sensor en detectar y medir las concentraciones de SO₂ volcánico.

Adicional, en el año 2020 las actividades antrópicas estuvieron paralizadas por los confinamientos masivos provocados por la pandemia del COVID-19.

7.3 Selección de los Datos

7.3.1 Datos de los Sensores Remotos Satelitales TROPOMI

Se consultaron la disponibilidad de los datos en la plataforma Google Earth Engine, ya que por cuestiones de espacio de almacenamiento se trabajó directamente con conjuntos de datos disponibles en la nube. Se seleccionó el conjunto de datos “COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_SO2”: dióxido de azufre casi en tiempo real SO₂ y la banda “SO2_column_number_density” porque este conjunto de datos proporciona imágenes de alta resolución casi en tiempo real de las concentraciones de dióxido de azufre (SO₂) en unidades de concentración mol/m² (*Sentinel-5P OFFL SO2: Offline Sulfur Dioxide | Earth Engine Data Catalog | Google for Developers, s. f.*).

7.3.2 Datos de las Estaciones ScanDOAS del Volcán Nevado del Ruiz

En cuanto a los datos de las estaciones ScanDOAS de la red monitoreo geoquímica del VNR, el 22 de junio de 2023 del SGC suministró la información de flujo máximo de SO₂ de las estaciones ScanDOAS: Alfombrales, Olleta, El Camión y Recio 3 y la altura de la columna de gases máximo y promedio para el periodo de estudio (Ver Anexo 1). Además, el 13 de julio de 2023 el SGC suministró información complementaria de las estaciones ScanDOAS como la altura sobre el nivel del mar, tiempo de medición y las coordenadas descritas en la Tabla 17.

7.4 Procesamiento de los Datos

El procesamiento de los datos se realizó en la plataforma Google Earth Engine Code Editor mediante la programación en el lenguaje JavaScripts y los mapas de proyección de resultados se realizaron en el software ArcGIS. En la plataforma GEE Code Editor por medio de un script se obtuvo datos diarios de la concentración de las moléculas de SO₂ presentes en una columna vertical de la atmósfera terrestre a partir de la banda “SO2_column_number_density” de la colección de imágenes “COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_SO2”. Se desarrolló un script para el área de estudio y un script para cada una de las estaciones de monitoreo geoquímico (ScanDOAS) del VNR que

están localizadas en el área de estudio, incorporando las coordenadas geográficas (latitud y longitud) de cada estación, y la serie de tiempo del 1 de enero al 31 de diciembre de 2020, los scrip desarrollados se pueden ver en el Anexo 3. Esta información de concentración diaria se exporto mediante una tabla de extensión (.cvs) y solo para el script del área de estudio se exportó un GeoTIFF para construir mapas en ArcGIS y visualizar la dispersión del SO₂ volcánico, los mapas se pueden ver en el Anexo 4. Los datos de concentración de SO₂ obtenidos en unidades de mol/m² se transformaron a unidades de concentración mg/m³ a partir de la masa molar del SO₂ que es de 64.064 g/mol y la altura promedio de la tropósfera sobre la zona del Ecuador respecto a la altitud de las estaciones ScanDOAS de monitoreo del VNR que están dentro del área de estudio.

La información de SO₂ de las estaciones de ScanDOAS del VNR suministrada por el SGC, corresponde a flujos máximos diarios de SO₂ en (ton/día) y altura de la columna de los gases promedio y máximo en metros, vale resaltar que entre los datos suministrados hay datos nulos, los cuales fueron removidos. Los datos de flujo se transforman a unidades mg/m³, que son unidades habituales para expresar las concentraciones de los contaminantes del aire, dicha transformación se lleva a cabo aplicando la siguiente ecuación deducida a partir de la ecuación referenciada en la resolución de emisiones de fuentes fijas (Resolución 909, 2008)

$$Ccr = \frac{Fc}{Qcr} * 1000000$$

donde: FC: Flujo del Contaminante en kg/h; Ccr: Concentracion del contaminante en condiciones de referencia (25°C, 760 mm Hg) en mg/m³; y Qcr: Caudal del flujo contaminante en condiciones de referencia (25°C, 760 mm Hg) en m³/h.

Para obtener el caudal, se calculó la densidad con una ecuación deducida a partir de la ecuación de los gases ideales, para ello se empleó la presión calculada a partir de los datos de altura para la ubicación de cada estación ScanDOAS y la temperatura atmosférica aplicando el valor promedio en que baja la temperatura en la troposfera a medida que aumenta la altura y el valor de referencia la temperatura y altitud de la ciudad de Manizales; el resultado de la densidad se empleó para calcular el área de la sección transversal a través de la cual fluye el gas aplicando la ecuación de la Ley de Continuidad. Finalmente, se obtuvo el volumen de SO₂ volcánico el cual permitió encontrar el caudal, estas ecuaciones se aprecian a continuación:

$$\text{Caudal de gas SO}_2 \quad Q_{cr} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Tiempo de muestreo}}$$

$$\text{Volumen gas SO}_2 \quad \text{Volumen} = \text{Area}_{st} * \text{Altura columna de gases}$$

Área de la sección transversal a través de la cual fluye el gas (Area_{st}): para calcular el área de la sección transversal a través de la cual fluye el gas se aplicó la ecuación de flujo másico (Mory, 2018).

$$\text{Flujo másico} = \text{Densidad SO}_2 * \text{velocidad del viento} * \text{Area}_{st}$$

$$\text{Area}_{st} = \frac{\text{Flujo másico}}{\text{Densidad SO}_2 * \text{velocidad del viento}}$$

Velocidad del viento: esta información fue suministrada el 11 de julio de 2023 a través de correo electrónico por el IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Los datos de velocidad corresponden a datos de intervalos de 10 minutos, expresado en m/s, los datos fueron obtenidos de la estación Las Brisas ubicada a una latitud de 4°51'4.3" y longitud 75°21'1.4" en el municipio Villamaría a una altitud de 4133 msnm. (Anexo 2).

Densidad de gas SO₂: para calcular la densidad del gas se aplica la ecuación deducida a partir de la ecuación de gases ideales (Martínez & Amado, 2016)

Ecuación de los gases ideales es la siguiente:

$$P * V = n * R * T$$

donde: P: Presión; V: Volumen; n: moles; R: Constante del gas y T: Temperatura

La masa (m) es igual al peso molecular (PM) multiplicado por el número de moles (n), es decir:

$$m = \text{PM} * n \quad \text{utilizamos} \quad n = \frac{m}{\text{PM}}$$

y la densidad (ρ) es la masa dividida entre el volumen:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{utilizamos} \quad V = \frac{m}{\rho}$$

se obtiene

$$P * \frac{m}{\rho} = \frac{m}{\text{PM}} * R * T$$

Al cancelar en ambos lados se obtiene,

$$\rho = \frac{P * PM}{R * T_{atm}} = \frac{P * PM_{SO_2}}{(R_{SO_2} * PM_{SO_2}) * T_{atm}}$$

donde: Patm: Presión atmosférica; R: Constante de SO₂; T_{atm}: Temperatura atmosférica; y PM: Peso molecular SO₂

Temperatura de gas SO₂ en la atmosfera

$$T_{atm} = T_{ref} - (6.5 * H)$$

donde: T_{ref}: Temperatura de referencia; H: Diferencia de altitud entre el punto de referencia y el punto de muestreo.

Las temperaturas en la tropósfera caen en promedio de 6.5 grados celsius (°C) por kilómetro (Martínez, 2007). Los datos de temperatura de referencia corresponden a las temperaturas diarias de Manizales del año 2020 obtenido del (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], s. f.).

7.5 Comparación de los Resultados

Se realizó una comparación y evaluación de los resultados obtenidos, para analizar la sensibilidad del sensor aplicado al caso de estudio. Para este fin, se generó una gráfica de distribución de las concentraciones SO₂ obtenidos del sensor con respecto a los valores medidos de las estaciones del VNR verificando que tengan un comportamiento similar. Además, se creó un diagrama de dispersión para mostrar la relación que existe entre los resultados de concentraciones obtenidos del sensor con respecto a los valores transformados a concentración de las estaciones del VNR.

8 Resultados y Discusión de Resultados

8.1 Datos del TROPOMI

Los datos obtenidos del sensor TROPOMI corresponden a datos del nivel 3 que se han validado y procesado, dichos datos obtenidos para el periodo de estudio están a partir del mes de enero hasta el mes de julio del 2020. El número total de datos obtenidos para cada mes se muestran en la Tabla 18. y los valores de concentración SO₂ se muestran en el numeral 8.3.

Tabla 18. Número total de datos de TROPOMI obtenidos por mes.

Estación ScanDOAS	Mes 2020											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Alfombrales	12	4	3	3	10	7	2	0	0	0	0	0
Olleta	11	4	2	3	10	7	1	0	0	0	0	0
Recio 3	11	6	4	3	8	4	3	0	0	1	0	0

La distribución de la concentración de SO₂ para el área de estudio definida para el Volcán Nevado del Ruiz se evidencia en la Figura 9 a la Figura 11 y se obtuvo en GEE, donde se observó la dinámica de la concentración de SO₂ volcánico sobre troposfera para esta área de estudio. El comportamiento de la concentración de SO₂ del mes de enero se puede visualizar en la Figura 9 y la Figura 10. Estas figuras muestran las concentraciones obtenidas para el área de estudio durante la semana del 3 al 7 de enero y para todo el mes de enero, respectivamente. Se observa que la pluma del volcán se desplaza hacia el oeste, dado que los valores de concentración más altos, resaltados en color rojo, se encuentran principalmente en esta zona, cubriendo principalmente el municipio de Villamaría. Por otro lado, los valores menores de concentración de SO₂ se encuentran en la zona sureste, abarcando los municipios de Murillo y Villahermosa. Los mapas correspondientes a los demás meses están disponibles en el Anexo 4.

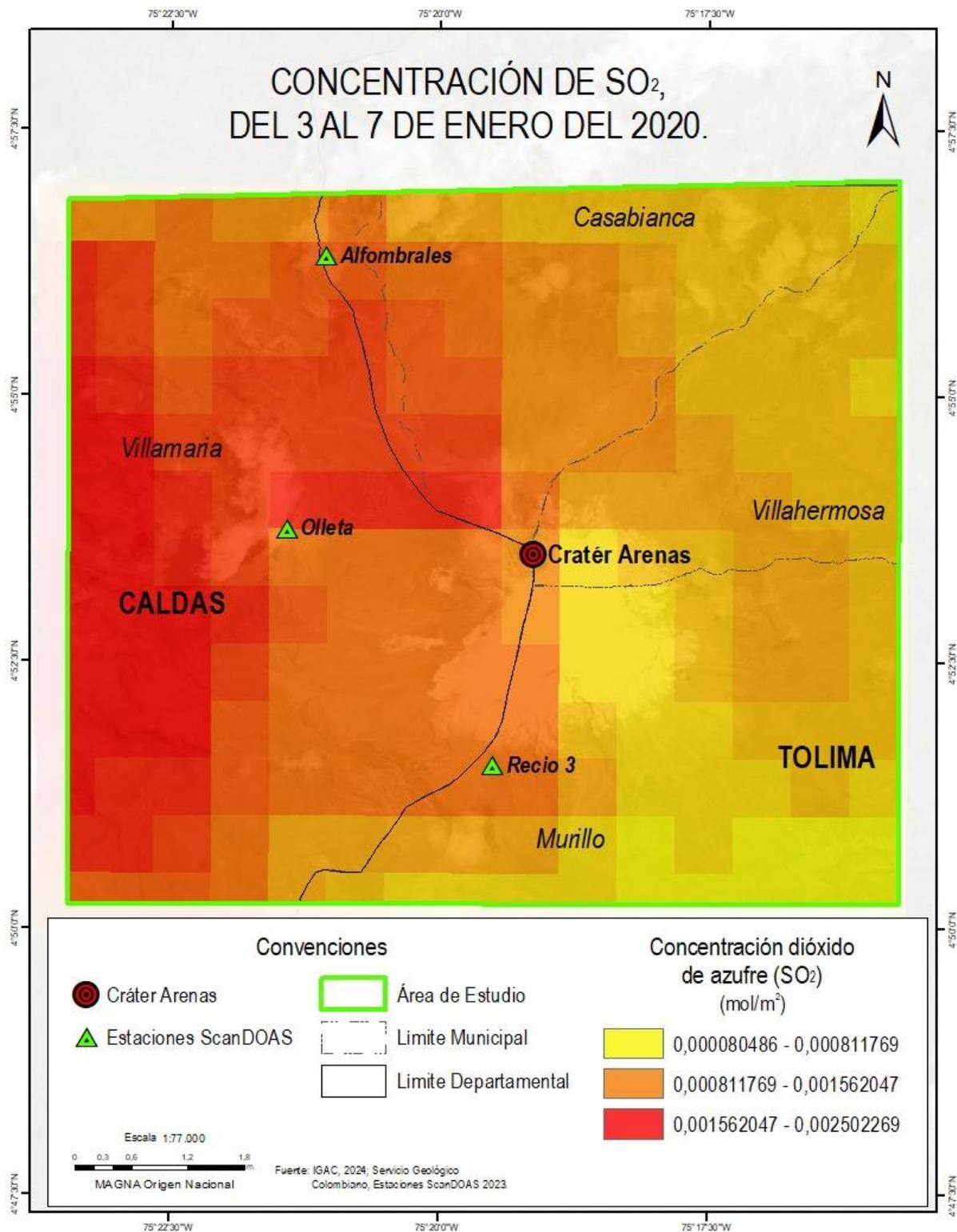


Figura 9. Mapa de Concentración de SO₂ del 3 al 7 de enero de 2020.

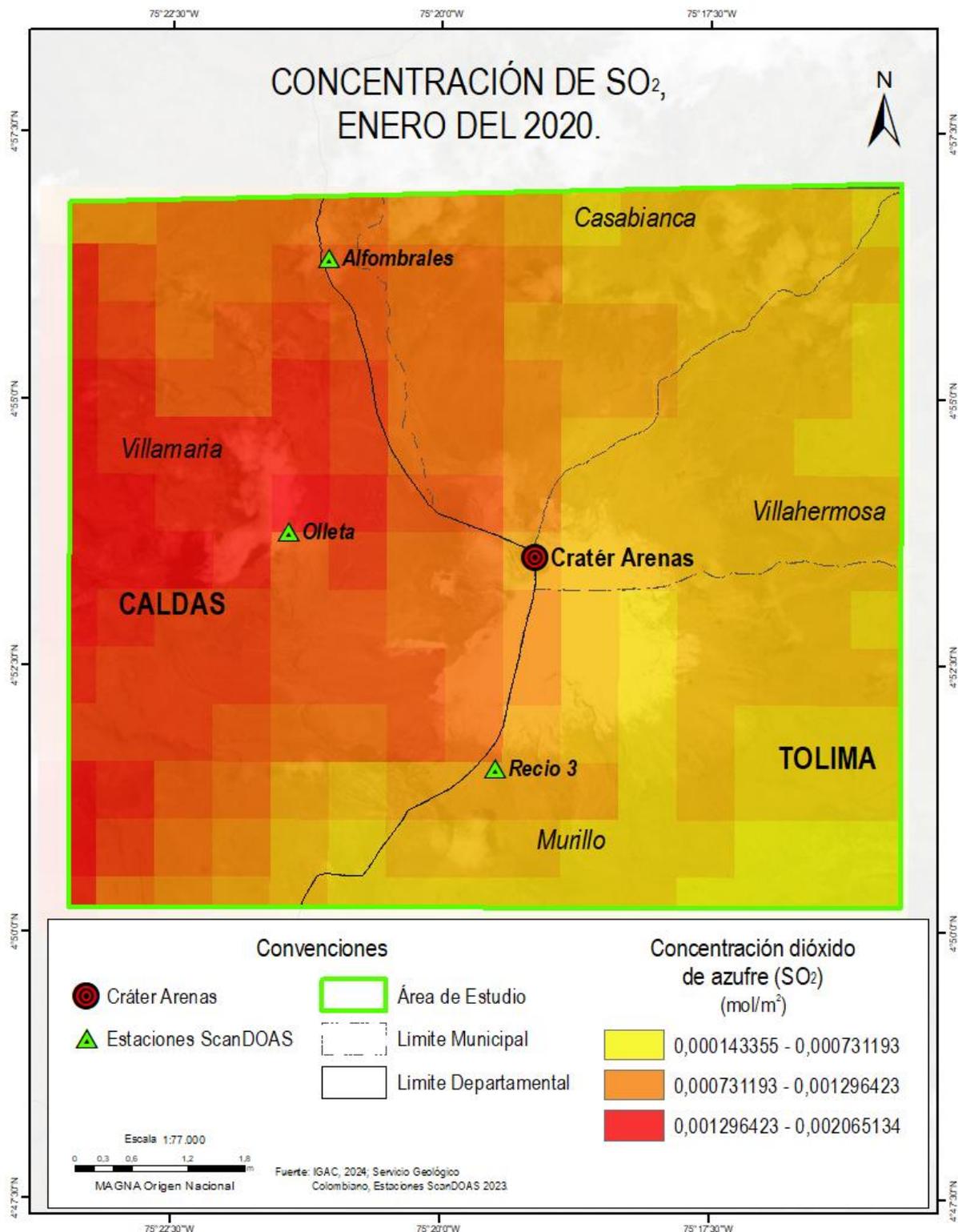


Figura 10. Mapa de Concentración de SO₂ de enero de 2020.

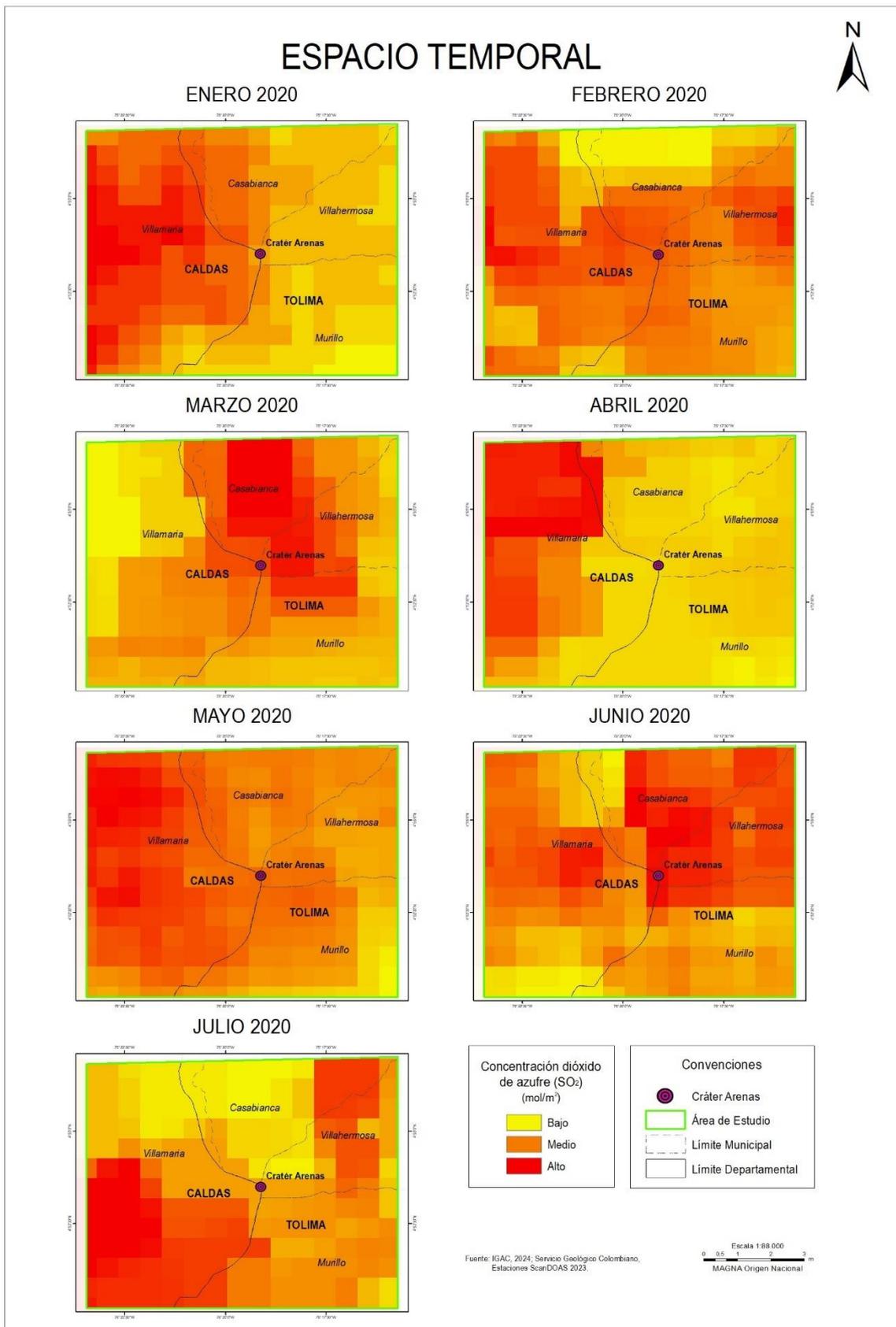


Figura 11. Distribución espacio temporal de SO₂ sobre el Volcán Nevado del Ruiz.

8.2 Datos de las Estaciones ScanDOAS del VNR

La información de las estaciones ScanDOAS suministrada por el Servicio Geológico Colombiano registraban datos para todos los meses del año 2020. El número total de datos obtenidos para cada mes se muestran en la Tabla 19 y los valores de flujos máximos diarios de SO₂ se muestran en el numeral 8.3.

Tabla 19. Número total de datos de las estaciones ScanDOAS por mes.

Estación ScanDOAS	Mes 2020											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Alfombrales	26	28	22	28	31	30	30	31	30	27	27	25
Olleta	28	28	22	28	10	31	29	31	30	27	26	25
Recio 3	10	13	27	27	15	14	9	21	20	23	24	19

8.3 Comparación de Resultados

Para comparar los resultados obtenidos del sensor TROPOMI, se tomaron los datos de concentración SO₂ del sensor que coincide con la misma fecha de los datos disponibles de las estaciones ScanDOAS.

8.3.1 Resultados de la Estación ScanDOAS Alfombrales

En la Tabla 20. se muestran los valores de flujo y concentración de SO₂ obtenidos de la estación Alfombrales y sensor TROPOMI. Al igual que los valores transformados a unidades de concentración (mg/m³). Los datos obtenidos son de 39 días comprendido desde el 3 de enero hasta 15 de julio de 2020.

Tabla 20. Datos de concentraciones de SO₂ de TROPOMI y datos estación Alfombrales.

FECHA (aaaa-mm-dd)	DATOS ORIGINALES		DATOS TRANSFORMADOS	
	ScanDOAS Flujo máximo SO ₂ (T/día)	TROPOMI Concentración SO ₂ (mol/m ²)	ScanDOAS Concentración SO ₂ (mg/m ³)	TROPOMI Concentración SO ₂ (mg/m ³)
2020-01-03	5846	0.000265358	152316.56	195631.64
2020-01-04	2102	0.000774766	61595.80	571185.86
2020-01-06	3748	0.002866323	169827.71	2113159.29
2020-01-07	2683	0.000558059	94224.63	411421.84
2020-01-08	1381	0.000785182	131213.18	578865.35
2020-01-12	5078	0.000456984	73336.59	336905.48
2020-01-13	3370	0.00167315	38650.38	1233508.00
2020-01-15	2287	0.000972006	62944.08	716598.79
2020-01-17	621	0.000790759	119309.40	582976.82

FECHA (aaaa-mm-dd)	DATOS ORIGINALES		DATOS TRANSFORMADOS	
	ScanDOAS Flujo máximo SO ₂ (T/día)	TROPOMI Concentración SO ₂ (mol/m ²)	ScanDOAS Concentración SO ₂ (mg/m ³)	TROPOMI Concentración SO ₂ (mg/m ³)
2020-01-18	2975	0.00420978	65593.15	3103605.35
2020-01-25	3074	0.000605854	325195.57	446657.75
2020-02-03	852	0.001091962	116580.98	805034.78
2020-02-04	2307	0.000670537	264556.64	494344.95
2020-02-12	2095	0.000470356	89714.23	346764.01
2020-02-13	7730	0.003846313	78148.10	2835644.01
2020-03-04	8273	0.001891334	48221.52	1394361.63
2020-03-28	3343	0.003082956	56097.46	2272869.55
2020-04-05	6939	0.00204403	86272.47	1506934.74
2020-04-25	5887	0.000157981	69982.78	116469.73
2020-04-26	1072	8.73124E-05	64442.56	64369.93
2020-05-06	2502	0.000555619	151477.06	409622.77
2020-05-07	1446	0.000246381	195237.10	181641.37
2020-05-08	1987	0.00019934	134907.72	146960.92
2020-05-10	3062	0.000266189	77763.62	196244.33
2020-05-11	4254	0.000488998	72969.59	360507.54
2020-05-12	2110	0.00081726	51203.51	602514.66
2020-05-21	1032	0.001480443	96716.51	1091437.09
2020-05-23	7608	0.003884384	81827.15	2863711.41
2020-05-27	3178	0.000271126	109659.94	199884.19
2020-05-28	4404	0.000663811	46402.65	489385.69
2020-06-01	4734	0.000118137	99720.62	87094.89
2020-06-02	2417	0.000425788	80228.81	313906.67
2020-06-04	4121	0.000927983	93923.55	684143.77
2020-06-07	2514	0.00017279	163792.80	127387.36
2020-06-08	2379	0.000281101	41122.29	207238.14
2020-06-14	1210	0.000694058	257234.62	511685.00
2020-06-21	1770	0.001086122	704007.99	800729.47
2020-07-09	5264	0.000167687	132434.69	123624.72
2020-07-15	4658	0.000590767	153944.30	435535.47

Los datos de concentración obtenidos en la Tabla 20. se proyectaron en la Figura 12 y Figura 13 por medio de gráficas de línea y dispersión.

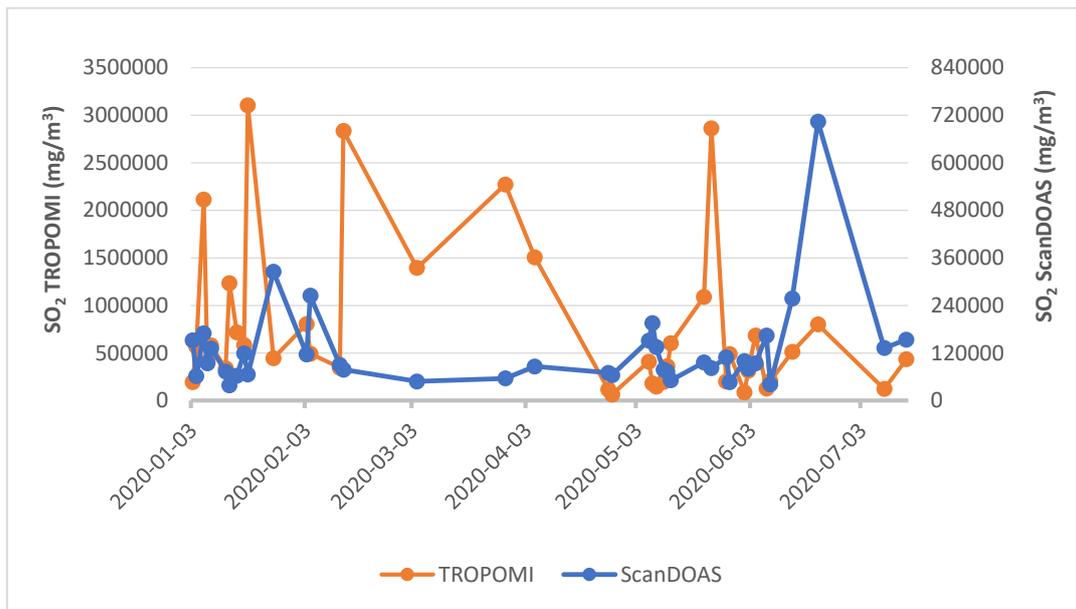


Figura 12. Distribución de la concentración SO₂ datos de la estación Alfombrales con respecto a los datos TROPOMI.

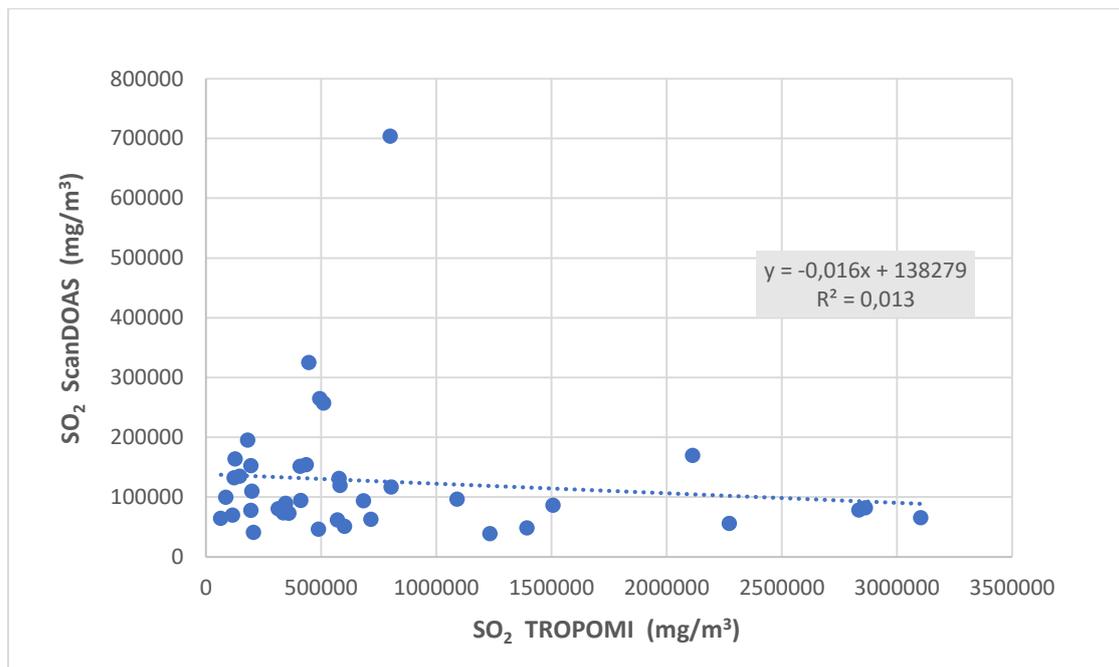


Figura 13. Gráfico de dispersión de concentraciones SO₂ datos de la estación Alfombrales con respecto a los datos TROPOMI.

La Figura 12 muestra que los datos de concentración de SO₂ calculados a partir de los datos de flujos de la estación Alfombrales están por debajo de los valores de concentración del sensor y en la Figura 13 se identificó que la relación de los datos de concentración es negativa

nula porque el valor de R² es 0.013 y este valor del coeficiente se aproxima a 0. Esto concuerda con lo que ya nos estábamos esperando desde la literatura.

8.3.2 Resultados de la Estación ScanDOAS Olleta

En la Tabla 21. se muestran los valores de flujo y concentración de SO₂ obtenidos de la estación Olleta y sensor TROPOMI. Al igual que los valores transformados a unidades de concentración (mg/m³). Los datos obtenidos son de 37 días comprendido desde el 3 de enero hasta 9 de julio de 2020.

Tabla 21. Datos de concentraciones de SO₂ de TROPOMI y datos estación Olleta.

FECHA (aaaa-mm-dd)	DATOS ORIGINALES		DATOS TRANSFORMADOS	
	ScanDOAS	TROPOMI Concentración SO ₂ (mol/m ²)	ScanDOAS Concentración SO ₂ (mg/m ³)	TROPOMI Concentración SO ₂ (mg/m ³)
2020-01-03	5447	0.00036591	152994.08	265355.69
2020-01-04	5273	0.000241087	61869.19	174834.99
2020-01-06	2996	0.002242677	170581.75	1626373.84
2020-01-07	3920	0.003295664	94646.82	2389992.80
2020-01-08	3032	0.001246212	131796.62	903744.41
2020-01-09	4850	0.00042015	338824.86	304689.97
2020-01-13	5775	0.00167315	38821.12	1213356.89
2020-01-15	2547	0.001046517	63224.57	758926.78
2020-01-17	920	0.000784774	119834.74	569113.00
2020-01-18	1581	0.00420978	65882.80	3052903.42
2020-01-25	1278	0.000605854	326643.12	439360.95
2020-02-03	3791	0.001091962	117095.79	791883.36
2020-02-04	7519	0.000897917	265727.87	651163.10
2020-02-05	4346	0.003846313	130586.90	2789319.65
2020-02-06	5842	0.001341676	41226.69	972974.17
2020-02-13	6099	0.003082956	61445.99	2235738.86
2020-02-18	8830	0.00204403	70724.30	1482316.75
2020-03-22	7429	0.00015813	73720.45	114674.56
2020-03-28	918	8.73124E-05	71457.67	63318.36
2020-04-26	1790	0.000246381	154072.70	178673.99
2020-05-07	2026	0.00019934	182779.15	144560.09
2020-05-08	4091	0.000266189	74638.47	193038.39
2020-05-10	3887	0.000390077	78529.97	282880.84
2020-05-11	2757	0.00081726	72004.24	592671.70
2020-05-12	2447	0.0019779	58426.30	1434359.76

FECHA (aaaa-mm-dd)	DATOS ORIGINALES		DATOS TRANSFORMADOS	
	ScanDOAS	TROPOMI Concentración SO ₂ (mol/m ²)	ScanDOAS Concentración SO ₂ (mg/m ³)	TROPOMI Concentración SO ₂ (mg/m ³)
2020-05-21	1584	0.001480443	97147.34	1073606.86
2020-05-23	10011	0.001939579	82191.66	1406569.28
2020-05-27	4557	0.000299884	110148.61	217474.06
2020-05-28	5443	0.001157245	46609.28	839226.00
2020-06-02	5227	0.000425788	80586.59	308778.54
2020-06-04	2422	0.000927983	94341.18	672967.28
2020-06-06	3789	0.000167238	271462.88	121279.53
2020-06-08	2556	0.000869284	41304.02	630398.90
2020-06-13	5733	0.00142171	63606.78	1031014.12
2020-06-14	2584	0.000647929	258381.32	469873.85
2020-06-21	4369	0.001086122	707146.33	787648.39
2020-07-09	8117	0.000148389	133020.78	107610.89

Los datos de concentración obtenidos en la Tabla 21. se proyectaron en la Figura 14 y Figura 15 por medio de gráficas de línea y dispersión.

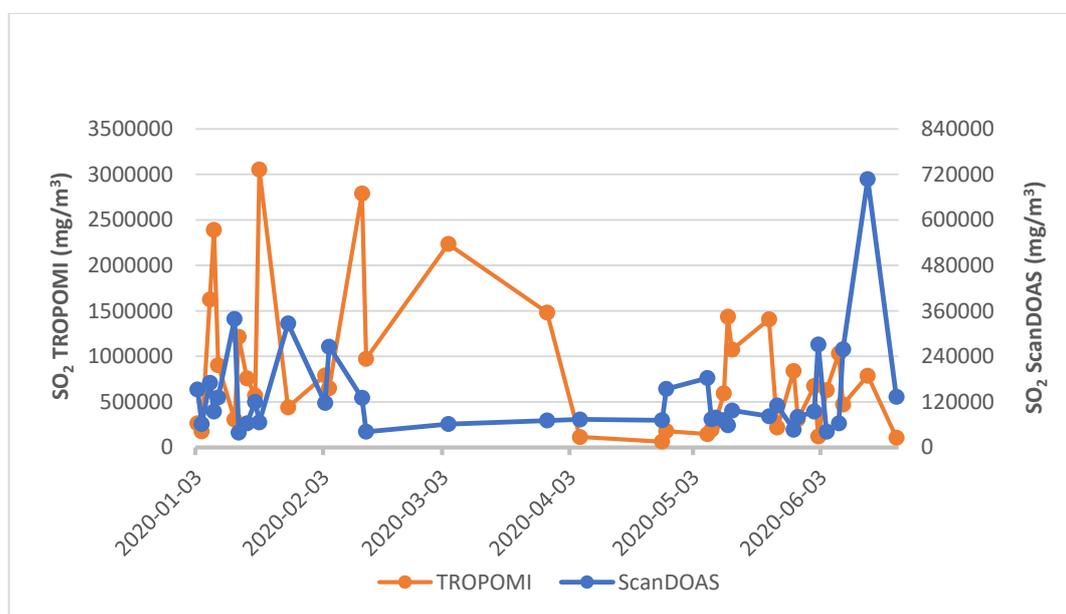


Figura 14. Distribución de la concentración SO₂ datos de la estación Olleta con respecto a los datos TROPOMI.

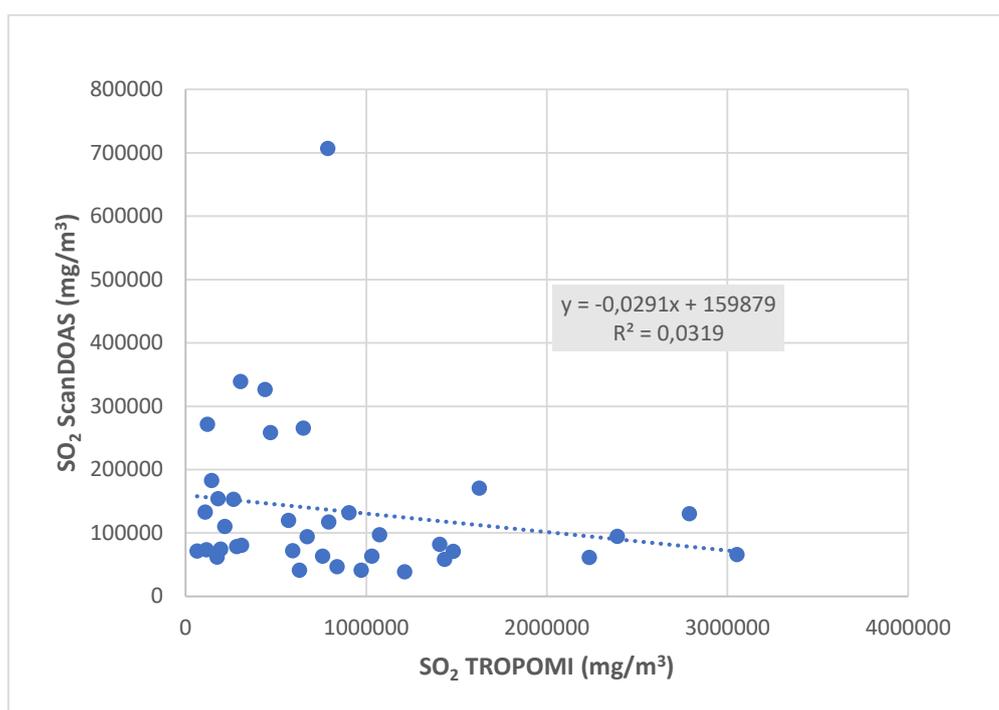


Figura 15. Gráfico de dispersión de concentraciones SO₂ datos de la estación Olleta con respecto a los datos TROPOMI.

La Figura 14 muestra que los datos de concentración de SO₂ calculados a partir de los datos de flujos de la estación Olleta están por debajo de los valores de concentración del sensor y la relación entre los datos de concentración ilustrado en la Figura 15 es negativa nula, porque el valor de R² es 0.032 y este valor del coeficiente se aproxima a 0. Esto concuerda con lo que a nos estábamos esperando desde la literatura.

8.3.3 Resultados de la Estación ScanDOAS Recio 3

En la Tabla 22 se muestran los valores de flujo y concentración de SO₂ obtenidos de la estación Recio 3 y el sensor TROPOMI. Al igual que los valores transformados a unidades de concentración (mg/m³). Los datos obtenidos son de 20 días comprendido desde el 2 de enero hasta 15 de julio de 2020.

Tabla 22. Datos de concentraciones de SO₂ de TROPOMI y datos estación Recio 3.

FECHA (aaaa-mm-dd)	DATOS ORIGINALES		DATOS TRANSFORMADOS	
	ScanDOAS	TROPOMI Concentración SO ₂ (mol/m ²)	ScanDOAS Concentración SO ₂ (mg/m ³)	TROPOMI Concentración SO ₂ (mg/m ³)
2020-01-02	711	0.002198235	65076.06	1595553.00

FECHA (aaaa-mm-dd)	DATOS ORIGINALES		DATOS TRANSFORMADOS	
	ScanDOAS	TROPOMI Concentración SO ₂ (mol/m ²)	ScanDOAS Concentración SO ₂ (mg/m ³)	TROPOMI Concentración SO ₂ (mg/m ³)
2020-01-06	2117	0.002862755	170541.47	2077883.95
2020-01-11	463	0.000976908	82847.05	709072.68
2020-01-15	972	0.001823586	63209.59	1323620.55
2020-01-18	1442	0.000534926	65867.33	388267.51
2020-03-04	2575	0.001891334	48423.52	1372794.35
2020-03-05	943	0.002032555	57202.80	1475296.81
2020-03-22	721	0.001240701	101395.48	900542.51
2020-03-28	715	0.00227132	56332.63	1648600.72
2020-04-22	436	0.000187407	56549.02	136026.34
2020-04-25	675	0.000128916	70275.11	93571.87
2020-04-26	464	8.02613E-05	64711.74	58256.34
2020-05-08	906	0.000489421	135476.58	355238.10
2020-05-12	410	0.00081726	51419.42	593195.26
2020-05-23	765	0.003884384	82172.19	2819416.95
2020-05-28	616	0.000399998	46598.24	290332.07
2020-06-07	650	0.00017279	164483.96	125417.00
2020-06-13	776	0.002489223	63591.70	1806762.42
2020-07-09	934	0.000308288	132989.48	223765.76
2020-07-15	510	0.000590767	154590.36	428798.83

Los datos de concentración obtenidos en la Tabla 22 se proyectaron en la Figura 16 y la Figura 17 por medio de gráficas de línea y dispersión.

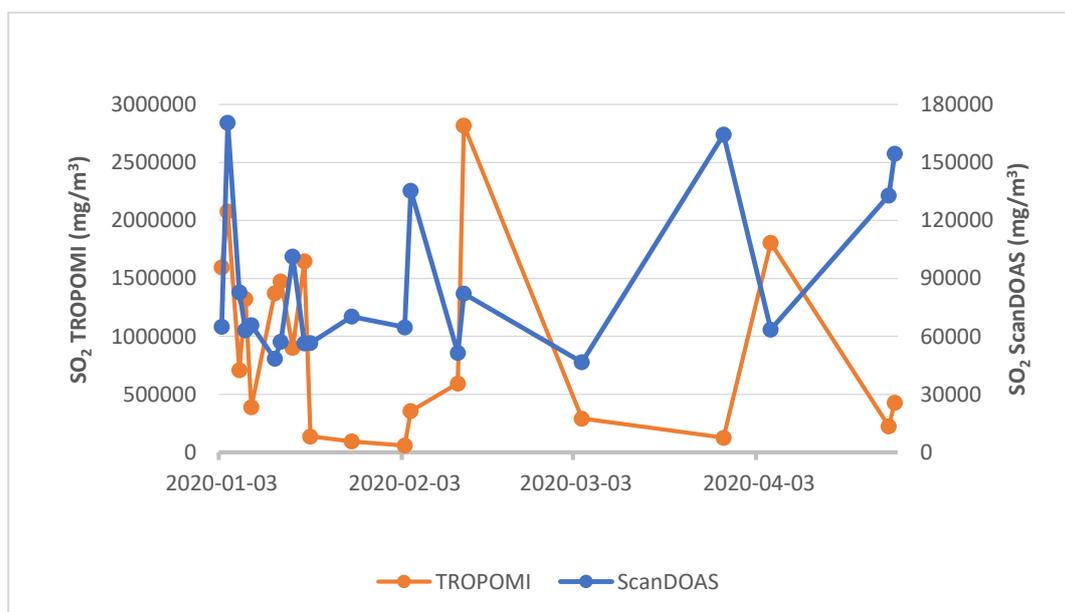


Figura 16. Distribución de la concentración SO₂ datos de la estación Recio 3 con respecto a los datos TROPOMI

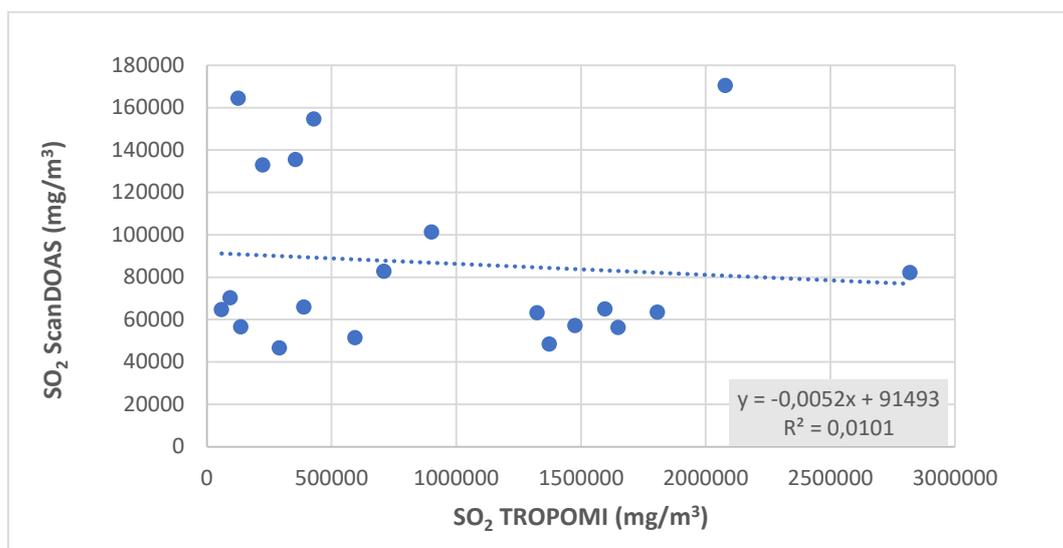


Figura 17. Gráfico de dispersión de concentraciones SO₂ datos de la estación Recio 3 con respecto a los datos TROPOMI

La Figura 16 muestra que los datos de concentraciones de SO₂ calculados a partir de los datos de flujos de la estación Recio 3 están por debajo de los valores de concentración del sensor y en la Figura 17 se identificó que la relación de los datos de concentración es negativa nula porque el valor de R² es 0.010 y el valor del coeficiente se aproxima a 0. Esto concuerda con lo que ya nos estábamos esperando desde la literatura.

Los resultados de TROPOMI, presentados en la Tabla 20 a la Tabla 22, muestran los datos de la concentración de SO₂ troposférico sobre la ubicación de cada estación de monitoreo. En particular, se destaca que la estación Olleta exhibe los valores más elevados de concentración de SO₂, lo cual podría deberse a su proximidad al cráter del volcán. En los datos transformados de las estaciones ScanDOAS, se destaca valores altos de concentraciones de SO₂ en las estaciones Olleta y Alfombrales. Al considerar la localización de estas estaciones se puede deducir que las altas concentraciones de SO₂ durante el periodo de estudio se evidencian principalmente en la zona noroeste del área de estudio.

Adicional, la Figura 11 muestra la distribución espacio-temporal de las concentraciones de SO₂ para el Volcán Nevado del Ruiz, donde se evidencia que la concentración de SO₂ se distribuye en diferentes direcciones para los meses del periodo de estudio. Se observa que, en los meses de enero, abril y mayo, los altos valores de concentración de SO₂ se presentaron en dirección noroeste. En febrero los valores altos de concentración SO₂ abarcaron las zonas noroeste y noreste, mientras que en la zona sureste se observaron valores medios de concentración SO₂. En el mes de marzo los valores altos de concentración SO₂ se extendieron

hacia la zona norte y parte de la zona noreste. En el junio, se registraron los valores altos de concentración SO₂ hacia la zona noreste y los valores bajos hacia el suroeste. Finalmente, los valores altos de concentración SO₂ abarcaron la zona suroeste y los valores presentaron en el noroeste.

Con los datos de flujos de SO₂ de las estaciones del SGC se obtuvieron las concentraciones SO₂ del Volcán Nevado del Ruiz, a pesar de la ausencia de datos para algunos días, esto podría deberse a que la estación haya estado en mantenimiento. Cabe resaltar que la ausencia de datos de algunas estaciones limitó el conjunto de datos diario de concentración de SO₂ para su comparación con la información de concentración SO₂ disponible del sensor TROPOMI.

Al comparar los datos de concentración de las estaciones del SGC y del sensor, se evidencia que no hay relación entre los datos, los valores de las estaciones son muy bajos comparados con los valores del sensor, esto se puede dar porque los datos del servicio geológico corresponden a flujos máximos diarios registrados y los datos del sensor satelital son datos registrados en una hora específica, la cual corresponde a la hora que el satélite pasa por el Ecuador (13:30 pm) (Hubert et al., 2020). Este resultado era previsible, ya que en la literatura previa se había concluido que los valores medidos en la troposfera por el sensor TROPOMI mostraban dinámicas diferentes en comparación con los datos medidos en tierra (Forero, 2019)

9 Conclusiones y Recomendaciones

9.1 Conclusiones

Tras llevar a cabo una revisión de la literatura, se identificó que la característica principal de los sensores remotos satelitales adecuados para detección de Dióxido de Azufre (SO₂) es que cuentan con bandas y/o canales en el espectro electromagnético ultravioleta, porque el SO₂ presente en el aire tiene un rango de absorción que predomina en la región ultravioleta, específicamente entre 210 nm a 390 nm. Entre estos sensores, se destaca el sensor pasivo TROPOMI que tiene una mejor resolución espacial en comparación con otros sensores pasivos con longitudes de onda ultravioleta. Esta mejor resolución espacial permite una mayor sensibilidad a concentraciones bajas de SO₂ y además cubre la zona de Colombia, lo que lo convierte en una herramienta para la detección de SO₂ volcánico en el contexto colombiano.

Se identificaron sensores capaces de detectar SO₂ volcánico en ausencia de irradiación solar, al operar en el rango infrarrojo térmico (TIR). Aunque se reconoce una limitación en la recuperación de la columna de SO₂, estos sensores tienen la ventaja de realizar seguimientos continuos a la columna de SO₂ volcánico, como el sensor ABI que tiene una resolución temporal de 15 minutos. Por otro lado, una de las limitaciones del sensor TROPOMI, que emplea la metodología DOAS, es que no puede detectar el SO₂ en ausencia de irradiación solar.

La tendencia en el desarrollo de sensores satelitales para la detección de SO₂ volcánico se ha centrado en mejorar la resolución espacial y la capacidad de monitoreo global. Los satélites están siendo diseñados para pasar más frecuentemente sobre las mismas áreas geográficas, como lo es el sensor TEMPO. Esto es importante para un monitoreo continuo de emisiones y eventos volcánicos.

Se aplicó el sensor TROPOMI en el caso de estudio del Volcán Nevado del Ruiz, para obtener datos de concentraciones de SO₂ en cada una de las ubicaciones de las estaciones ScanDOAS pertenecientes a la red de monitoreo geoquímico del volcán que se enmarcan dentro del área de estudio. Durante este estudio se destacaron las concentraciones más altas en la ubicación de la estación Olleta.

El año 2020 se seleccionó como periodo de estudio, después de revisar los eventos históricos del Volcán Nevado del Ruiz donde se evidenciaron emisiones de SO₂, analizar los datos de precipitaciones para validar las condiciones climáticas favorables para la observación de emisiones de SO₂ y considerar la disponibilidad de datos del sensor TROPOMI. En general,

estos criterios proporcionan un marco adecuado para contextualizar el estudio, lo que facilita la comprensión y análisis de los resultados.

En la revisión bibliográfica se identificó que TROPOMI fue el sensor idóneo para aplicar en el caso de estudio, por ende, para comparar los resultados del sensor aplicado se procedió a comparar sus resultados con los datos in-situ de las estaciones ScanDOAS de la red de monitoreo geoquímica. En los resultados se observó una falta de similitud entre los datos, los valores de las estaciones eran muy bajos comparados con los valores del sensor, pues los datos de las estaciones corresponden a flujos máximos diarios registrados y los datos del sensor satelital son datos registrados en una hora específica, la cual corresponde a la hora que el satélite pasa por el Ecuador.

La aplicación de TROPOMI en el caso de estudio ha revelado patrones espacio-temporales de concentraciones de SO₂, proporcionando una visión detallada de las emisiones volcánicas en el área de estudio. Aunque se observaron diferencias en las concentraciones comparadas con las mediciones in-situ de las estaciones ScanDOAS, el TROPOMI ha demostrado su utilidad para un monitoreo global y diario de estas emisiones.

Este estudio contribuye a la comprensión de las capacidades de los sensores remotos satelitales para detectar SO₂ volcánico, sentando así las bases para futuras investigaciones sobre el monitoreo de emisiones volcánicas. Las técnicas de monitoreo empleadas por los sensores descritos en este estudio pueden ser aplicadas también en estudios de emisiones de SO₂ provenientes de otras fuentes, ampliando así su utilidad y relevancia en la investigación ambiental.

9.2 Epílogo

Durante este trabajo de profundización, se consultó las características de los sensores remotos satelitales con la capacidad de detección de emisiones de SO₂ volcánico en cuanto a sus bandas y/o canales, resolución espacial, espectral y temporal, y se describió la aplicación, capacidades y limitaciones de estos sensores. Se logró identificar en los casos de estudios que desde los años 80 se han utilizado los sensores con bandas y/o canales en el rango ultravioleta para detectar SO₂ volcánico (Krueger, 1983). Estos sensores a medida que pasan los años han evolucionado con nuevas tecnologías que muestran mejoras en las resoluciones espacial y temporal como TROPOMI que es herencia de SCIAMACHY y OMI; todos son espectrógrafos pasivos de retrodispersión solar que utilizan las longitudes de onda ultravioleta. Sin embargo,

en la revisión de los sensores disponibles para esta tarea reconocemos que existen otros sensores como ASTER, MODIS, ABI, IASI y AIRS que han podido detectar SO₂ en el infrarrojo térmico, pero presentan desafíos en términos de sensibilidad y precisión debido a factores como la interferencia con el vapor de agua o ceniza volcánica.

Mirando hacia el futuro, con el avance de la tecnología, la tendencia de los sensores satelitales para que puedan desempeñar un papel aún más crucial en la detección de emisiones de SO₂, está en función de mejorar la resolución espacial para una mayor sensibilidad a las concentraciones de SO₂ y un tiempo de revista por un mismo punto más frecuente para contribuir en la entrega de información que sirva para interpretación de los cambios en la composición atmosférica y toma oportuna de decisiones en la gestión del riesgo especialmente en lo que respecta a la actividad volcánica y la calidad del aire.

9.3 Recomendaciones

Se recomienda que en futuros estudios sobre el comportamiento de las emisiones de SO₂ volcánico se consideren variables meteorológicas, tales como temperatura, velocidad y dirección del viento, altura sobre el nivel del mar, entre otras. Estas variables tienen un impacto significativo en el comportamiento de estas emisiones a nivel troposférico.

Para seguimientos continuos de las emisiones de SO₂ volcánico y para analizar el comportamiento de este gas, se recomienda emplear instrumentos infrarrojos que permitan hacer recuperaciones de SO₂ en horas de la noche, ya que actualmente el Servicio Geológico Colombiano emplea instrumentos que permiten hacer mediciones en jornada diurna.

La entidad gubernamental encargada del monitoreo (SGC) debería llevar la trazabilidad de las áreas de dispersión de contaminantes para el Volcán Nevado del Ruiz, que permita determinar las zonas de influencia o vulnerables por la contaminación del SO₂ azufre volcánico.

Finalmente se recomienda que la entidad gubernamental pueda generar datos de concentraciones SO₂ de manera continua en el día para que sean aplicados en futuras validaciones de otros estudios. Además, de que esta información pueda estar en acceso libre a través de portales como Datos Abiertos de la Plataforma de Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales - ICDE.

10 Referencias Bibliográficas

- Air Quality | Earthdata*. (s. f.). Recuperado 22 de mayo de 2022, de <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/find-data/near-real-time/hazards-and-disasters/air-quality>
- Aqua (EOS/PM-1)*. (s. f.). Recuperado 9 de julio de 2023, de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/aqua#eop-quick-facts-section>
- Aura (EOS/Chem-1)*. (s. f.). Recuperado 27 de mayo de 2023, de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/aura#omi-ozone-monitoring-instrument>
- Bauduin, S., Clarisse, L., Hadji-Lazaro, J., Theys, N., Clerbaux, C., & Coheur, P. F. (2016). Retrieval of near-surface sulfur dioxide (SO₂) concentrations at a global scale using IASI satellite observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(2), 721-740. <https://doi.org/10.5194/amt-9-721-2016>
- Blackett, M. (2015). An initial comparison of the thermal anomaly detection products of MODIS and VIIRS in their observation of Indonesian volcanic activity. *Remote Sensing of Environment*, 171, 75-82. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.10.002>
- CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)*. (s. f.). Recuperado 27 de mayo de 2023, de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/calipso>
- Callies, J., Corpaccioli, E., Eisinger, M., Hahne, A., & Lefebvre, A. (2000). GOME-2-Metop's Second-Generation Sensor for Operational Ozone Monitoring. *Esa bulletin*, 28-36. <https://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet102/Callies102.pdf>
- Campion, R., Salerno, G. G., Coheur, P. F., Hurtmans, D., Clarisse, L., Kazahaya, K., Burton, M., Caltabiano, T., Clerbaux, C., & Bernard, A. (2010). Measuring volcanic degassing of SO₂ in the lower troposphere with ASTER band ratios. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 194(1-3), 42-54. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.04.010>
- Carn, S. A., Clarisse, L., & Prata, A. J. (2016). Multi-decadal satellite measurements of global volcanic degassing. En *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (Vol. 311, pp. 99-134). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.01.002>
- Carn, S. A., Krueger, A. J., Krotkov, N. A., Yang, K., & Evans, K. (2009). Tracking volcanic sulfur dioxide clouds for aviation hazard mitigation. *Natural Hazards*, 51(2), 325-343. <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9228-4>
- Copernicus: Sentinel-5P*. (s. f.). Recuperado 27 de mayo de 2023, de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/copernicus-sentinel-5p#spacecraft>
- Corradini, S., Merucci, L., & Prata, A. J. (2009). Retrieval of SO₂ from thermal infrared satellite measurements: correction procedures for the effects of volcanic ash. *Atmos. Meas. Tech*, 2, 177-191. www.atmos-meas-tech.net/2/177/2009/
- Corradini, S., Merucci, L., Prata, A. J., & Piscini, A. (2010). Volcanic ash and SO₂ in the 2008 Kasatochi eruption: Retrievals comparison from different IR satellite sensors.

- Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 115(24).
<https://doi.org/10.1029/2009JD013634>
- Duque, S., & Vélez, L. D. (2023). *Variaciones temporales de las frecuencias complejas de los sismos de largo periodo registrados en el Volcán Nevado del Ruíz entre 2014-2018, periodo de actividad magmática e hidrotermal*.
- El Tiempo [ET]. (s. f.). *Lluvias en Colombia se han recrudecido en los últimos 10 años*. Recuperado 10 de julio de 2023, de <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/lluvias-asi-han-aumentado-en-una-decada-las-precipitaciones-en-el-pais-682537>
- Fioletov, V. E., Mclinden, C. A., Griffin, D., Abboud, I., Krotkov, N., Leonard, P. J. T., Li, C., Joiner, J., Theys, N., & Carn, S. (2022). Version 2 of the global catalogue of large anthropogenic and volcanic SO₂ sources and emissions derived from satellite measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*. <https://doi.org/10.5194/essd-2022-281>
- Fioletov, V. E., Mclinden, C. A., Griffin, D., Krotkov, N., Li, C., Joiner, J., Theys, N., & Carn, S. (2023). Estimation of anthropogenic and volcanic SO₂ emissions from satellite data in the presence of snow/ice on the ground. *Atmospheric Chemistry and Physics*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-1240>
- Fioletov, V., McLinden, C. A., Kharol, S. K., Krotkov, N. A., Li, C., Joiner, J., Moran, M. D., Vet, R., Visschedijk, A. J. H., & Denier Van Der Gon, H. A. C. (2017). Multi-source SO₂ emission retrievals and consistency of satellite and surface measurements with reported emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(20), 12597-12616. <https://doi.org/10.5194/acp-17-12597-2017>
- Forero, D. D. (2019). *Metodología Para La Incorporación De Datos Del Sensor Tropomi Del Satélite Sentinel 5-P Al Monitoreo De La Calidad*. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/23649>
- Garzón, G., Santacoloma, C., Galle, B., & Solarte, E. (2008). *Estrategias De Medición De Gases Volcánicos En Colombia Utilizando Sensores Ópticos Remotos*.
- Geoffroy, C. (2014). *Estimación de la emisión de dióxido de azufre en penachos volcánicos mediante una cámara ultravioleta*. UNIVERSIDAD DE CHILE.
- George, S. (2014). *Contaminación Volcánica* /. International Pollution Issues. <https://intlpollution.commons.gc.cuny.edu/volcanic-pollution/>
- GOES-R (*Geostationary Operational Environmental Satellite-R*). (s. f.). Recuperado 21 de mayo de 2023, de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/goes-r>
- Gómez, D., López, C., Bustamante, M., Agudelo, A., Cortés, G., & Calvache, M. (2021). Volcanismo activo en Colombia y el rol del Servicio Geológico Colombiano. *Volcanica journal*, 4, 127-139. <https://doi.org/11.33999/vol.4.S1.113139>
- Gorkavyi, N., Krotkov, N., Li, C., Lait, L., Colarco, P., Carn, S., Deland, M., Newman, P., Schoeberl, M., Taha, G., Torres, O., Vasilkov, A., & Joiner, J. (2021). Tracking aerosols and SO₂ clouds from the Raikoke eruption: 3D view from satellite observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14. <https://doi.org/10.5194/amt-2021-58>

- Gupta, P., & Follette-cook, M. (2018). *Capacidades Nuevas y Próximas para el Monitoreo de la Calidad del Aire*.
- Gupta, P., Follette-Cook, M., & Strode, S. (2022). *Accessing and Analyzing Air Quality Data from Geostationary Satellites*.
- Hedelt, P., Fedkin, N., Koukouli, M., Efremenko, D., Michailidis, K., Balis, D., Krotkov, N., Loyola, D., Hedelt, P., Fedkin, N., Koukouli, M. L., Efremenko, D., Inness, A., Michailidis, K., Balis, D., Li, C., Krotkov, N., & Loyola, D. (2022). *Volcanic SO₂ height retrieval from UV satellite measurements* *Volcanic SO₂ Height Retrieval From UV Satellite Measurements*. <https://doi.org/10.1002/essoar.10509528.1>
- Hubert, D., Heue, K.-P., Lambert, J.-C., Verhoelst, T., Allaart, M., Compernelle, S., Cullis, P. D., Dehn, A., Félix, C., Johnson, B. J., Keppens, A., Kollonige, D. E., Lerot, C., Loyola, D., Maata, M., Mitro, S., Mohamad, M., Piters, A., Romahn, F., ... Zehner, C. (2020). *TROPOMI tropospheric ozone column data: Geophysical assessment and comparison to ozonesondes, GOME-2B and OMI*. <https://doi.org/10.5194/amt-2020-123>
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (s. f.). *VARIABILIDAD DIARIA DE LA TEMPERATURA - IDEAM*. Recuperado 10 de septiembre de 2023, de <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/variabilidad-diaria-temperatura>
- Instituto Smithsonian [IS]. (s. f.). *Global Volcanism Program | Nevado del Ruiz*. Recuperado 28 de enero de 2024, de <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=351020&vtab=Bulletin>
- Jiménez-Escalona, J. C., Monsivais-Huertero, A., Delgado-Granados, H., & Huerta-Chavez, O. M. (2018). Comparación del flujo de emisión de SO₂ derivadas de COSPEC y MODIS y su complementariedad en el monitoreo volcánico: Caso de estudio en el Volcán Popocatepetl (México). *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 70(3), 709-729. <https://doi.org/10.18268/BSGM2018v70n3a7>
- JPL Science: ASTER Volcano Archive (AVA). (s. f.). Recuperado 28 de enero de 2024, de <https://science.jpl.nasa.gov/projects/aster-volcano-archive-ava/>
- JPSS-1/NOAA-20. (s. f.). Recuperado 22 de mayo de 2023, de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/noaa-20#viirs-visibleinfrared-imager-radiometer-suite>
- Krueger, A. J. (1983). Sighting of El Chichón sulfur dioxide clouds with the nimbus 7 total ozone mapping spectrometer. *Science*, 220(4604), 1377-1379. <https://doi.org/10.1126/science.220.4604.1377>
- Loyola, D., Van Geffen, J., Valks, P., Erbertseder, T., Van Roozendaal, M., Thomas, W., Zimmer, W., & Wißkirchen, K. (2008). Satellite-based detection of volcanic sulphur dioxide from recent eruptions in Central and South America. *Advances in Geosciences*, 14, 35-40. <https://doi.org/10.5194/adgeo-14-35-2008>
- Luna, N. (2022). *Modelo Predictivo de Erupciones Volcánicas a partir de MODVOLC e Interferometría de Radar. Caso de Estudio: Volcán Galeras*.

- Luque, J. (2012). Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico. *Autores Científico-Técnicos y Académicos*, 17-31. https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/062017.pdf
- Martínez, A. (2007). El agua en la atmósfera. *Ciencia*, 58, 36-44.
- Martínez, M., & Amado, E. (2016). Filatelia y Didáctica de la Química: un ejemplo con los Gases Ideales Philately and Teaching of Chemistry: an Example Using the Ideal Gas. *Revista Cubana de Química*, 28, 843-869. <http://ojs.uo.edu.cu/index.php/cq>
- McGee, K. A., Doukas, M. P., Kessler, R., & Gerlach, T. M. (1997). Impacts of Volcanic Gases on Climate, the Environment, and People. *U.S. Geological Survey. Meteosat Second Generation*. (s. f.). Recuperado 9 de julio de 2023, de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/meteosat-second-generation#sensor-complement>
- MetOp (*Meteorological Operational Satellite Program of Europe*). (s. f.). Recuperado 11 de junio de 2023, de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/metop#gome-2-global-ozone-monitoring-experiment-2>
- Ministerio de Minas y Energía. (2023). *Boletín extraordinario Volcán Nevado del Ruiz - Cambio nivel de actividad - 30 de marzo de 2023*.
- MODVOLC. (s. f.). Recuperado 28 de enero de 2024, de <http://modis.higp.hawaii.edu/>
- Mory, A. E. (2018). *Evaluación de la fórmula de flujo másico con fines de aprovechamiento del agua que se produce a partir del sistema de captación de niebla en la zona de San Pedro de Carpish – Chinchao – Huánuco*.
- Naeger, A. (2023). *Tropospheric Emissions: Monitoring of POLLution (TEMPO) Mission*. <http://tempo.si.edu/>
- NASA Applied Remote Sensing Training Program [NASA ARSET]. (s. f.). *Fundamentos de la Teledetección (Percepción Remota)*.
- NOAA POES Series - 5th Generation. (s. f.). Recuperado 27 de mayo de 2023, de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/noaa-poes-series-5th-generation#avhrr3-advanced-very-high-resolution-radiometer>
- Oppenheimer, C., Scaillet, B., & Martin, R. S. (2014). Sulfur degassing from volcanoes: Source conditions, surveillance, plume chemistry and earth system impacts. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 73, 363-421. <https://doi.org/10.2138/rmg.2011.73.13>
- Passive Sensors | Earthdata. (s. f.). Recuperado 19 de septiembre de 2023, de <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/passive-sensors>
- Pavolonis, M. J., Sieglaff, J. M., & Cintineo, J. L. (2019). Remote Sensing of Volcanic Ash with the GOES-R Series. En *The GOES-R Series: A New Generation of Geostationary Environmental Satellites* (Número April 2019). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814327-8.00010-X>
- Podest, E. (2018). Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética. *La Teledetección por Radar y sus Aplicaciones para la Tierra, el Agua y Desastres*, 51. <https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/disasters/SAR-17/Session1-SAR-Spanish.pdf>

- Prados, A., Follette-cook, M., & Gupta, P. (2020). *Monitoreando el Dióxido de Nitrógeno desde el Espacio*. https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2020-11/Inside_Look_AQ_Spanish.pdf
- Prata, A. J. (2009). Satellite detection of hazardous volcanic clouds and the risk to global air traffic. *Natural Hazards*, 51(2), 303-324. <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9273-z>
- Prata, A. J., & Bernardo, C. (2007). Retrieval of volcanic SO₂ column abundance from Atmospheric Infrared Sounder data. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 112(20). <https://doi.org/10.1029/2006JD007955>
- Préndez B., M., Ortiz, J., Zolezzi, S., Campos, C., & Apablaza, N. (1991). Aerosoles atmosféricos de naturaleza inorgánica, contaminación en Santiago de Chile. *Rev.chil.enferm.respir*, 7(4), 224-237. <http://search.bvsalud.org/portal/resource/en/lil-194612>
- Programs | Smithsonian National Museum of Natural History*. (s. f.). Recuperado 28 de enero de 2024, de <https://naturalhistory.si.edu/research/mineral-sciences/programs>
- Resolución 909, Pub. L. No. 909, 1 (2008).
- Robock, A. (2000). Volcanic eruptions and climate. *Reviews of Geophysics*, 1998, 191-219.
- Satellite Missions catalogue*. (s. f.). Recuperado 5 de julio de 2023, de <https://www.eoportal.org/satellite-missions>
- Schiavo, B., Inguaggiato, C., Arredondo-Palacios, T. E., & Meza-Figueroa, D. (2021). Emisiones Volcánicas: Origen E Impacto En La Atmósfera. *Epistemos*, 15(30). <https://doi.org/10.36790/epistemos.v15i30.160>
- Schmidt, A., Carslaw, K. S., Mann, G. W., Rap, A., Pringle, K. J., Spracklen, D. V., Wilson, M., & Forster, P. M. (2012). Importance of tropospheric volcanic aerosol for indirect radiative forcing of climate. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(16), 7321-7339. <https://doi.org/10.5194/acp-12-7321-2012>
- Schmidt, A., Leadbetter, S., Theys, N., Carboni, E., Witham, C. S., Stevenson, J. A., Birch, C. E., Thordarson, T., Turnock, S., Barsotti, S., Delaney, L., Feng, W., Grainger, R. G., Hort, M. C., Höskuldsson, Á., Ialongo, I., Ilyinskaya, E., Jóhannsson, T., Kenny, P., ... Shepherd, J. (2015). Satellite detection, long-range transport, and air quality impacts of volcanic sulfur dioxide from the 2014-2015 flood lava eruption at Bárðarbunga (Iceland). *Journal of Geophysical Research*, 120(18), 9739-9756. <https://doi.org/10.1002/2015JD023638>
- Scott, M., & Lindsey, R. (2016). *¿Qué emite más dióxido de carbono? ¿Los volcanes o la actividad humana?* | NOAA Climate.gov. <https://www.climate.gov/news-features/climate-qa/¿qué-emite-más-dióxido-de-carbono-¿los-volcanes-o-la-actividad-humana>
- Sensors | Earthdata*. (s. f.). Recuperado 26 de octubre de 2022, de <https://www.earthdata.nasa.gov/sensors>
- Sentinel-5P - Missions - Sentinel Online - Sentinel Online*. (s. f.). Recuperado 6 de agosto de 2023, de <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p>

- Sentinel-5P OFFL SO2: Offline Sulfur Dioxide | Earth Engine Data Catalog | Google for Developers.* (s. f.). Recuperado 9 de julio de 2023, de https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S5P_OFFL_L3_SO2
- Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (s. f.). *Generalidades Volcán Nevado del Ruíz.* Recuperado 17 de mayo de 2023, de <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanNevadoRuiz/Paginas/generalidades-volcan-nevado-ruiz.aspx>
- Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2017). *Informe Mensual de Actividad de los Volcanes Galeras, Chiles-Cerro Negro, Cumbal, Las Ánimas, Doña Juana y Azufral Junio 2017.*
- Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2023). *Actividad Volcánica Segmento Norte de Colombia.*
- Sieron, K. (s. f.). *Libro Vulcanología.* Recuperado 27 de octubre de 2022, de <https://www.uv.mx/apps/vulcanismo/>
- Sulfur Dioxide Basics | US EPA.* (s. f.). Recuperado 22 de mayo de 2022, de <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics#what-is-so2>
- Sulphur Dioxide | Tropomi.* (s. f.). Recuperado 22 de mayo de 2022, de <http://www.tropomi.eu/data-products/sulphur-dioxide>
- Suomi NPP (National Polar-orbiting Partnership).* (s. f.). Recuperado 27 de mayo de 2023, de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/suomi-npp>
- TEMPO Data.* (s. f.). Recuperado 29 de enero de 2024, de <https://tempo.si.edu/data.html>
- TEMPO Instrument Captures Its First Images of Air Pollution Over Greater North America | Center for Astrophysics | Harvard & Smithsonian.* (s. f.). Recuperado 29 de enero de 2024, de <https://www.cfa.harvard.edu/news/tempo-instrument-captures-its-first-images-air-pollution-over-greater-north-america>
- TEMPO (Tropospheric Emissions: Monitoring of Pollution).* (s. f.). Recuperado 21 de mayo de 2023, de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/tempo#performance-specifications>
- Terra (EOS/AM-1).* (s. f.). Recuperado 22 de mayo de 2023, de <https://www.eoportal.org/satellite-missions/terra#mission-status>
- Theys, N., Campion, R., Clarisse, L., Brenot, H., Van Gent, J., Theys, N., Campion, R., Clarisse, L., Brenot, H., Dils, B., Corradini, S., Merucci, L., Coheur, P.-F., Van Roozendaal, M., Hurtmans, D., Clerbaux, C., Tait, S., & Ferrucci, F. (2013). Volcanic SO₂ fluxes derived from satellite data: a survey using OMI, GOME-2, IASI and MODIS. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 5945-5968. <https://doi.org/10.1029/2013JD019444>
- Theys, N., Hedelt, P., Smedt, I. De, Lerot, C., Yu, H., Vlietinck, J., & Pedergnana, M. (2019). Global monitoring of volcanic SO₂ degassing with unprecedented resolution

- from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor. *Scientific Reports*, 1-10.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-39279-y>
- Thomas, H. E., Watson, I. M., Carn, S. A., Prata, A. J., & Realmuto, V. J. (2011). A comparison of AIRS, MODIS and OMI sulphur dioxide retrievals in volcanic clouds. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2(3), 217-232.
<https://doi.org/10.1080/19475705.2011.564212>
- Torrisi, F., Amato, E., Corradino, C., Mangiagli, S., & Del Negro, C. (2022). Characterization of Volcanic Cloud Components Using Machine Learning Techniques and SEVIRI Infrared Images. *Sensors*, 22(20).
<https://doi.org/10.3390/s22207712>
- Wright, R. (2015). MODVOLC: 14 years of autonomous observations of effusive volcanism from space. *Journal of the Geological Society*, 426, 23-53.
<https://doi.org/10.1144/SP426.12>
- Zapata Arbeláez, B. I., & Anaya Acevedo, J. A. (2013). Los sensores remotos en los proyectos de mitigación de gases De efecto invernadero. *Entorno Geográfico*, 7-8.
<https://doi.org/10.25100/eg.v0i7-8.7565>

11 Anexos

Anexo 1. Información del Servicio Geológico (SGC)

Anexo 2. Información del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)

Anexo 3. Links de los Scripts desarrollados

Anexo 4. Mapas y archivos Shapefile