



Universidad de San Carlos de Guatemala
Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Estudios de Postgrado

Tesis de Doctorado en Física

Análisis de las abundancias, series temporales y distribución espacial del SO_2
sobre Guatemala basado en las observaciones del detector satelital OMI/AURA en
el período de 2005 - 2021

M.Sc. Ricardo Enrique Contreras Folgar

Asesorado por Dra. Claudia Inés Rivera Cárdenas ICAyCC - UNAM

Asesorado por Dr. José Agustín García Reynoso ICAyCC - UNAM

Guatemala, abril de 2025

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



ESCUELA DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

Análisis de las abundancias, series temporales y distribución espacial del SO_2
sobre Guatemala basado en las observaciones del detector satelital OMI/AURA en
el período de 2005 - 2021

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO AL
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS DE POSTGRADO POR

M.Sc. RICARDO ENRIQUE CONTRERAS FOLGAR

ASESORADO POR DRA. CLAUDIA INÉS RIVERA CÁRDENAS ICAYCC - UNAM
ASESORADO POR DR. JOSÉ AGUSTIN GARCÍA REYNOSO ICAYCC – UNAM

AL CONFERIRSELE EL TÍTULO DE DOCTOR EN FÍSICA

GUATEMALA, ABRIL 2025

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
ESCUELA DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS



CONSEJO DIRECTIVO INTERNO

DIRECTOR	M.Sc. Jorge Marcelo Ixquiac Cabrera
Representante Docente	Arqta. Ana Verónica Carrera Vela
Representante Docente	M.A. Pedro Peláez Reyes
Representante de Egresados	Lic. Urías Amitaí Guzmán García
Representante de Estudiantes	Elvis Enrique Ramírez Mérida
Representante de Estudiantes	Oscar Eduardo García Orantes
Secretario	M.Sc. Freddy Estuardo Rodríguez Quezada

TRIBUNAL QUE PRACTICO LA DEFENSA DE TESIS

EXAMINADOR	Dr. Josué Arellano Hernández.	ICAyCC - UNAM
EXAMINADOR	Dr. Wolfgang M.H. Stremme.	ICAyCC - UNAM
EXAMINADOR	Dr. Oscar Augusto Peralta.	ICAyCC - UNAM

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), institución que encarna la excelencia académica y la investigación de vanguardia. Gracias por abrirme sus puertas y brindarme las herramientas necesarias para enriquecer mi conocimiento y llevar a cabo este proyecto con los más altos estándares de calidad.

Al Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAYCC), cuya infraestructura, comunidad académica y recursos fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación. Su ambiente de trabajo y apoyo constante marcaron una gran diferencia en cada etapa de este camino.

A mis tutores, Dra. Claudia Rivera y Dr. Agustín García, por su guía, paciencia y confianza depositada en mí. Su experiencia y compromiso no solo enriquecieron este trabajo, sino también mi formación personal y profesional. Gracias por sus valiosos consejos y por impulsarme a superar mis propios límites.

A la Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de San Carlos de Guatemala, por ser el espacio donde inicié este desafío académico y por proporcionar el soporte necesario para que este proyecto pudiera llevarse a cabo. Su apoyo constante ha sido una base sólida para mi crecimiento.

DEDICATORIA

Dios	Fuente inagotable de inspiración y guía constante en mi vida, quien ha iluminado cada paso en este viaje académico.
La Virgen María	Intercesora de mis anhelos y protectora incansable, que con su manto me ha resguardado en momentos de incertidumbre.
Mi esposa	Pilar de fortaleza y amor incondicional, quien con su apoyo y fe inquebrantable ha sido la luz en los días más oscuros.
Mis hijos	Razón de mis días y motivación para esforzarme y ser mejor cada día. Por ustedes, todo esfuerzo tiene un propósito más grande.
Mis padres	Por inculcarme los valores y la dedicación al estudio, y por ser el ejemplo constante de perseverancia y amor.

Tabla de contenido

Índice de Figuras	IV
Índice de Tablas	VI
Índice de Mapas	VIII
Lista de Símbolos	X
Lista de Abreviaturas	XII
Objetivos	XIV
General	XIV
Específicos	XIV
Introducción	XVI
1 PRIMER CAPÍTULO. TELEDETECCIÓN SATELITAL DE SO₂	1
1.1 Introducción	1
1.2 Aplicaciones al estudio de la atmósfera	3
1.3 Ventajas de la Teledetección Satelital.....	8
1.4 Limitaciones y desafíos	13
1.5 Falta de Satélites Guatemaltecos	13
1.6 Resolución Espacial y Espectral de los Satélites Existentes.....	14
1.7 Validación con Mediciones en Tierra	14
2 SEGUNDO CAPÍTULO. SATÉLITE AURA Y SO₂	16
2.1 Introducción. Sistema de Observación Terrestre.....	16
2.2 El Instrumento de Medición de Ozono, OMI.....	20
2.3 Detectores de radiación a bordo de OMI.....	24
2.3.1 Detectores CCD (Charge-Coupled Device)	24
2.3.2 Espectrómetro de Imágenes Hiperespectrales	25
2.4 Rangos de Bandas Espectrales para SO ₂	25
2.4.1 UV-1 (270-310 nm)	25
2.4.2 UV-2 (310-340 nm)	26
2.4.3 Visible (350-500 nm)	26
2.5 Dimensiones y Resolución Espacial.....	27
2.5.1 Resolución Espacial Nominal.....	27
2.5.2 Resolución Mejorada	27
2.6 Capacidades y Funcionalidades	28
2.6.1 Hiperespectralidad	28
2.6.2 Auto-calibración Radiométrica y de Longitud de Onda.....	28
2.6.3 Diferenciación de Aerosoles.....	29

2.6.4	Medición de la Presión y Cobertura de Nubes	29
2.6.5	Años de vuelo satelital y mediciones de OMI.....	29
2.7	Procesamiento y Algoritmos	30
2.7.1	TOMS Versión 7	30
2.7.2	Recuperaciones Hiperespectrales BUV (Backscattered Ultraviolet).....	31
2.7.3	Modelado Directo	31
3	<i>TERCER CAPÍTULO. EL DIÓXIDO DE AZUFRE SO₂</i>.....	33
3.1	Antecedentes.....	33
3.2	Química del SO₂ en la Atmósfera	34
3.2.1	Emisión y Transformación del SO ₂ en la Atmósfera	34
3.2.2	Reacciones en la Fase Acuosa.....	35
3.2.3	Impactos Ambientales del SO ₂	36
3.2.4	Procesos Fotoquímicos y Formación de Aerosoles	36
3.2.5	Reactividad y Ciclo Atmosférico del SO ₂	37
3.3	Tiempo de vida del SO ₂ en la atmósfera terrestre	38
3.4	Fuentes principales de SO ₂	38
3.5	Consecuencias Atmosféricas y Terrestres de las Emisiones de SO ₂	39
4	<i>CUARTO CAPÍTULO. CARACTERIZACIÓN ESPACIAL, TEMPORAL Y METODOLOGÍA</i>	41
4.1	Aspectos Topográficos.....	41
4.2	Variaciones Climáticas de Guatemala.....	42
4.3	Distribución espacial	43
4.4	Niveles de procesamiento de Datos Satelitales	44
4.5	Temporalidad	46
4.6	Datos Satelitales. Plataforma Giovanni.....	47
4.7	Mapas de Abundancia	47
4.8	Series de Tiempo	48
4.9	Periodicidades	49
4.10	Capacitaciones NASA.....	49
5	<i>QUINTO CAPÍTULO. RESULTADOS</i>	51
5.1	Series temporales	51
5.1.1	Series temporales de promedios por estación climática.....	53
5.1.2	Series temporales de promedios anuales	56
5.2	Periodicidad.....	58
5.3	Distribución Espacial del Gas.....	60
6	<i>SEXTO CAPÍTULO. MODELO DE DISPERSIÓN. HYSPLIT</i>.....	65
6.1	Introducción	65

6.2	Breve descripción del modelo HYSPLIT	66
6.3	Importancia y aplicaciones del modelo en estudios ambientales.....	67
6.4	Fundamentos Teóricos del Modelo HYSPLIT.....	68
6.4.1	Conceptos básicos del transporte y dispersión atmosférica.....	68
6.4.2	Enfoque Lagrangiano.....	69
6.4.3	Enfoque Euleriano.....	70
6.4.4	Integración del Enfoque Híbrido	71
6.5	Configuración del Modelo HYSPLIT.....	72
6.5.1	Descripción de los diferentes tipos de simulaciones	72
6.5.2	Parámetros de entrada y su configuración	73
6.5.2.1	Datos Meteorológicos.....	73
6.5.2.2	Propiedades de las Partículas.....	74
6.5.2.3	Condiciones Iniciales y de Frontera	74
6.5.3	Trayectorias de Partículas	75
6.5.3.1	Cálculo de trayectorias adelantadas y retrasadas.....	75
6.6	Aplicaciones de HYSPLIT para el territorio de Guatemala.....	76
6.6.1	Modelado de Cenizas Volcánicas.....	77
6.6.1.1	Importancia del Monitoreo de Cenizas	77
6.6.1.2	Beneficios del Modelado de Cenizas y Gases	78
6.6.1.3	Caso de Estudio I: Erupción Volcán de Fuego junio 2018.....	78
6.6.2	Análisis de la Dispersión de Humo de Incendios.....	83
6.6.2.1	Caso de Estudio II: Incendio del Vertedero de Basura de AMSA.....	83
6.6.3	Dispersión de Contaminantes Industriales	87
6.6.3.1	Caso de Estudio III. Dispersión de Gases Contaminantes de Generadoras Eléctricas ⁸⁸	
	Conclusiones	91
	Recomendaciones.....	93

Indice de Figuras

Figura 1.1 Satélites	5
Figura 1.2 Sensores de Dióxido de Azufre	11
Figura 1.3 Densidad de población de Guatemala	12
Figura 2.1 The A Train	17
Figura 2.2 Satélite Aura.....	18
Figura 2.3 Detectores en OMI	20
Figura 2.4 OMI principios de medición	23
Figura 5.1 Abundancias de SO ₂	51
Figura 5.2 Abundancias de SO ₂	52
Figura 5.3 Anuales Invierno Región Sur	53
Figura 5.4 Anuales Invierno Región Norte	54
Figura 5.5 Anuales Verano Región Sur.....	55
Figura 5.6 Promedios Anuales Verano Región Norte.....	56
Figura 5.7 Promedios Anuales Región Sur	57
Figura 5.8 Promedios Anuales Norte.....	58
Figura 6.1 Dispersión de Cenizas	80
Figura 6.2 Evolución de las Cenizas y Gases.....	82
Figura 6.3 Dispersión de Contaminantes Incendio AMSA.....	85
Figura 6.4 Dispersión de Gases en Generadora Eléctrica	89

Indice de Tablas

Tabla 1.1 Estaciones de medición	10
Tabla 2.1 Instrumentos de Aura	19
Tabla 2.2 Detector de SO ₂ , instalado en el satélite AURA.....	22
Tabla 5.1 Períodos principales.....	59

Índice de Mapas

Mapa 4.1 Regiones de Guatemala.....	44
Mapa 5.1 Distribución de SO ₂ . 2005-2021	61
Mapa 5.2 Abundancias de SO ₂	62
Mapa 5.3 Concentración de SO ₂	63

Lista de Símbolos

Símbolo	Significado
SO ₂	Dióxido de azufre
CO ₂	Dióxido de carbono
CO	Monóxido de carbono
NO ₂	Dióxido de nitrógeno
CH ₄	Metano
N ₂ O	Óxido nitroso
O ₃	Ozono
H ₂ O	Agua
HSO ₃	Bisulfito
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
H ₂ SO ₃	Ácido sulfuroso
OH	Radical hidroxilo
SO ₃ ²⁻	Sulfito
DU	Unidades Dobson

Lista de Abreviaturas

OMI: Ozone Monitoring Instrument (Instrumento de Monitoreo de Ozono)

AOD: Aerosol Optical Depth (Profundidad Óptica de Aerosoles)

NASA: National Aeronautics and Space Administration (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio)

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica)

HYSPLIT: Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (Modelo de Trayectoria Integrada Lagrangiana de Partículas Híbridas)

FFT: Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)

LEO: Low Earth Orbit (Órbita Terrestre Baja)

SAR: Synthetic Aperture Radar (Radar de Apertura Sintética)

SCIAMACHY: Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric CHartography

S5P/TROPOMI: Sentinel-5 Precursor / TROPOspheric Monitoring Instrument

TES: Tropospheric Emission Spectrometer

MLS: Microwave Limb Sounder

HIRDLS: High Resolution Dynamics Limb Sounder

INSIVUMEH: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología

ICAyCC: Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático

Objetivos

General

Determinar con alta resolución espacial y temporal la abundancia de SO₂, que se encuentra en la capa límite planetaria (PBL), utilizando la teledetección satelital por medio del instrumento OMI del satélite Aura de NASA, en el territorio de Guatemala para conocer la dinámica de este compuesto.

Específicos

1. Obtener las bases de datos de las observaciones satelitales para el periodo de estudio.
2. Analizar las abundancias de SO₂ sobre el territorio de Guatemala para identificar tendencia interanual y evaluar si existe una periodicidad.
3. Determinar la periodicidad mensual o semanal aplicando métodos estadísticos en las series temporales de abundancias de SO₂ en el territorio de Guatemala.
4. Identificar o proponer un método de cuantificación de la contribución en la abundancia de SO₂ observada por satélite, diferenciando entre las emisiones naturales y las antropogénicas en el territorio nacional en el período 2005-2021.

Introducción

El análisis de las abundancias de dióxido de azufre (SO_2), las series temporales y la distribución espacial sobre Guatemala es un componente esencial para comprender los impactos ambientales y la química atmosférica en la región.

Este trabajo, titulado "Análisis de las abundancias, series temporales y distribución espacial del SO_2 sobre Guatemala basado en las observaciones del detector satelital OMI/AURA en el período de 2005 - 2021", profundiza en los detalles intrincados del SO_2 atmosférico, utilizando datos satelitales de vanguardia y técnicas de modelado. El estudio ofrece importantes conocimientos sobre las fuentes naturales y antropogénicas de SO_2 , explorando sus variaciones temporales, patrones espaciales y posibles impactos.

El dióxido de azufre es un contaminante atmosférico de corta vida, generado principalmente por la actividad volcánica, la quema de combustibles fósiles y los procesos industriales. Su presencia en la atmósfera está asociada con efectos ambientales adversos, incluyendo la formación de lluvia ácida, la reducción de la visibilidad y su contribución al calentamiento global a través de la formación de aerosoles.

Dado el contexto geográfico único de Guatemala, con varios volcanes activos y un sector industrial en crecimiento, el monitoreo de los niveles de SO_2 es crucial tanto para la gestión ambiental como para la protección de la salud de la población.

Una de las metodologías fundamentales empleadas en esta tesis es el uso de la teledetección satelital, aprovechando específicamente los datos del Instrumento de Monitoreo de Ozono (OMI) a bordo del satélite Aura de la NASA. OMI, en operación desde 2004, proporciona mediciones de buena resolución de SO_2 y otros contaminantes atmosféricos, lo que lo convierte en una herramienta invaluable para el monitoreo ambiental a largo plazo.

El estudio abarca 17 años de datos, desde 2005 hasta 2021, lo que permite un análisis exhaustivo de las tendencias temporales y la identificación de eventos significativos, como erupciones volcánicas y emisiones industriales.

Uno de los enfoques clave en este trabajo fue el análisis de la periodicidad de las abundancias de SO_2 , que se realizó mediante la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Esta técnica permitió identificar patrones cíclicos en los datos, ayudando a detectar posibles correlaciones entre las emisiones de SO_2 y las actividades volcánicas o industriales a lo largo del tiempo. El uso de FFT facilitó la identificación de ciclos recurrentes, como aquellos de 7 y 182 días, que se asocian con fenómenos estacionales y variaciones en la actividad humana. Este tipo de análisis es crucial para comprender cómo las variaciones periódicas en las concentraciones de SO_2 pueden estar influenciadas por factores naturales y antropogénicos, y cómo estos patrones podrían predecirse en el futuro.

El modelo híbrido Lagrangiano-Euleriano HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) se utilizó para simular el transporte y la dispersión del SO_2 a través de Guatemala. Este modelo combina las ventajas de los enfoques Lagrangianos y Eulerianos para proporcionar predicciones precisas del movimiento de contaminantes, lo cual es particularmente útil en terrenos complejos como Guatemala, donde la topografía juega un papel significativo en la dispersión de contaminantes.

Un enfoque significativo de la tesis fue la actividad volcánica en Guatemala, particularmente las erupciones de los volcanes Fuego, Pacaya y Santiaguito. El estudio detalló las emisiones de SO_2 de estas fuentes y su impacto subsecuente en la calidad del aire en la región. Utilizando el modelo HYSPLIT, la tesis demostró cómo las emisiones volcánicas se dispersan a lo largo del país, contribuyendo a la contaminación regional del aire y presentando riesgos para la salud humana y la seguridad de la aviación.

Además de las fuentes naturales, la tesis también abordó las emisiones antropogénicas, particularmente de plantas de energía basadas en combustibles fósiles y actividades industriales. La integración de datos y modelos de dispersión proporciona un marco robusto para evaluar la contribución de las actividades humanas a los niveles de SO₂ en Guatemala. Los hallazgos subrayan la importancia de un monitoreo continuo y la necesidad de regulaciones ambientales efectivas para mitigar los efectos adversos de la contaminación por SO₂.

Para diferenciar las emisiones de SO₂ provenientes de fuentes naturales, como los volcanes, de las de origen antropogénico, se implementaron diversas técnicas estadísticas, incluyendo el método de outliers. Estas técnicas permitieron identificar y separar concentraciones anómalas asociadas a eventos volcánicos, que tienden a generar picos significativos en comparación con las emisiones constantes de fuentes industriales. Al aplicar estos métodos de manera sistemática, se logró una mejor comprensión de las contribuciones relativas de cada fuente a la contaminación del aire, lo que facilita el desarrollo de estrategias de mitigación más efectivas para reducir los impactos del SO₂ en la salud humana y el medio ambiente. En conjunto, esta investigación doctoral no solo avanza en la comprensión científica de la dinámica del SO₂ en Guatemala, sino que también proporciona una valiosa base para futuros estudios y estrategias de gestión ambiental y mitigación de riesgos.

Los conocimientos obtenidos a partir de este trabajo tienen importantes implicaciones para la salud, las políticas ambientales y el desarrollo de sistemas de alerta temprana para erupciones volcánicas y accidentes industriales.

1 PRIMER CAPÍTULO. TELEDETECCIÓN SATELITAL DE SO₂

1.1 Introducción

La Tierra tiene un proceso natural de efecto invernadero que se origina por la emisión de pequeñas cantidades de gases como vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) [1]. Estos gases son liberados por el propio planeta, junto con aquellos que resultan de reacciones químicas en procesos naturales, como las erupciones volcánicas, que emiten grandes concentraciones de dióxido de azufre (SO₂) [1].

Estos gases permiten que la radiación solar atraviese la atmósfera, calentando la superficie terrestre, antes de que parte de esta radiación sea reflejada nuevamente hacia el espacio. Sin embargo, cuando la concentración de estos gases se incrementa, la radiación reflejada interactúa con la atmósfera y regresa a la Tierra. Este proceso provoca un calentamiento adicional en la superficie, lo que contribuye al efecto invernadero antropogénico, es decir, el causado por la actividad humana.

Si no existiera el proceso de efecto de invernadero natural de la Tierra, el planeta sería un lugar helado con una temperatura promedio de alrededor de -18°C [1], de modo que el efecto de invernadero natural, es necesario, para el desarrollo social y humano tal y como se conoce.

La actividad humana, principalmente la generación de energía para la industria, por medio de la quema de combustibles fósiles, refinerías y fundidoras aumenta significativamente las emisiones de contaminantes a la atmósfera [2], incrementando la concentración de SO₂, NO₂, CO₂, CH₄ y N₂O y por tanto provocando un aumento del efecto invernadero y el calentamiento terrestre [3].

Si las emisiones antropogénicas (emisiones provocadas por el hombre) de estos gases continúan, se observarán cambios importantes en el clima [4] y por ende impactará en el desarrollo de la humanidad y el medio ambiente [5].

Una de las industrias que provoca hasta dos tercios de las emisiones de gases de efecto de invernadero a nivel mundial, es la generación de energía eléctrica por medio de tecnologías convencionales como el bunker, gas, carbón y el bagazo de caña. Solo en el año de 2014, el 45% del CO₂ [3] emitido a la atmósfera provino de la producción eléctrica ya que un alto porcentaje de esta generación se hace a través del quemado de carbón, provocando que la producción energética por este tipo de tecnología sea una de las más contaminantes.

La contaminación del aire por ejemplo, fue responsable de 4,2 millones de muertes en 2016, esto consiste en aproximadamente el 7,6% de todas las muertes ocurridas en 2016 [6]. El 91% de la población mundial vive en regiones donde los niveles de contaminación del aire superan las directrices implementadas por la Organización Mundial de la Salud [6]; dentro de los contaminantes importantes del aire se encuentra: SO₂, O₃, NO₂, CO, CO₂, CH₄, entre otros.

El dióxido de azufre (SO₂) es un gas de vida corta en la atmósfera, cuya presencia proviene tanto de fuentes naturales como antropogénicas. En su forma natural, es liberado a través de fenómenos geológicos como las erupciones volcánicas, donde grandes cantidades de SO₂ se emiten hacia la atmósfera en periodos cortos de tiempo. También se genera en fuentes termales y ciertos tipos de incendios forestales que implican la quema de vegetación con contenido de azufre. Estos procesos naturales juegan un papel importante en los ciclos biogeoquímicos del azufre y en la composición de la atmósfera.

Por otro lado, el SO₂ también es producido por actividades humanas, especialmente por la quema de combustibles fósiles en procesos industriales. Una de las principales fuentes antropogénicas es la generación de electricidad mediante centrales térmicas que utilizan carbón, donde el azufre presente en el combustible

se oxida durante la combustión, liberando SO_2 al ambiente. Otras fuentes industriales incluyen la refinación de petróleo, la fundición de metales y la fabricación de productos químicos. Estas emisiones contribuyen significativamente a la contaminación del aire, incrementando los niveles de aerosoles de sulfato, que no solo afectan la salud humana, sino también el clima, ya que juegan un rol en el enfriamiento atmosférico al reflejar la radiación solar.

Aunque el SO_2 tiene una vida corta en la atmósfera, sus efectos son considerables debido a su rápida transformación en ácido sulfúrico y sulfatos, que son componentes clave en la formación de lluvia ácida y aerosoles. Esta transformación afecta tanto los ecosistemas como la calidad del aire en regiones industrializadas y cercanas a volcanes activos. Además, las emisiones industriales de SO_2 son un desafío importante para los esfuerzos de mitigación del cambio climático, ya que aunque los aerosoles reflejan parte de la radiación solar, su impacto en la salud y el medio ambiente es severo.

Exposiciones constantes a este gas afectan todo el entorno de la biósfera del planeta, tanto la salud del ser humano, incrementando las afecciones respiratorias [7] y la morbilidad cardiovascular, como la flora y la fauna debido al incremento de la lluvia ácida sobre los ecosistemas [8], impactando finalmente el clima.

1.2 Aplicaciones al estudio de la atmósfera

El monitoreo del dióxido de azufre (SO_2) y otros gases contaminantes desde satélites, utilizando teledetección usado en bandas espectrales ultravioleta (UV) e infrarroja (IR), fue propuesto mucho antes de que existieran instrumentos satelitales capaces de realizar estas mediciones [9]. Las primeras observaciones satelitales de SO_2 se registraron en 1979, a través del satélite Voyager 1, que estudió la atmósfera de “Io”, una luna de Júpiter [10].

En la atmósfera terrestre, la erupción del volcán El Chichón en 1983 liberó una gran cantidad de SO₂, que fue detectada por el Espectrómetro de Mapeo de Ozono Total (TOMS) [11] y el instrumento Ultravioleta de Retrodispersión Solar (SBUV) [12] ambos instalados en el satélite Nimbus 7 de la NASA.

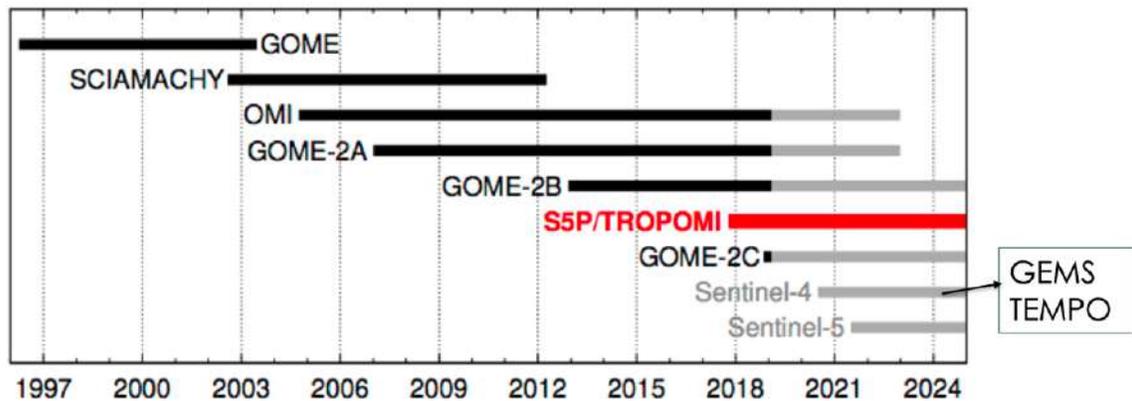
En los años siguientes, los datos del Espectrómetro de Mapeo Total de Ozono (TOMS) a bordo de los satélites Nimbus 7 y Earth Probe se utilizaron para monitorear las emisiones de SO₂ provenientes de erupciones volcánicas explosivas y no explosivas [13]. [14] [15]

Además, se ha demostrado que el TOMS podía detectar emisiones antropogénicas de SO₂, aunque solo cuando las concentraciones atmosféricas eran excepcionalmente altas [16].

El Experimento de Monitoreo Global de Ozono (GOME), en el satélite ERS-2 lanzado en 1995, mostró que las fuentes antropogénicas de SO₂, como las plantas de energía en Europa del Este [17] y las fundiciones en Perú y Rusia [18] pueden ser monitoreadas desde el espacio.

En los últimos 15 años, se han lanzado tres instrumentos a bordo de satélite en el rango UV capaces de detectar SO₂ cerca de la superficie: el SCIAMACHY, operando en el satélite ENVISAT entre 2002 y 2012 [19], el GOME-2, en el satélite MetOp-A desde 2006 hasta el presente [20]; y el Ozone Monitoring Instrument (OMI) en el satélite Aura de la NASA desde 2004 hasta el presente [21].

Figura 1.1 Satélites



Nota. Satélites que desde 1997 orbitan la Tierra, coleccionando datos y variables climáticas. Tomado de [22].

OMI ofrece mapas casi globales diarios de las densidades de columna vertical de SO_2 , posee la mayor resolución espacial, la operación más prolongada y la menor degradación, siendo el más sensible a las fuentes de SO_2 entre los instrumentos de su clase [23].

La figura No. 1.1 muestra una cronología de los satélites que han sido y serán utilizados para la recopilación de datos atmosféricos, específicamente para la monitorización de gases como el dióxido de azufre. Entre ellos, destacan satélites como SCIAMACHY, GOME, OMI, y los más recientes S5P/TROPOMI, Sentinel-4 y Sentinel-5. Cada uno de estos satélites ha contribuido significativamente a la comprensión de la composición atmosférica y a la observación del cambio climático y la contaminación del aire.

Es importante resaltar que el satélite Aura, que lleva a bordo el instrumento OMI (Ozone Monitoring Instrument), ha sido uno de los más longevos en operación, iniciando su misión en 2004 y continuando hasta la actualidad. Esto lo convierte en uno de los satélites más valiosos para la recolección de datos sobre la abundancia de SO_2 a nivel global. Su capacidad para capturar datos a lo largo de un período prolongado ha permitido [24] observar tendencias a largo plazo en la abundancia

de SO₂, identificar patrones estacionales, y analizar la influencia de diferentes fuentes de emisión, tanto naturales como antropogénicas.

La continuidad en la recopilación de datos por parte de Aura es crucial, especialmente en el contexto de la transición hacia nuevas misiones como Sentinel-4 y Sentinel-5, que continuarán el trabajo iniciado por sus predecesores.

Las densidades de columnas verticales de SO₂ también se pueden obtener a partir de mediciones satelitales en el espectro infrarrojo térmico. Este tipo de medición, utilizada por instrumentos como el Interferómetro de Sondeo Atmosférico Infrarrojo (IASI), ha sido empleada para rastrear SO₂ de erupciones volcánicas [25] [26], el transporte transcontinental de SO₂ desde China [27] y las emisiones antropogénicas de Norilsk, Rusia [28]. Sin embargo, debido a que las mediciones en el IR dependen del contraste de temperatura entre la superficie y el aire superior, tienen una sensibilidad reducida a la capa límite y solo pueden detectar las fuentes más grandes.

Las mediciones satelitales de gases traza se utilizan cada vez más para monitorear emisiones [29]. En particular, las observaciones satelitales de SO₂ se utilizan ampliamente para calcular presupuestos volcánicos de SO₂ y rastrear penachos de erupciones volcánicas [13] [30]. Una revisión reciente de técnicas para derivar flujos volcánicos de SO₂ utilizando mediciones satelitales de penachos y para investigar la evolución temporal de las emisiones totales de SO₂ fue presentada por [31].

Sin embargo, resulta más complicado monitorear las emisiones de fuentes antropogénicas relativamente pequeñas. Los datos de SO₂ del OMI se han utilizado para estudiar la evolución de las emisiones regionales en China [32] [33] y Estados Unidos [34].

Los instrumentos satelitales han demostrado ser capaces de detectar señales de SO₂ provenientes de diversas fuentes puntuales antropogénicas, como plantas de energía, fundiciones de cobre y níquel, y minas de arenas petrolíferas en Canadá, entre otras [16] [23] [35], y de estimar las emisiones de estas fuentes.

El algoritmo de 'Análisis de Componentes Principales' (PCA) desarrollado recientemente por la NASA [36] ha mejorado significativamente la calidad de los datos del OMI, reduciendo el ruido y eliminando la mayoría de los artefactos presentes en versiones anteriores de los productos de datos de SO₂. Esta mejora ha permitido que los productos del OMI sean aún más efectivos para monitorear fuentes antropogénicas que emiten tan solo 30 kt por año [37].

El Instituto Belga de Aeronomía Espacial (BIRA-IASB) ha reprocesado las mediciones del OMI utilizando un nuevo algoritmo DOAS (espectroscopía de absorción óptica diferencial) para SO₂, que sirve como prototipo para el algoritmo que se utiliza en la misión Sentinel 5 Precursor (TROPOMI) de la ESA [38]. Aunque la mayor parte de los resultados de este estudio se basan en los datos PCA de la NASA, también se han evaluado los datos DOAS del BIRA.

En este estudio se analizan las distribuciones espaciales globales y regionales de SO₂, así como su evolución temporal basadas en observaciones del OMI [39]. A diferencia de los mapas de NO₂, donde las fuentes detectadas por el OMI son numerosas, los mapas globales de SO₂ no son tan informativos debido a que las concentraciones altas de SO₂ se observan solo cerca de un número relativamente pequeño de fuentes puntuales, mientras que en otros lugares las concentraciones están por debajo del límite de detección del OMI. Sin embargo, hay regiones como el este de China y el este de Estados Unidos que cuentan con cientos de fuentes individuales de SO₂, principalmente plantas de energía, como se detalla en [39], pero estas regiones son excepcionales.

1.3 Ventajas de la Teledetección Satelital

Existen diversos tipos de sensores diseñados para medir el dióxido de azufre, principalmente instalados en estaciones terrestres. Sin embargo, el alto costo de estos dispositivos dificulta su implementación en países como Guatemala, lo que hace inviable contar con una red confiable y extensiva de detección de este gas, Incluso para los países desarrollados, existen regiones pobladas que no poseen detección de SO₂, debido al alto costo de los detectores [34].

Debido a que el dióxido de azufre, sube a las capas de la atmósfera, dentro de lo que se conoce como la capa PBL, 'Planetary Boundary Layer' por sus siglas en inglés [1], es fundamental llevar a cabo mediciones aéreas utilizando sensores instalados en aeronaves, los cuales pueden realizar un barrido a diferentes altitudes en intervalos periódicos para detectar abundancias de SO₂. Este método permite obtener una imagen más precisa de la distribución vertical del gas en la atmósfera, [40], [41], lo cual para Guatemala es un proyecto alto en costos económicos y no funcional, estas mediciones aéreas no son necesarias cuando se realiza la detección satelital, lo cual brinda una muy buena herramienta de detección.

Los llamados países desarrollados, poseen una red de sensores de dióxido de azufre por diferentes partes de su territorio, sin embargo, no logran detectar todas las áreas densamente pobladas.

Guatemala, no posee detectores de SO₂, para los volcanes activos, sólo se hacen mediciones eventuales en tierra cuando existe alguna actividad considerable [15], y las únicas mediciones que se hacen son por medio de algunas estaciones terrestres que se encuentran en la capital [42], pero no logran dar un panorama general de todo el país, tampoco se cuenta con mediciones aéreas que puedan dar un estimado de las emisiones de los volcanes y mucho menos de la contribución por la actividad humana.

Guatemala no posee mediciones periódicas en todo el territorio, y tampoco posee estimación de las tendencias a futuro de este gas y mucho menos mapas de distribución de abundancias, en donde se pueda observar las regiones de mayor o menor concentración de SO₂.

En el territorio guatemalteco, existen algunas mediciones de SO₂, en los años 2006 y 2012, para el volcán de Pacaya y Fuego [43], otra medición aislada del volcán de Pacaya realizada por Prandi et al. [44], una medición del año 2012 sobre el volcán Santiaguito [45], por lo que, no existen mediciones constantes de este contaminante y las pocas existentes para las erupciones volcánicas son en tierra y para fechas muy dispersas, 1993 al 2012.

Rodríguez [15] realiza para los años 1999 – 2002, algunas mediciones sobre los volcanes activos de Guatemala y el Salvador, pero no muestra tendencias ni se realizan estudios estacionales o de series temporales.

Las mediciones en ciudades, para el territorio Guatemalteco son muy escasas, el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH, posee 4 estaciones de medición: Puerto Barrios, Quetzaltenango, Escuintla y Guatemala, pero sus detectores no funcionan desde el año 2016 [46], por falta de mantenimiento.

La facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, posee mediciones constantes en tierra, pero solamente para 3 estaciones: Musac, Incap y el edificio T-10 de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Estas mediciones abarcan un período que va desde el año 2002 al 2018 [42], sin embargo siguen siendo muy pocas mediciones para realizar un estudio completo del SO₂.

Un análisis detallado de las abundancias de SO₂ en el territorio nacional por medio de la investigación de series temporales y teledetección satelital, es de gran

importancia para la implementación de buenas prácticas de salud y medioambientales.

Es importante señalar también, que, mediante el estudio de la evolución de la abundancia de SO₂, se pueden modelar alteraciones climáticas provocadas por el exceso de este contaminante, de esto se habla más adelante.

A continuación, se presenta la tabla 1.1 donde se resumen las estaciones de medición de Guatemala

Tabla 1.1

Estaciones de medición

	Página web del Sensor	Cantidad de Sensores
1	https://aqicn.org/map/guatemala/es/	14 estaciones en la capital
2	http://hidromet.insivumeh.gob.gt/calidad/aire/redestaciones.htm#Guatemala	4 estaciones en Guatemala, Pto. Barrios, Xela y Escuintla, no funcionan desde 2016
3	www.marn.gob.gt/Multimadios/7907.pdf	10 puntos de medición, datos del 2013
4	Facultad de Farmacia	3 estaciones de medición: T10, Musac, Incap. Tiene datos desde 1999 al 2018. Para el SO ₂ datos del 2002 al 2018

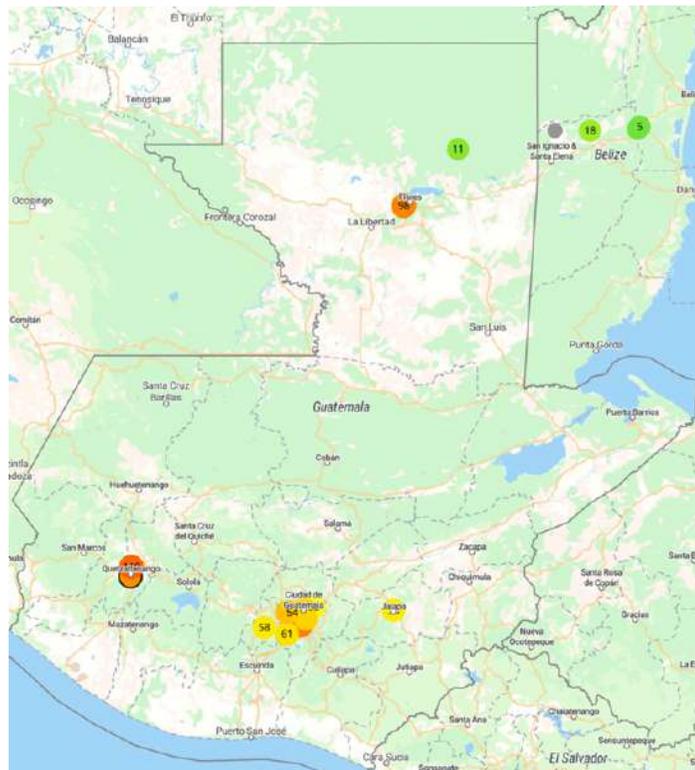
Nota. Estaciones de medición de SO₂ en Guatemala. Fuente: Elaboración propia.

Existen detectores de diferentes tipos que han sido instalados en los satélites por parte de la Administración Espacial Aeronáutica de Estados Unidos (NASA, por sus siglas en inglés), estos satélites pueden tomar medidas todos los días de la huella de radiofrecuencia de diferentes contaminantes, con una resolución espacial bastante alta.

La Figura No. 1.2 ilustra la distribución de Guatemala de la red de sensores terrestres de SO₂, destacando la existencia de áreas con alta densidad poblacional que carecen significativamente de estos detectores.

Al comparar la Figura No. 1.2 con la Figura No. 1.3, que muestra la distribución de la densidad poblacional, se hace evidente que muchas de las regiones más densamente pobladas de Guatemala especialmente en áreas urbanas de rápido crecimiento, están subrepresentadas en términos de monitoreo de dióxido de azufre. Esta disparidad afirma aún más la necesidad de mediciones satelitales.

Figura 1.2 *Sensores de Dióxido de Azufre*



Nota. Sensores de Dióxido de Azufre en el territorio de Guatemala, tomado de [47].

Figura 1.3 Densidad de población de Guatemala



Nota. Densidad poblacional de cada uno de los departamentos de Guatemala [48].

En síntesis, las ventajas de la teledetección satelital de acuerdo con [49] son:

- Proporciona información de abundancias en donde no hay detectores terrestres.
- Proporciona observaciones consistentes a nivel mundial.
- Proporciona un monitoreo continuo de nuestro planeta.
- Los modelos de sistemas terrestres integran observaciones en el suelo y de teledetección y proporcionan información frecuente de parámetros de datos cuadrículados de diferentes recursos de manera uniforme y constante.
- Los datos están libremente disponibles y hay herramientas en línea para el análisis de datos.

1.4 Limitaciones y desafíos

La implementación de la teledetección satelital para el monitoreo de gases como el dióxido de azufre (SO₂) en Guatemala presenta una serie de limitaciones y desafíos significativos. Este apartado detalla estos aspectos, abarcando la falta de satélites propios, la insuficiente resolución de los satélites existentes, y la necesidad de validación con mediciones en tierra que actualmente no se realizan debido a la ausencia de detectores.

1.5 Falta de Satélites Guatemaltecos

Guatemala, al igual que muchos otros países en desarrollo, no cuenta con una infraestructura espacial propia que permita la construcción y lanzamiento de satélites dedicados a la observación de su territorio.

La ausencia de satélites nacionales limita la capacidad del país para realizar mediciones específicas y frecuentes de los niveles de SO₂ y otros contaminantes atmosféricos.

Dependiendo completamente de satélites internacionales, Guatemala no tiene control sobre los parámetros de misión, frecuencias de recolección de datos y especificaciones técnicas de los instrumentos a bordo. Esta dependencia puede resultar en una falta de datos precisos y personalizados que podrían ser cruciales para abordar problemas ambientales y de salud pública a nivel local. Además, la falta de infraestructura y tecnología espacial propia impide al país desarrollar capacidades técnicas y científicas en el campo de la teledetección, lo que podría ser una ventaja significativa para la gestión ambiental y el desarrollo sostenible.

1.6 Resolución Espacial y Espectral de los Satélites Existentes

Aunque existen varios satélites internacionales que cubren el territorio de Guatemala de los que se hablará más adelante, muchos de ellos no poseen una alta resolución espacial y espectral necesaria para realizar mediciones detalladas de SO₂. Instrumentos como el Ozone Monitoring Instrument (OMI) en el satélite Aura de la NASA proporcionan datos valiosos a nivel global, pero su resolución puede no ser suficiente para identificar y cuantificar fuentes puntuales de emisión en áreas geográficas pequeñas como Guatemala.

La resolución espacial limitada implica que las mediciones pueden promediarse sobre áreas grandes, diluyendo así las señales de emisiones locales específicas. Esto puede dificultar la identificación precisa de fuentes de contaminación y la implementación de medidas de control específicas.

Además, la resolución espectral limitada puede afectar la capacidad de diferenciar entre varios gases traza presentes en la atmósfera, lo que es crucial para un monitoreo ambiental efectivo y preciso.

1.7 Validación con Mediciones en Tierra

Las mediciones de abundancias de SO₂ obtenidas mediante satélites deben ser validadas con datos obtenidos en tierra para asegurar su precisión y fiabilidad. Sin embargo, en Guatemala, la infraestructura para realizar estas mediciones terrestres es prácticamente inexistente. La falta de detectores en tierra implica que no hay datos de referencia con los cuales comparar las mediciones satelitales, lo que puede generar incertidumbre sobre la exactitud de estos datos.

Las estaciones de monitoreo en tierra son esenciales para calibrar y validar las mediciones satelitales, corregir posibles sesgos y mejorar los algoritmos de detección y análisis. Sin estos puntos de referencia, se hace difícil determinar la

veracidad de las concentraciones de SO₂ reportadas por los satélites, lo que puede afectar negativamente las decisiones de políticas ambientales y la evaluación de los riesgos para la salud pública. La implementación de una red de estaciones de monitoreo en tierra en Guatemala debe ser el siguiente paso crucial para mejorar la calidad y fiabilidad de los datos de teledetección.

Es posible sintetizar [22] las limitaciones en la utilización de la teledetección satelital en los siguientes puntos específicos :

- Es complicado obtener resolución espectral, espacial temporal y radiométrica alta al mismo tiempo.
- Las grandes cantidades de datos en una variedad de formatos pueden requerir más tiempo y procesamiento.
- La aplicación de datos satelitales podría requerir procesamiento, visualización y herramientas adicionales.
- Aunque los datos por lo general se validan con mediciones selectas en la superficie, se recomienda evaluar a nivel regional y local.

2 SEGUNDO CAPÍTULO. SATÉLITE AURA Y SO₂

2.1 Introducción. Sistema de Observación Terrestre

El programa del Sistema de Observación Terrestre (EOS) se inició a finales de los años 80, seleccionando una amplia variedad de instrumentos de ciencias terrestres y equipos científicos interdisciplinarios.

Inicialmente, el programa EOS se planificó para operar en dos plataformas (EOS A y B), pero las limitaciones presupuestarias llevaron a una reestructuración. Actualmente, el EOS está compuesto por tres plataformas principales: Terra, Aqua y Aura, además de varios satélites más pequeños como SORCE e ICESAT [21].

Terra, lanzado a finales de 1999 y conocido anteriormente como EOS AM, está dedicado a estudiar los procesos terrestres. Aqua, lanzado a principios de 2002 y anteriormente conocido como EOS PM, se concentra para el estudio del ciclo hidrológico de la atmósfera.

Aura, cuyo nombre en latín significa brisa y anteriormente conocido como EOS CHEM, se especializa en la composición atmosférica. Lanzado el 15 de julio de 2004, Aura orbita a una altitud de 705 km en una órbita polar sincrónica al sol con una inclinación de 98 grados y un tiempo de cruce del ecuador de 13:45 +/- 15 minutos [50]. Su tiempo de vida útil fue diseñado para cinco años, con un objetivo operativo de seis años, y vuela aproximadamente 15 minutos detrás de Aqua.

CALIPSO y Cloudsat, que se lanzaron juntos en abril de 2006 [51], vuelan detrás de Aqua unos minutos después. Este grupo de satélites incluye también al satélite PARASOL del CNES, lanzado en diciembre de 2004, y el Observatorio en Órbita de Carbono (OCO) del ESSP, lanzado en el 2008. A este grupo de satélites se les conoce como el 'A-Train' (figura 2.1) y realizan mediciones dentro de un intervalo de 30 minutos.

El Microwave Limb Sounder (MLS) se utiliza para medir concentraciones de gases traza, la temperatura y el vapor de agua en la atmósfera superior.

El High Resolution Dynamics Limb Sounder (HIRDLS) fue diseñado para observar la temperatura y las concentraciones de gases en la estratosfera. El Ozone Monitoring Instrument (OMI) se encarga de medir la columna total de ozono y otros contaminantes atmosféricos, como el dióxido de azufre (SO_2), con alta precisión. Por último, el Tropospheric Emission Spectrometer (TES) mide gases traza y perfiles de temperatura en la troposfera. Estos instrumentos, al trabajar de manera conjunta, proporcionan datos esenciales para comprender mejor la dinámica y la composición de la atmósfera, facilitando estudios sobre el cambio climático, la calidad del aire y la capa de ozono.

Figura 2.2 *Satélite Aura*



Nota. Modelo del Satélite Aura, mostrando los cuatro instrumentos de medición. Tomado de [21].

La Tabla 2.1 presenta gráficamente el rango vertical de las diversas mediciones de Aura y los instrumentos que las realizan. Para el caso particular de esta investigación, se utilizan los elementos característicos del detector OMI, ya que presenta las mediciones de las abundancias del compuesto SO_2 que es el de interés.

Tabla 2.1*Instrumentos de Aura*

Acronym	Name	Instrument PI	Constituent	Instrument Description
HIRDLS	High Resolution Dynamics Limb Sounder	John Gille, National Center for Atmospheric Research & U. of Colorado; John Barnett, Oxford University	Profiles of T, O ₃ , H ₂ O, CH ₄ , N ₂ O, NO ₂ , HNO ₃ , N ₂ O ₅ , CF ₃ Cl, CF ₂ Cl ₂ , ClONO ₂ , Aerosols	Limb IR filter radiometer from 6.2 μ to 17.76 μ 1.2 km vertical resolution up to 50 km.
MLS	Microwave Limb Sounder	Joe Waters, Jet Propulsion Laboratory	Profiles of T, H ₂ O, O ₃ , ClO, BrO, HCl, OH, HO ₂ , HNO ₃ , HCN, N ₂ O, CO, cloud ice.	Microwave limb sounder 118 GHz to 2.5 THz 1.5-3 km vertical resolution
OMI	Ozone Monitoring Instrument	Pieter Levelt, KNMI, Netherlands	Column O ₃ , SO ₂ , aerosols, NO ₂ , BrO, OCIO, HCHO, cloud top pressure, O ₃ profiles, UV-B.	Hyperspectral nadir imager, 114° FOV, 270-500 nm, 13x24 km footprint for ozone and aerosols
TES	Tropospheric Emission Spectrometer	Reinhard Beer, Mike Gunson, Jet Propulsion Laboratory	Profiles of T, O ₃ , NO ₂ , CO, HNO ₃ , CH ₄ , H ₂ O.	Limb (to 34 km) and nadir IR Fourier transform spectrometer 3.2-15.4 μ Nadir footprint 5.3x8.5 km, limb 2.3 km

Nota. Instrumentos de Aura y los gases que pueden medir. Tomado de [50].

Existen detectores de diferentes tipos que han sido instalados en los satélites por parte de la Administración Espacial Aeronáutica de Estados Unidos (NASA), por sus siglas en inglés, estos satélites pueden tomar medidas todos los días de la huella de radiofrecuencia de diferentes contaminantes, con una resolución espacial bastante alta.

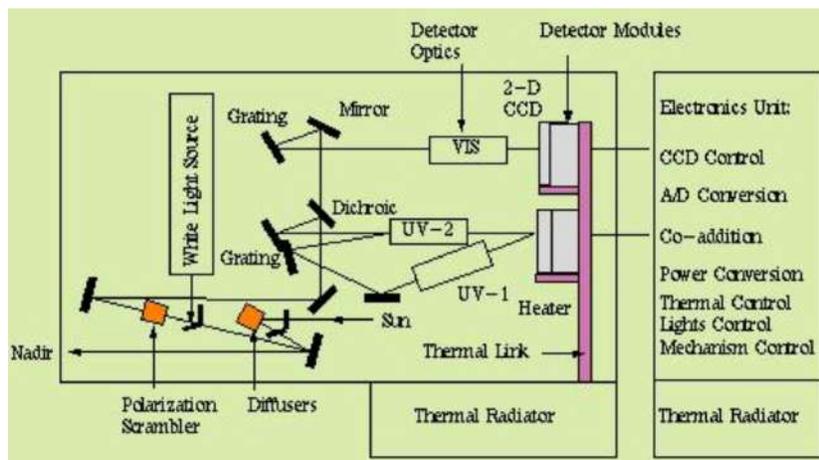
El satélite AURA, es un dispositivo con una órbita polar, hace un recorrido completo de todo el planeta al día, dentro de este satélite se encuentra el sensor, *Ozone Monitoring Instrument*, OMI, por sus siglas en inglés [50], el cual posee tres detectores, 2 en el rango UV y 1 en el rango visible del espectro electromagnético, capacitados para identificar la huella de radiación producida por el SO₂ en diferentes capas atmosféricas [34], esto implica que es posible discriminar y cuantificar las

abundancias de SO₂ de origen natural y antropogénico [52], de este detector en particular se hablará más adelante.

2.2 El Instrumento de Medición de Ozono, OMI

El instrumento OMI es una contribución de la Agencia de Programas Aeroespaciales de los Países Bajos (NIVR) en colaboración con el Instituto Meteorológico de Finlandia (FMI) para la misión EOS Aura. OMI continúa con el registro del satélite TOMS para el ozono total y otros parámetros atmosféricos relacionados con la química del ozono y el clima [50]. La figura 2.3 muestra el arreglo de detectores y unidades de OMI [53].

Figura 2.3 Detectores en OMI



Nota. Arreglo de detectores dentro de OMI [53].

Las mediciones de OMI son altamente complementarias con las mediciones de los otros instrumentos en la plataforma EOS Aura.

El instrumento OMI emplea imágenes hiperespectrales en modo de barrido para observar la radiación solar de retrodispersión en el visible y ultravioleta. La

Tierra es observada en 740 bandas de longitud de onda a lo largo de la trayectoria del satélite con un barrido lo suficientemente grande como para proporcionar cobertura global en 14 órbitas (un día) [50].

La resolución espacial nominal de 13 x 24 km puede ser ajustada a 13 x 13 km para detectar y rastrear fuentes de contaminación a escala urbana. Las capacidades hiperespectrales mejoran la precisión y exactitud de las cantidades totales de ozono y también permite una auto-calibración radiométrica y de longitud de onda precisa a largo plazo.

Además de las mediciones enumeradas en la Tabla 2.1, el instrumento OMI distingue entre tipos de aerosoles, como humo, polvo y sulfatos, y puede medir la presión y cobertura de nubes, lo que proporciona datos para obtener el ozono troposférico.

Se utiliza una combinación de algoritmos, incluidos TOMS versión 7, espectroscopía de absorción óptica diferencial (DOAS), recuperaciones hiperespectrales BUV y modelado directo, para extraer los diversos productos de datos de OMI.

Después de un período de desgasificación y enfriamiento, OMI comenzó a producir datos en octubre de 2004.

La tabla No. 2.2 muestra las propiedades del detector OMI, el cual se utiliza para la obtención de la abundancia de moléculas de SO₂ para Guatemala, en donde se pueden observar sus capacidades tecnológicas para poder realizarlo.

Tabla 2.2*Detector UV-2, instalado en el satélite AURA*

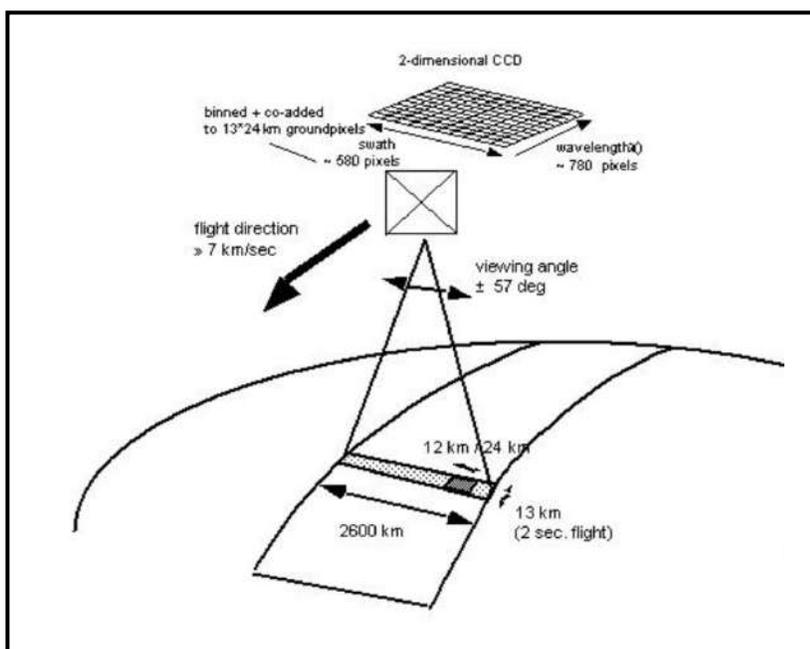
Propiedades de la medición		SO₂
Longitud de onda	310.5 ----- 340 nm	
Detector de medición	UV - 2	
Algoritmos de datos	BRD- Band Residual Difference PCA – Principal Component Analysis	
Correcciones atmosféricas	AMF – Air Mass Factor	
Mediciones en columna	PBL	0.9 Km
	Tropósfera baja	2.5 Km
	Tropósfera media	7.5 Km
	Estratósfera	17 Km
Incerteza	0.5 – 0.9 DU	
Modelo de transferencia radiativa	VLIDORT	

Nota. Características de las mediciones de SO₂. Elaboración propia tomado de [54] y [50].

El sensor OMI de la NASA [2] que posee un detector para cuantificar SO₂, es el que más tiempo y con mayor resolución ha estado coleccionando datos, desde octubre 2004 a la fecha actual.

Todos los detalles de la electrónica, óptica y los diferentes sensores de radiación que se encuentran en el OMI, se han estudiado a partir del desarrollo realizado por Levelt en el artículo ‘The Ozone Monitoring Instrument’ [50].

Figura 2.4 OMI principios de medición



Nota. Principios de medición de OMI. Tomado de [50].

La figura 2.4 ilustra el principio de medición del Ozone Monitoring Instrument, que mide la radiación solar reflejada desde la superficie terrestre y dispersada en la atmósfera. OMI utiliza un detector CCD bidimensional para capturar imágenes en múltiples longitudes de onda de la radiación ultravioleta y visible que ha interactuado con la atmósfera. Al volar a aproximadamente 7 km/segundo, el sensor captura un barrido (swath) de 2600 km de ancho, lo que permite una cobertura global diaria. Este ángulo de visión amplio de alrededor de 57 grados es crucial para obtener una alta resolución espacial de 13 km x 24 km, permitiendo detectar contaminantes como el dióxido de azufre (SO_2) y el ozono (O_3) con gran detalle.

La figura también resalta cómo los datos capturados por el OMI son procesados. Los píxeles detectados por el CCD se combinan y se suman para formar píxeles de terreno con una resolución específica, que luego se usan para crear mapas de abundancia de gases en la atmósfera. La capacidad de OMI para observar una amplia franja de la Tierra en cada órbita, junto con su alta resolución

espectral y espacial, lo convierte en una herramienta esencial para el monitoreo continuo de la calidad del aire y la composición atmosférica a escala global.

2.3 Detectores de radiación a bordo de OMI

OMI emplea un espectrómetro de imágenes hiperespectrales en modo de barrido ("pushbroom") para observar la radiación solar retrodispersada en las bandas ultravioleta (UV) y visible. La estructura del instrumento está diseñada para maximizar la precisión y la resolución espacial y espectral de las mediciones.

2.3.1 Detectores CCD (Charge-Coupled Device)

OMI utiliza detectores CCD para captar la radiación en múltiples bandas espectrales. Estos detectores son sensibles a la luz ultravioleta y visible, permitiendo una cobertura espectral amplia. Los detectores CCD son esenciales para convertir la radiación electromagnética en señales eléctricas que luego pueden ser procesadas para obtener datos sobre las abundancias del SO₂ [50]. Estos detectores funcionan mediante la acumulación de cargas eléctricas en respuesta a la radiación incidente, y luego estas cargas se transfieren a través del dispositivo para su lectura y procesamiento.

Los CCDs en OMI están diseñados para proporcionar una alta resolución espectral, lo que significa que pueden diferenciar con precisión entre diferentes longitudes de onda de luz. Esto es crucial para identificar las firmas espectrales específicas del SO₂ y otros gases traza. Además, los CCDs son conocidos por su alta eficiencia cuántica, lo que significa que pueden detectar incluso niveles bajos de radiación con una alta sensibilidad, mejorando la precisión de las mediciones en condiciones de baja luz o alta dispersión atmosférica [50].

2.3.2 Espectrómetro de Imágenes Hiperespectrales

Este componente descompone la luz recibida en sus diferentes longitudes de onda, permitiendo una resolución espectral detallada. OMI cubre un rango espectral desde aproximadamente 270 nm hasta 500 nm, lo que incluye bandas críticas para la detección de SO₂ [52]. El espectrómetro utiliza una rejilla de difracción para dispersar la luz en sus componentes espectrales, que luego son capturados por los detectores CCD.

La capacidad hiperespectral del espectrómetro permite a OMI capturar datos en cientos de bandas estrechas, en contraste con los sistemas multispectrales que sólo capturan en unas pocas bandas anchas. Esta alta resolución espectral es esencial para diferenciar entre el SO₂ y otros gases que pueden tener características de absorción superpuestas. Además, permite la corrección de efectos atmosféricos y la calibración interna, mejorando la precisión de las mediciones a lo largo del tiempo [52].

2.4 Rangos de Bandas Espectrales para SO₂

OMI observa la radiación solar retrodispersada en 740 bandas de longitud de onda a lo largo de la trayectoria del satélite. Las bandas específicas utilizadas para la detección de SO₂ se encuentran en el rango ultravioleta, particularmente entre 310 y 340 nm, donde el SO₂ tiene una fuerte absorción característica [52].

2.4.1 UV-1 (270-310 nm)

Este rango es crucial para la detección de ozono y otros gases traza, aunque no se utiliza directamente para SO₂ [21]. La capacidad de OMI para medir en este rango permite una mejor comprensión de la química atmosférica general, ya que el ozono tiene una fuerte absorción en estas longitudes de onda, lo que puede interferir con la detección de otros gases si no se corrige adecuadamente.

La información obtenida en este rango también es útil para la calibración del instrumento y para mejorar la precisión de las mediciones en otros rangos espectrales. Al tener datos precisos sobre el ozono y otros gases traza en el rango UV-1, es posible ajustar las mediciones en el rango UV-2 para asegurar que las abundancias de SO₂ se midan con la mayor exactitud posible [52].

2.4.2 UV-2 (310-340 nm)

Este es el rango principal para la detección de SO₂. La absorción del SO₂ en esta banda permite la identificación y cuantificación precisa del gas en la atmósfera [52]. La fuerte absorción del SO₂ en este rango de longitudes de onda significa que incluso pequeñas abundancias del gas pueden ser detectadas, lo que es crucial para el monitoreo de emisiones tanto naturales como antropogénicas.

La alta resolución espectral en este rango también permite diferenciar el SO₂ de otros gases que pueden estar presentes en la atmósfera. Esto es particularmente importante en áreas urbanas e industriales donde múltiples fuentes de contaminación pueden coexistir. La capacidad de OMI para capturar datos en este rango con alta precisión mejora significativamente la calidad de los datos ambientales disponibles para los científicos y responsables de políticas [50].

2.4.3 Visible (350-500 nm)

Aunque no es el rango principal para SO₂, estas bandas ayudan a caracterizar aerosoles y nubes, proporcionando contexto adicional para las mediciones de SO₂ [50]. Los aerosoles pueden afectar la retrodispersión de la radiación solar, y su caracterización es importante para corregir las mediciones de SO₂ y mejorar su precisión.

Además, la medición de la cobertura y presión de las nubes en el rango visible proporciona datos complementarios que son esenciales para derivar el contenido de ozono troposférico. La integración de estos datos permite una mejor comprensión

de la dinámica atmosférica y las interacciones entre diferentes componentes atmosféricos, lo que mejora la precisión de las mediciones de SO₂ [52].

2.5 Dimensiones y Resolución Espacial

La resolución espacial de OMI es una de sus características destacadas, permitiendo detectar y rastrear fuentes de contaminación a escala urbana.

2.5.1 Resolución Espacial Nominal

La resolución nominal es de 13 x 24 km [50], esta es suficiente para proporcionar datos detallados sobre las abundancias de SO₂ a nivel regional y global. Permite identificar grandes fuentes de emisión y evaluar su impacto en la calidad del aire en áreas extensas.

La cobertura global en 14 órbitas diarias asegura que los datos sean actualizados frecuentemente, proporcionando un monitoreo casi en tiempo real de las abundancias de SO₂. Esta capacidad es crucial para la gestión de desastres naturales, como erupciones volcánicas, y para la implementación de políticas de control de la contaminación [37].

2.5.2 Resolución Mejorada

Puede ajustarse a 13 x 13 km para estudios más detallados de áreas específicas [50]. Esta resolución mejorada es particularmente útil para monitorear fuentes de emisión urbanas e industriales, donde las abundancias de SO₂ pueden variar significativamente en distancias cortas.

La capacidad de ajustar la resolución espacial permite realizar estudios más focalizados y detallados, proporcionando datos de alta calidad para la investigación y la toma de decisiones. La detección precisa de fuentes puntuales de contaminación es esencial para evaluar el cumplimiento de las normativas

ambientales y para diseñar estrategias efectivas de mitigación de la contaminación [52].

2.6 Capacidades y Funcionalidades

OMI ofrece capacidades avanzadas que mejoran la precisión y la utilidad de las mediciones de SO₂:

2.6.1 Hiperespectralidad

La capacidad de capturar múltiples bandas estrechas permite mejorar la precisión en la cuantificación de gases traza [50]. La hiperespectralidad proporciona una riqueza de datos que permite una mejor caracterización de los gases y aerosoles en la atmósfera. Esto es crucial para la investigación y para la implementación de políticas basadas en evidencia.

La alta resolución espectral también facilita la corrección de efectos atmosféricos y la calibración interna del instrumento, asegurando que las mediciones sean precisas y consistentes a lo largo del tiempo. Esta capacidad es esencial para el monitoreo a largo plazo de las abundancias de SO₂ y otros gases traza [23].

2.6.2 Auto-calibración Radiométrica y de Longitud de Onda

Esta característica asegura la estabilidad a largo plazo de las mediciones, corrigiendo cualquier posible degradación del instrumento [23]. La auto-calibración es crucial para mantener la precisión de las mediciones a lo largo del tiempo, especialmente en misiones de larga duración como OMI.

La capacidad de auto-calibración permite a OMI ajustar automáticamente sus mediciones en función de los cambios en las condiciones del instrumento y del entorno, mejorando la fiabilidad de los datos. Esto es especialmente importante para la detección de tendencias a largo plazo en las abundancias de SO₂ y para la evaluación de políticas ambientales [52].

2.6.3 Diferenciación de Aerosoles

OMI puede distinguir entre diferentes tipos de aerosoles, como humo, polvo y sulfatos, lo cual es crucial para separar las señales de SO₂ de otras interferencias atmosféricas [50]. La capacidad de diferenciar entre diferentes tipos de aerosoles mejora la precisión de las mediciones de SO₂ y proporciona datos adicionales sobre la composición y dinámica de la atmósfera.

Esta capacidad es especialmente útil en regiones donde las emisiones de SO₂ están acompañadas por otras formas de contaminación del aire. La identificación precisa de los aerosoles permite una mejor interpretación de los datos y una evaluación más completa de la calidad del aire [23].

2.6.4 Medición de la Presión y Cobertura de Nubes

Estos datos adicionales son esenciales para derivar el contenido de ozono troposférico y mejorar la precisión de las mediciones de SO₂ [50]. La medición de la presión y cobertura de nubes proporciona contexto adicional para las mediciones de SO₂, permitiendo una corrección más precisa de las influencias atmosféricas.

Los datos sobre la cobertura y presión de nubes también son importantes para la investigación climática, ya que las nubes juegan un papel crucial en la radiación solar y el balance de energía de la Tierra. La integración de estos datos mejora la comprensión de la dinámica atmosférica y la interacción entre diferentes componentes de la atmósfera [52].

2.6.5 Años de vuelo satelital y mediciones de OMI

Desde su lanzamiento en 2004, el satélite ha estado recolectando datos de alta resolución, proporcionando una base de datos invaluable para el estudio de series temporales y la identificación de tendencias en la concentración de diversos contaminantes atmosféricos, para este estudio en particular el SO₂.

Estos datos permiten la creación de mapas que muestran cómo las abundancias de gases como el dióxido de azufre (SO₂) han variado a lo largo del tiempo [24].

Esta información es crucial para entender los patrones de contaminación y sus implicaciones ambientales y de salud, proporcionando una visión integral de la evolución de la calidad del aire en diferentes regiones.

El satélite es especialmente significativo para Guatemala, ya que es el que más tiempo ha estado en el espacio recopilando datos con una resolución espacial y temporal adecuadas. Esta continuidad en la recopilación de datos es fundamental, especialmente en países como Guatemala, donde la infraestructura para la medición y monitoreo de la calidad del aire en tierra es limitada.

La carencia de detectores terrestres en el país hace que los datos satelitales sean una fuente primaria de información, crucial para la planificación ambiental y la gestión de riesgos. La capacidad de obtener datos precisos y a largo plazo desde el espacio permite tomar decisiones informadas para mejorar la calidad del aire y proteger la salud pública [6].

2.7 Procesamiento y Algoritmos

El procesamiento de datos de OMI para la detección de SO₂ utiliza varios algoritmos avanzados:

2.7.1 TOMS Versión 7

Este algoritmo se basa en la espectroscopía de absorción óptica diferencial (DOAS) para la detección precisa de SO₂ [52]. DOAS es una técnica que mide la cantidad de luz absorbida por el SO₂ en diferentes longitudes de onda, lo que permite cuantificar su abundancia con alta precisión.

La versión 7.0 del algoritmo TOMS ha mejorado significativamente la precisión de las mediciones de SO₂, permitiendo una mejor diferenciación entre las emisiones naturales y antropogénicas. Esta técnica es esencial para el monitoreo global de SO₂ y para la identificación de fuentes de emisión específicas [50].

2.7.2 Recuperaciones Hiperespectrales BUV (Backscattered Ultraviolet)

Estas técnicas permiten extraer información detallada sobre las abundancias de SO₂ a partir de las mediciones espectrales [52]. La recuperación hiperespectral utiliza la radiación solar retrodispersada para medir la abundancia de SO₂ en diferentes capas de la atmósfera.

Esta técnica proporciona datos detallados sobre la distribución vertical del SO₂, lo que es crucial para comprender su impacto en la química atmosférica y en la salud pública. La alta resolución espectral mejora la precisión de las mediciones y permite una mejor caracterización de las fuentes de emisión [23].

2.7.3 Modelado Directo

Utilizado para mejorar la precisión de las estimaciones de abundancia de SO₂ y corregir posibles errores en las mediciones [23]. El modelado directo implica el uso de modelos atmosféricos para simular la dispersión y el transporte del SO₂ en la atmósfera, lo que permite ajustar las mediciones en función de las condiciones climáticas.

Esta técnica es especialmente útil para corregir las influencias de las variaciones meteorológicas y mejorar la precisión de las estimaciones de la abundancia de SO₂. El modelado directo también ayuda a evaluar el impacto de diferentes fuentes de emisión y a diseñar estrategias efectivas de mitigación de la contaminación [52].

3 TERCER CAPÍTULO. EL DIÓXIDO DE AZUFRE SO₂

3.1 Antecedentes

La Tierra cuenta con un proceso natural de efecto invernadero causado por la emisión de pequeñas cantidades de gases, como vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), además de gases liberados por reacciones naturales como las erupciones volcánicas, que emiten dióxido de azufre (SO₂) [1]. Estos gases permiten que la radiación solar caliente la superficie terrestre, y parte de esta radiación se refleja hacia el espacio. Sin embargo, un aumento en la concentración de estos gases impide que la radiación reflejada escape, lo que provoca un calentamiento adicional de la Tierra y genera el efecto invernadero antropogénico.

Sin el efecto invernadero natural, la temperatura promedio de la Tierra sería de -18°C, haciendo imposible la vida tal como la conocemos [1]. No obstante, la actividad humana, como el uso de combustibles fósiles para la generación de energía, incrementa significativamente las emisiones de contaminantes como SO₂, NO₂, CO₂, CH₄ y N₂O, lo que intensifica el efecto invernadero y el calentamiento global [2] [3] [55]. La continua emisión de estos gases provocará importantes cambios climáticos con impactos negativos en el desarrollo humano y el medio ambiente [5].

La industria energética, que utiliza tecnologías convencionales como carbón y gas, es responsable de hasta dos tercios de las emisiones globales de gases de efecto invernadero [55]. En 2014, el 45% del CO₂ emitido provino de la producción eléctrica [3], lo que convierte a este sector en uno de los más contaminantes.

El dióxido de azufre (SO₂), de vida corta, es emitido tanto por fuentes naturales (volcanes y termales) como por actividades humanas, principalmente la generación eléctrica a partir de combustibles fósiles. Una vez emitido, el SO₂ se oxida rápidamente en ácido sulfúrico, que se adhiere a aerosoles, afectando la capacidad

oxidativa de la atmósfera y alterando la temperatura global [56]. La exposición constante a SO_2 tiene graves efectos sobre la salud humana y los ecosistemas, incrementando enfermedades respiratorias, morbilidad cardiovascular y la mortalidad, así como afectaciones en flora y fauna debido a la lluvia ácida [6,7].

La contaminación del aire fue responsable de 4.2 millones de muertes en 2016, y el 91% de la población mundial vive en áreas con niveles de contaminación por encima de los límites recomendados por la OMS [6](Cohen et al., 2017). Entre los principales contaminantes del aire se encuentran SO_2 , O_3 , NO_2 , CO y CO_2 . En este estudio, se enfatiza la importancia del dióxido de azufre, debido a sus efectos en la salud y su impacto en la aviación, ya que las cenizas y gotas de SO_2 pueden reducir la visibilidad y dañar los sistemas de navegación y las turbinas [57].

3.2 Química del SO_2 en la Atmósfera

El dióxido de azufre (SO_2) es uno de los principales contaminantes atmosféricos que juega un papel crucial en la química atmosférica. Es un gas incoloro con un olor acre, producido principalmente por actividades industriales y naturales como la quema de combustibles fósiles y la actividad volcánica.

La química atmosférica del SO_2 es compleja y multifacética, involucrando diversas reacciones fotoquímicas y de fase acuosa que afectan tanto la calidad del aire como el clima global.

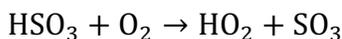
3.2.1 Emisión y Transformación del SO_2 en la Atmósfera

El SO_2 se emite a la atmósfera desde diversas fuentes naturales y antropogénicas. Una vez en la atmósfera, el SO_2 puede sufrir una serie de transformaciones químicas que lo convierten en otros compuestos, como el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y sulfatos, que tienen implicaciones significativas para la salud humana y el medio ambiente.

Una de las principales reacciones que afectan al SO₂ en la atmósfera es su oxidación. El SO₂ puede ser oxidado tanto en la fase gaseosa como en la fase acuosa. En la fase gaseosa, el SO₂ puede ser oxidado por radicales hidroxilo (OH) en presencia de luz solar, siguiendo la reacción:



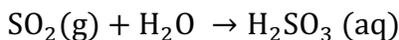
El radical HSO₃ formado puede reaccionar con oxígeno molecular (O₂) para producir ácido sulfúrico:



El ácido sulfúrico producido puede condensarse para formar partículas de sulfato, que contribuyen a la formación de aerosoles los cuales tienen un impacto significativo en la calidad del aire y la salud humana [58] [6].

3.2.2 Reacciones en la Fase Acuosa

En la fase acuosa, el SO₂ tiende a disolverse en gotas de agua, donde puede ser oxidado por oxidantes disueltos como el peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y el ozono (O₃). La disolución del SO₂ en agua produce ácido sulfuroso (H₂SO₃), que puede disociarse parcialmente para formar bisulfito (HSO₃⁻) y sulfito (SO₃²⁻):



El ácido sulfuroso y sus iones pueden ser oxidados en la fase acuosa, por ejemplo, por el peróxido de hidrógeno:

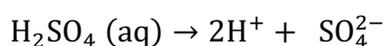


La oxidación de los iones de bisulfito y sulfito en la fase acuosa también produce sulfato, que puede contribuir a la acidez de las precipitaciones y la formación de aerosoles secundarios [59].

3.2.3 Impactos Ambientales del SO₂

El SO₂ y sus productos de oxidación tienen múltiples impactos ambientales. Los aerosoles de sulfato resultantes de la oxidación del SO₂ son componentes importantes del smog y pueden causar problemas respiratorios en humanos, [7] [6]. Además, los sulfatos contribuyen a la acidez de la lluvia, fenómeno conocido como 'lluvia ácida' que puede dañar ecosistemas acuáticos y suelos [60], islas de calor [61], entre otros.

La lluvia ácida es el resultado de la disolución de SO₂ y otros óxidos de azufre en las gotas de agua de las nubes, formando ácidos fuertes como el ácido sulfúrico. Este fenómeno tiene efectos destructivos sobre la vegetación, acidificando suelos y cuerpos de agua, lo que a su vez afecta la biodiversidad y la salud de los ecosistemas:



3.2.4 Procesos Fotoquímicos y Formación de Aerosoles

El SO₂ también participa en reacciones fotoquímicas en la atmósfera. La foto oxidación del SO₂ bajo la influencia de la radiación solar puede producir radicales libres que inician una serie de reacciones en cadena, llevando a la formación de aerosoles secundarios. Estos aerosoles pueden tener efectos directos e indirectos en el clima. Los aerosoles reflejan y absorben la radiación solar, afectando el balance radiativo de la Tierra [5], lo cual puede llevar a efectos de enfriamiento o calentamiento dependiendo de su composición y propiedades ópticas [59].

Los aerosoles también pueden actuar como núcleos de condensación de nubes (CCN), afectando las propiedades microfísicas de las nubes y la formación de precipitación.

Este proceso tiene implicaciones significativas para el ciclo hidrológico y el clima regional y global. Las propiedades de los aerosoles, como el tamaño de partícula, la composición química y la higroscopicidad, determinan su eficiencia como CCN y su impacto en la formación de nubes y la precipitación [60].

3.2.5 Reactividad y Ciclo Atmosférico del SO₂

El ciclo atmosférico del SO₂ involucra su emisión, transformación, transporte y deposición. La vida media del SO₂ en la atmósfera varía dependiendo de las condiciones ambientales, pero generalmente se encuentra en el rango de días a semanas, de esto se hablará en el siguiente apartado.

El transporte a larga distancia del SO₂ puede llevar a la deposición de sus productos de oxidación en regiones alejadas de las fuentes de emisión, contribuyendo a la deposición ácida y a la contaminación transfronteriza [58].

La deposición del SO₂ y sus productos de oxidación puede ocurrir tanto por deposición seca como húmeda. La deposición seca involucra la adsorción directa de gases y partículas en superficies terrestres y acuáticas, mientras que la deposición húmeda ocurre a través de la incorporación de estos compuestos en gotas de lluvia, nieve o niebla. Ambos procesos son cruciales para el ciclo biogeoquímico del azufre y su impacto en los ecosistemas [60].

3.3 Tiempo de vida del SO₂ en la atmósfera terrestre

El estudio realizado por Lee, [62], utiliza observaciones de columnas de dióxido de azufre (SO₂) desde los satélites SCIAMACHY y OMI para inferir emisiones antropogénicas globales de SO₂ mediante un modelo de transporte químico (GEOS-Chem). Lee encuentra una fuerte correlación espacial entre las concentraciones de SO₂ medidas en superficie y las columnas observadas por instrumentos a bordo de satélite, con coeficientes de correlación de 0.86 para SCIAMACHY y 0.80 para OMI. El análisis mediante el modelo y las observaciones satelitales revela variaciones estacionales significativas en los tiempos de vida del SO₂, que son de 13 horas en verano y 48 horas en invierno en el este de los Estados Unidos. Para mediciones realizadas en tierra, los tiempos de vida para el SO₂ reportados son de 19 ± 7 horas y 58 ± 20 horas para verano e invierno respectivamente [62].

Los tiempos de vida más largos en invierno, sugiere una menor eficiencia en la remoción del SO₂ durante esta temporada, probablemente debido a factores como la temperatura y la humedad. El estudio de Lee [62] y de Fioletov [37] confirman la consistencia de los datos satelitales con las mediciones en tierra, destacando la capacidad de estos instrumentos para proporcionar estimaciones precisas de las emisiones de SO₂ a nivel global. Este enfoque es crucial para regiones como Guatemala, donde la infraestructura de monitoreo en tierra es limitada, y se necesita una comprensión detallada de la dinámica atmosférica para la gestión ambiental.

3.4 Fuentes principales de SO₂

La principal fuente natural en la producción de SO₂ lo constituyen las erupciones de los volcanes activos [63], y afectan al desarrollo de las actividades humanas, principalmente aquellos volcanes que se encuentran en las cercanías de grandes ciudades [64], como en el caso de Guatemala, la cercanía de los volcanes

de Pacaya, Fuego y Santiaguito. Los primeros tres se encuentran cerca de grandes ciudades de manera que un monitoreo constante de ese gas sería de gran importancia, y mejor si el sondeo se hace a diferentes alturas, para investigar e identificar si el SO₂ detectado es de origen natural o antropogénico.

Las emisiones artificiales o antropogénicas se producen principalmente por la actividad industrial con el uso de combustibles fósiles ricos en azufre, fundidoras o generadoras eléctricas a base de carbón. Guatemala, siendo uno de los países más industrializados de Centro América [65], posee varias fuentes antropogénicas de SO₂, entre las que se pueden mencionar: fundidoras, uso de combustible rico en azufre o generadoras a base de carbón, como el caso de San José Power Station, perteneciente al grupo TECO, Guatemala [66].

Otros problemas asociados a las abundancias de SO₂ en las capas superiores de la tropósfera, emitidas principalmente por la actividad volcánica, provocan alto riesgo en la actividad aeronáutica debido a que la ceniza [64] y las pequeñas gotas de ácido sulfúrico, pueden disminuir la visibilidad, provocar daños en los sistemas de vuelo y causar daño irreparable a las turbinas [54], generando posibles accidentes aéreos y millonarias pérdidas monetarias.

3.5 Consecuencias Atmosféricas y Terrestres de las Emisiones de SO₂

El dióxido de azufre, emitido tanto por fuentes naturales como antropogénicas, juega un papel crucial en la composición de la atmósfera y tiene implicaciones significativas para el clima y los ecosistemas terrestres.

La atmósfera, al ser un componente vital de los ciclos biogeoquímicos, controla el clima y regula el ambiente en el que vivimos. Los elementos esenciales como el nitrógeno, el carbono y el oxígeno son en gran medida controlados y reciclados a través de procesos atmosféricos, que son influenciados por la presencia de SO₂.

Este gas, cuando se oxida y se convierte en sulfatos, contribuye a la formación de aerosoles que no solo afectan la calidad del aire, sino que también juegan un rol importante en la reflexión y absorción de la radiación solar, alterando el balance energético de la Tierra.

La interacción del SO₂ con otros componentes de la atmósfera subraya la interconexión entre las emisiones de contaminantes y la salud de los ciclos biogeoquímicos que sustentan la vida en el planeta.

En resumen, es posible afirmar, de acuerdo con varios autores, que la contaminación por SO₂ en la atmósfera terrestre contribuye a la alteración en las siguientes áreas:

- Cambio climático [67]
- Efecto invernadero [68]
- Lluvia ácida [60] [69]
- Eutrofización de ecosistemas [70]
- Impacto en la salud humana [8]
- Visibilidad para actividades humanas [61]
- Aumento de las islas de calor en las ciudades [61]

4 CUARTO CAPÍTULO. CARACTERIZACIÓN ESPACIAL, TEMPORAL Y METODOLOGÍA

4.1 Aspectos Topográficos

Guatemala es un país caracterizado por su geografía diversa y topografía accidentada, influenciada significativamente por la Sierra Madre que atraviesa el país de oeste a este. Esta cordillera alberga 37 volcanes, incluyendo los tres activos Volcán de Fuego, Pacaya y Santiaguito, que tienen un impacto significativo en el medio ambiente y las comunidades cercanas [71]. La actividad volcánica en estas regiones no solo moldea la topografía local, sino que también influye en la fertilidad del suelo, beneficiando la agricultura en las áreas adyacentes.

El Volcán Tajumulco, con sus 4,220 metros sobre el nivel del mar, es el punto más alto de Guatemala y de toda Centroamérica, lo que subraya la naturaleza montañosa del país. Además de los volcanes, Guatemala posee una vasta región selvática en el norte, conocida como El Petén, que es menos accidentada pero igualmente significativa por su biodiversidad y riqueza ecológica [72]. Esta región contrasta con las planicies costeras en las zonas del Pacífico y Caribe, donde la topografía más llana y los suelos fértiles favorecen la agricultura y la ganadería.

La combinación de montañas, volcanes, selvas y costas crea una diversidad de microclimas y ecosistemas en Guatemala, lo que influye en la distribución de las actividades humanas y económicas. Las áreas volcánicas, en particular, son de interés tanto por su capacidad para la producción agrícola como por los riesgos asociados con la actividad volcánica. Estos factores hacen que la gestión de desastres y la planificación territorial sean aspectos cruciales en la administración del país, especialmente en lo que respecta a la prevención y respuesta a eventos volcánicos y sismos.

4.2 Variaciones Climáticas de Guatemala

En la región de las Tierras Bajas Mayas, evidencias sugieren que las sociedades prehispánicas enfrentaron al menos cinco sequías que influyeron en el abandono de algunas ciudades, pero también en el desarrollo de mejoras agrícolas. Este patrón culminó con un periodo seco que duró más de 100 años, coincidiendo con una sobreexplotación de los recursos naturales y conflictos políticos [73].

Para entender mejor las variaciones climáticas presentes, es esencial comprender el clima histórico. Modelos de escenarios futuros basados en datos climáticos históricos permiten una toma de decisiones más informada sobre medidas de adaptación viables. Recientemente, se ha avanzado en la reconstrucción climática histórica a través de estudios de dendrocronología, identificando especies arbóreas que pueden proporcionar información climática anual de hasta 400 años [74].

En Guatemala, el INSIVUMEH ha recopilado registros climáticos históricos desde los años setenta. Pese a contar con una red de estaciones hidrometeorológicas, la cantidad de estas no es ideal dada la variabilidad de microclimas. Fortalecer estos procesos es vital para reducir los efectos negativos del cambio climático en diversos sectores nacionales [72].

El clima de Guatemala varía significativamente debido a su topografía. Se distinguen tres zonas climáticas principales:

- Tierra caliente: Regiones costeras y áreas bajas con temperaturas promedio de 25-30°C.
- Tierra templada: Entre 1,000 y 2,000 metros de altitud, con temperaturas de 20-25°C.
- Tierra fría: Por encima de los 2,000 metros, con temperaturas que pueden descender por debajo de los 20°C [72].

En el país se caracterizan dos estaciones: una estación seca (noviembre a abril) y una lluviosa (mayo a octubre) [72].

4.3 Distribución espacial

Se analiza la abundancia de SO₂ del territorio de Guatemala, que se encuentra en el Istmo de Centro América con una extensión territorial de 108, 889 km². Delimita al oeste y norte por México, al este con Belice y el golfo de Honduras, al sureste con Honduras y El Salvador, y al sur con el Océano Pacífico.

Se obtienen mapas de distribución espacial para las abundancias de SO₂ para Guatemala, tomando los siguientes límites entre 92.5^o -- 88^o Oeste y 13^o-- 19^o N. Se ampliaron los márgenes respecto al territorio de Guatemala, para evaluar posibles contribuciones externas. Los mapas fueron generados y analizados por medio del programa Panoply de NASA [75], y se descargaron por medio de la plataforma Giovanni [76]. Los datos utilizados para generar los mapas son de nivel 3, de los que se hablará en el siguiente apartado. Los datos promedios de los mapas se tomaron de lecturas mensuales y anuales.

Para el presente estudio, el territorio se separa en dos regiones, norte y sur, como se aprecia en el mapa 4.1, estas regiones se han delimitado de acuerdo con los siguientes criterios:

Región Norte: Zona con poca industria y nula actividad volcánica, región caracterizada por bosque tropical, reserva ecológica protegida [77] y reserva de la Biósfera Maya [78]. En esta región existen algunos pozos petroleros [79]. Para fines de esta investigación, la región Norte estará constituida por los departamentos de: Petén, Huehuetenango, norte de Quiché, Alta Verapaz e Izabal.

Región Sur: Zona en donde se asienta la mayor actividad industrial de Guatemala, tanto agrícola como de generación eléctrica por medio de combustibles fósiles [79], zona azucarera, zafra que se desarrolla entre los meses de noviembre y abril [80].

Además, en esta región se encuentran los tres volcanes activos del país: Pacaya, Fuego y Santiago [15].

Cabe resaltar que las dos regiones pueden separarse de forma aproximada por dos cordilleras centrales, Sierra de las Minas [81] y Sierra de los Cuchumatanes [82], esto es importante ya que las acumulaciones de SO_2 dependen de la orografía del país.

Mapa 4.1

Regiones de Guatemala



Nota. Separación región Norte y región Sur. Imagen generada por Google Earth [83].

4.4 Niveles de procesamiento de Datos Satelitales

Los datos satelitales están disponibles en diferentes etapas (o niveles) de procesamiento, de datos brutos recolectados del satélite hasta productos refinados que visualizan la información.

La NASA toma los datos de los satélites y los procesa para hacerlos más utilizables para una gran variedad de aplicaciones [22] [84]. Existe una especie de terminología que la NASA utiliza para referirse a los niveles de procesamiento que realiza:

- **Nivel 0 y Nivel 1-** Datos brutos de los instrumentos que puede que estén referenciados en el tiempo. Son los más difíciles de usar.
- **Nivel 2-** Datos de Nivel 1 que han sido convertidos en alguna cantidad geofísica mediante un algoritmo computacional (proceso conocido como extracción). Los datos están georreferenciados y calibrados.
- **Nivel 3-** Datos de Nivel 2 que han sido mapeados sobre una cuadrícula espacio-temporal uniforme y que han pasado por un proceso de control de calidad.
- **Nivel 4-** Datos de Nivel 3 que han sido combinados con modelos o datos de otros instrumentos.

Para este estudio se usaron los datos de densidad de columna vertical de la Planetary Boundary Layer, PBL, para SO₂ Nivel Tres, estos datos se descargaron de la plataforma `Giovanni` de NASA en formato `****data.nc` [76] [85], con una resolución espacial de 0.25 x 0.25 grados, los datos se tomaron de lecturas diarias.

Los datos nivel tres han sido procesados y filtrados por NASA [86], [87], [88], al igual, la agencia espacial, ha realizado la verificación y garantía de calidad de los mismos [89], sin embargo para esta investigación fue necesario realizar un procesamiento adicional, para filtrar los datos que corresponden con abundancias negativas, normalizando todos los valores al dato más bajo de la serie temporal, este procesamiento se realizó con el software Matlab 2022a [90].

4.5 Temporalidad

El presente estudio abarca un período de 17 años, desde 2005 hasta 2021, durante el cual el instrumento OMI recopiló datos diarios de columnas de abundancia de dióxido de azufre (SO₂). Estos datos permiten un análisis detallado de la variabilidad estacional y temporal de las abundancias de SO₂ en la atmósfera sobre Guatemala. A diferencia de otras regiones que experimentan cuatro estaciones bien definidas, Guatemala presenta una climatología dominada por dos estaciones principales: la época lluviosa y la época seca.

Esta clasificación climática, adoptada en base a los registros y criterios del Instituto Nacional de Sismología Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), define la época lluviosa de mayo a octubre y la época seca de noviembre a abril [72].

La época lluviosa se caracteriza por precipitaciones intensas que pueden influir en la dispersión y deposición de contaminantes atmosféricos, incluyendo el SO₂. Estas condiciones meteorológicas afectan no solo la calidad del aire sino también la visibilidad y las condiciones de vida, particularmente en regiones cercanas a fuentes volcánicas activas.

Por otro lado, la época seca se asocia con un aumento en la estabilidad atmosférica, lo que puede resultar en una mayor concentración de contaminantes en la capa límite atmosférica. Este patrón estacional proporciona un marco crítico para el análisis de los datos de SO₂, permitiendo identificar tendencias y anomalías en función de las variaciones climáticas. La distinción entre estas dos estaciones climáticas es crucial para comprender el comportamiento de los aerosoles y gases en la atmósfera guatemalteca, así como para desarrollar estrategias de mitigación y adaptación a los efectos del cambio climático y la contaminación del aire.

4.6 Datos Satelitales. Plataforma Giovanni

Los datos de abundancias fueron descargados a través de la plataforma en línea 'Giovanni', que es parte de la infraestructura de la NASA para el análisis de datos atmosféricos. Giovanni es una herramienta accesible en la web, disponible en <https://giovanni.gsfc.nasa.gov>, [76] que permite el acceso y visualización de datos satelitales sin la necesidad de programación avanzada.

Los datos descargados incluyen mapas de abundancia como series temporales, lo que facilita el análisis espacial y temporal de del gas en cuestión. Se obtuvieron abundnacias de dióxido de azufre (SO₂) mediante datossatelitales en formato **NetCDF**, el cual es ampliamente utilizado para almacenar datos multidimensionales como variables espaciales y temporales. Este formato permite su manejo en software especializado, tal como es el caso de MATLAB, facilitando tanto su análisis como su visualización.

4.7 Mapas de Abundancia

Para el análisis y evaluación de los mapas de abundancias, se utilizó el software Panoply, desarrollado por la NASA en su versión 4.11.4. [75] Este programa permite la visualización de datos en formato NetCDF, previamente descargados de la plataforma Giovanni.

Con Panoply, se generaron representaciones espaciales detalladas de las abundancias de SO₂ lo que facilitó la identificación de zonas con altas y bajas abundancias de este contaminante. Estas visualizaciones fueron esenciales para delimitar y diferenciar las regiones de interés en Guatemala, que ya se han tratado antes en este trabajo.

El software también permite ajustar la escala de colores y los umbrales de abundancia, lo que contribuye a una mejor separación visual entre áreas de diferentes niveles de contaminación.

4.8 Series de Tiempo

Para el análisis de las series temporales de abundancia de dióxido de azufre (SO_2), se utilizó el software MATLAB [90], debido a su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos multidimensionales, como los almacenados en las hipermatrices del formato NetCDF. Los datos comprendieron el periodo desde 2004 hasta 2021, y fueron procesados anualmente, separando las abundancias de SO_2 por cada una de las regiones y estación climática de Guatemala previamente delimitadas.

El proceso comenzó con la extracción de las series temporales directamente de las matrices NetCDF descargadas desde la plataforma Giovanni. MATLAB permitió no solo la organización de los datos por años, sino también su visualización gráfica para facilitar la interpretación de las fluctuaciones anuales de las concentraciones de SO_2 .

Una vez separadas las series temporales por región y por estación climática, se aplicó análisis estadístico para evaluar las **tendencias** a lo largo del tiempo, identificando aumentos o disminuciones significativas en los niveles de SO_2 .

Además, se realizaron análisis de **correlación** entre las series temporales de distintas regiones para determinar patrones comunes o divergentes en la evolución de la contaminación.

Este enfoque permitió una evaluación detallada de la evolución espacial y temporal de la contaminación por SO_2 en Guatemala, contribuyendo al entendimiento de los factores que influyen en la variabilidad de este contaminante en el país.

4.9 Periodicidades

El análisis de las periodicidades en las abundancias de dióxido de azufre se llevó a cabo utilizando las series temporales extraídas desde 2004 hasta 2021. Para identificar los ciclos recurrentes en las concentraciones de SO_2 , se aplicó la Transformada Rápida de Fourier (FFT) por medio del programa Matlab [90].

Mediante la FFT, se logró detectar los patrones periódicos de las abundancias de SO_2 a distintas escalas temporales. Este análisis reveló las frecuencias dominantes, lo que permitió identificar ciclos temporales y estacionales que influyen en las variaciones del contaminante. El uso de la FFT fue fundamental para descomponer las fluctuaciones observadas en las series temporales y determinar si los picos recurrentes de abundancia de SO_2 estaban asociados a fenómenos naturales, como la actividad volcánica, o a variaciones estacionales en las condiciones atmosféricas.

4.10 Capacitaciones NASA

Como parte del desarrollo de competencias técnicas en esta investigación, se participó en un total de 24 cursos de capacitación sobre teledetección ofrecidos por la NASA a través de la plataforma ARSET (Applied Remote Sensing Training) [22]. Estos cursos están diseñados para proveer a los participantes de herramientas y conocimientos avanzados en el uso de datos satelitales para monitorear y analizar variables ambientales, lo que resultó clave para la correcta aplicación de teledetección en este estudio.

Los temas abordados en estas capacitaciones incluyeron el manejo y procesamiento de datos satelitales, análisis de series temporales, uso de software especializado para el análisis de datos en formatos como NetCDF, y la aplicación de técnicas de teledetección para evaluar la calidad del aire y la presencia de contaminantes atmosféricos, como el dióxido de azufre (SO_2). Cada curso incluyó tanto sesiones teóricas como ejercicios prácticos, que permitieron una comprensión

profunda de los procedimientos técnicos necesarios para la recolección y análisis de los datos.

Estas capacitaciones fortalecieron las capacidades del equipo de investigación, permitiendo un uso eficiente de los datos proporcionados por la NASA y otras fuentes, asegurando que se cumplieran los estándares internacionales en el manejo de datos de teledetección.

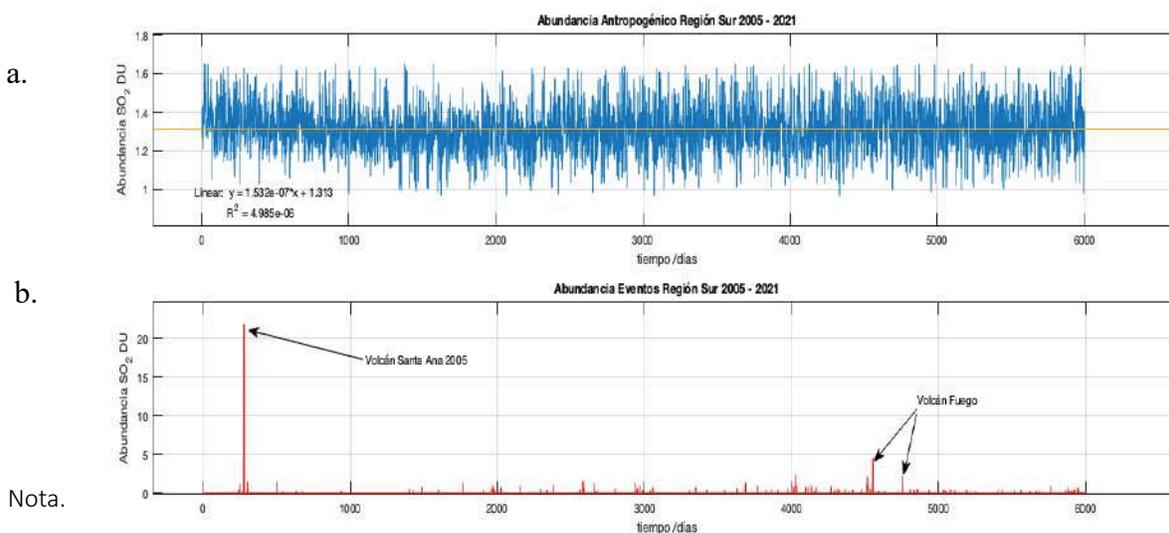
5 QUINTO CAPÍTULO. RESULTADOS

5.1 Series temporales

Para comprender mejor la dinámica de las emisiones de dióxido de azufre en la región sur de Guatemala, es fundamental distinguir entre las fuentes antropogénicas y naturales de este gas. Esta diferenciación es particularmente relevante en un contexto geográfico como el de Guatemala, donde la actividad volcánica tiene un papel significativo en la composición atmosférica.

Las erupciones del volcán de Fuego en 2018 y del volcán Santa Ana en El Salvador en 2005 son ejemplos claros de cómo estos eventos naturales pueden influir en la calidad del aire a gran escala, extendiendo su impacto sobre vastas áreas del territorio guatemalteco. Ante la complejidad de estos fenómenos, se implementa un enfoque estadístico mediante el método de Outlier, que permite separar la abundancia de SO_2 resultante de fuentes volcánicas, considerada `anómala`, de aquella contribución que proviene de actividades humanas.

Figura 5.1 Abundancias de SO_2



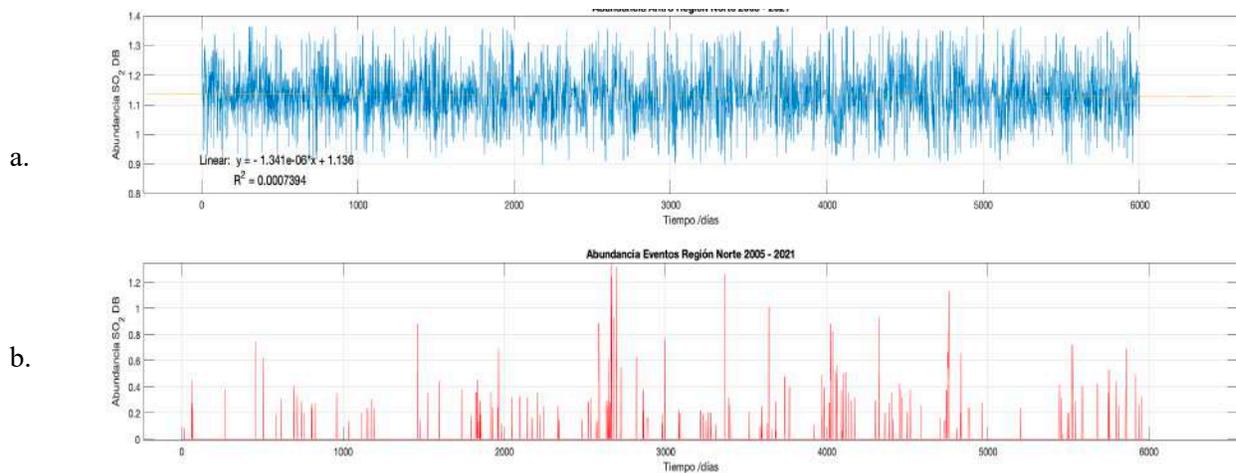
Nota.

Abundancia de columna troposférica para datos a. antropogénicos. b. eventos volcánicos, se identifican claramente dos eventos volcánicos registrados. Figura elaborada con Matlab 2022a [90].

La figura No. 5.1a, muestra la separación de los eventos antropogénicos de los eventos volcánicos para la región sur de Guatemala. La figura No. 5.1b muestra la emisión de SO₂ para el año 2005 del volcán Santa Ana de El Salvador, contaminación que abarcó gran parte del territorio de Guatemala, y la erupción del volcán de Fuego en Guatemala, enero y junio del año 2018, la cual provocó daños considerables en el país. Es de notar que la región volcánica de Guatemala corresponde con la región sur del país, y por lo tanto se espera más contribución natural de este tipo de eventos.

Debido a que las erupciones volcánicas no se pueden predecir, y en la mayoría de los casos son eventos considerablemente grandes, se aplicó el método estadístico de Outlier para separar las abundancias de SO₂ naturales de las antropogénicas, es decir se consideran a los eventos volcánicos como datos de abundancias de SO₂ `anómalas`. El método de Outlier se aplicó por medio del Software Matlab 2022a [90]. Para las contribuciones antropogénicas, figura 6a, se observa que la abundancia de SO₂ a en la región sur, permanece constante con un valor medio de 1.31 DU.

Figura 5.2 Abundancias de SO₂



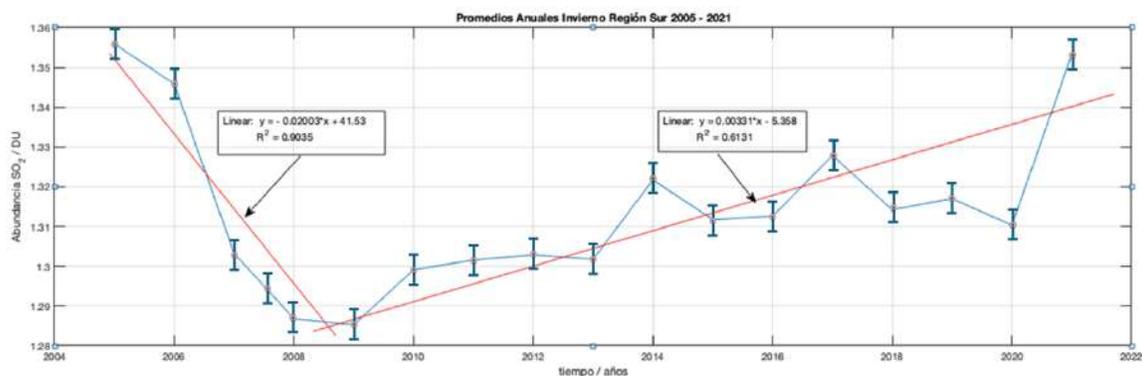
Nota. Abundancia de columna troposférica para datos a. antropogénicos b. eventos volcánicos para la región Norte. Figura elaborada con Matlab 2022a [90].

La región norte, figura 5.2, presenta abundancias más bajas que la región sur, en promedio de 1.13 DU, se observa también que a nivel global la abundancia es constante. En relación con los eventos naturales, no se observan puntos específicos que puedan coincidir con eventos volcánicos esto se debe a que, en la región norte del país, no existen volcanes activos que puedan emitir SO₂.

5.1.1 Series temporales de promedios por estación climática

Las comparaciones por estaciones climáticas se analizaron haciendo los promedios de los meses que corresponden a cada estación. En la figura 5.3 se observan los promedios durante el periodo de invierno de abundancias de SO₂ para la región sur. Se aprecia una pendiente negativa desde el año 2005 al año 2009, esto puede relacionarse con la crisis económica a nivel mundial y que tuvo su máximo efecto en los años 2008 y 2009, reflejado en un decrecimiento muy marcado en la demanda de petróleo [91] y la baja en la importación de combustibles e hidrocarburos en Guatemala, en donde se presenta que para el año 2009 se da la menor importación histórica de hidrocarburos [92].

Figura 5.3 *Anuales Invierno Región Sur*



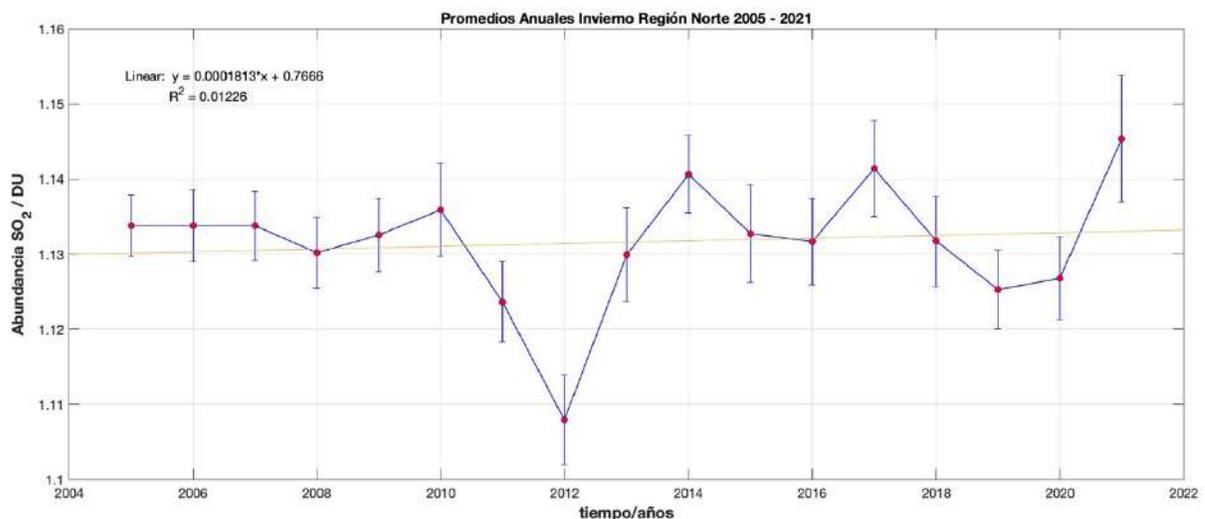
Nota. Promedios anuales estación de invierno para la región sur de 2005 a 2021. Gráfica elaborada con Matlab 2022a [90].

Una pendiente positiva se observa en el periodo de años que abarcan desde el 2010 hasta 2019. En el año 2020 se observa otro decrecimiento en la abundancia

del SO_2 , esto se explica por el cierre del país y el cese de casi toda actividad industrial, comercial y de transporte, debido a la pandemia del COVID 19. Hay que recordar que esta región sur es la más industrializada de Guatemala.

Las abundancias para los años 2005 y 2021 tienen un valor de alrededor de 1.35 DU, lo que implica que la contaminación por SO_2 para ambos años es muy similar, esto contradice en parte el hecho que el desarrollo industrial de Guatemala así como el consumo y la generación eléctrica ha aumentado con los años [93], sin embargo hay que considerar que con algunas políticas medioambientales (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales Gobierno de Guatemala, 2020) y un parque vehicular más moderno se ha propiciado a que la abundancia no se dispare a niveles elevados.

Figura 5.4 *Anuales Invierno Región Norte*



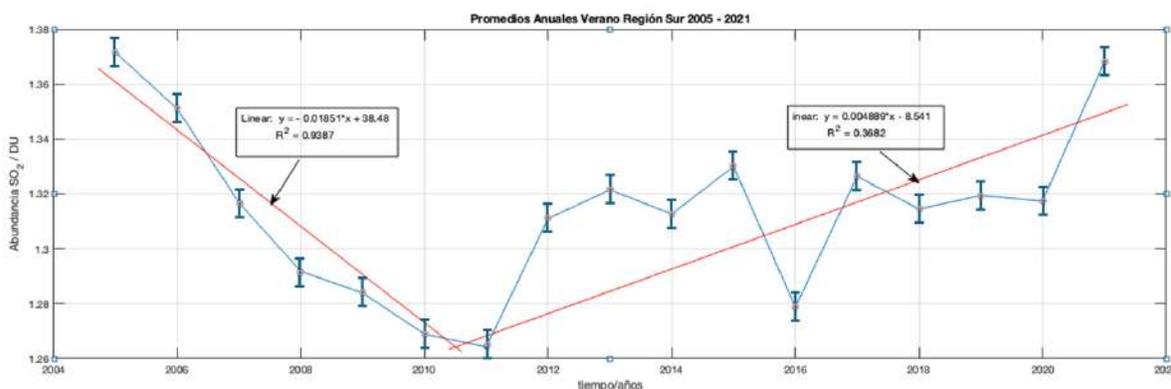
Nota. Promedios período invierno, para la región Norte 2005-2021. Gráfica elaborada con Matlab 2022a [90].

Los promedios durante el invierno para la abundancia en la región Norte (figura 5.4) presenta un comportamiento constante, con muy poca tendencia al alza. Se observa que para el año 2012, la abundancia de SO_2 es la menor de todo el período.

No se encuentra a nivel mundial un comportamiento que pueda justificar este descenso, sin embargo, se observa al comparar las figuras 5.3 y 5.4, que las abundancias en promedio tienen valores más bajos en la región norte, con una variación de entre 1.13 DU y 1.133 DU en comparación con la región sur 1.28 DU y 1.35 DU.

Es importante tomar en cuenta que esta región es principalmente formada por la reserva ecológica maya. La reserva natural, no posee industria y no existen volcanes activos.

Figura 5.5 Anuales Verano Región Sur

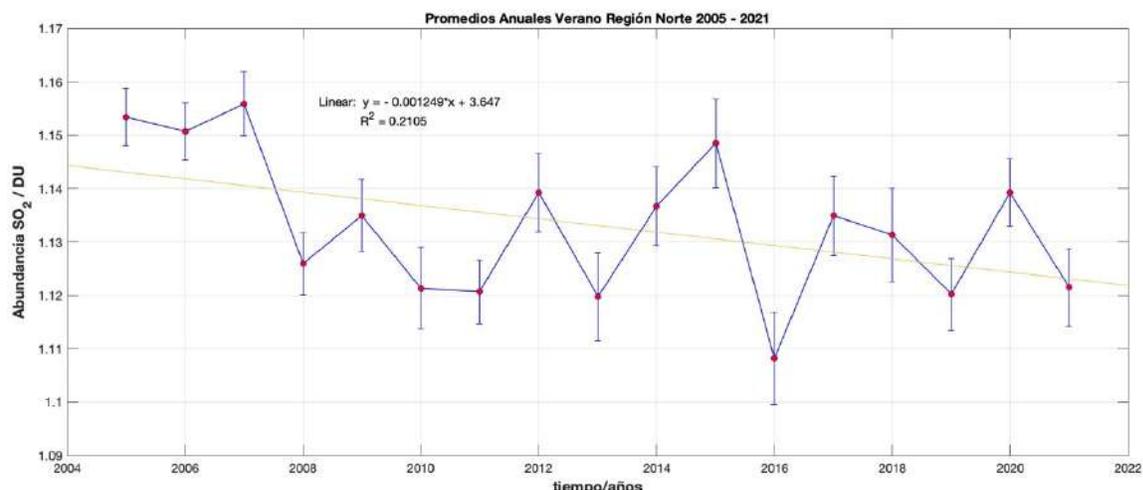


Nota. Promedios anuales verano, para la región Sur 2005-2021. Gráfica elaborada con Matlab 2022a [90].

De la figura 5.5, se observa que las abundancias para la región sur, en verano, presentan un comportamiento similar a las que corresponden con la época de invierno, incluso presentan los mismos rangos de abundancia, entre 1.26 DU y 1.37 DU, lo cual indica que las emisiones anuales no dependen de la estación climática del año para esta región. Se observa también que para el año 2020, se reduce la abundancia, esto probablemente se deba a la pandemia del COVID 19. El año 2016 presenta una reducción considerable en la abundancia, es necesario realizar más estudios para analizar los fenómenos ocurridos para este año.

Con relación al inicio de la serie temporal, la tendencia en la reducción para verano abarca desde el año 2005 y se alarga incluso hasta el año 2011, a diferencia de la figura 5.3, en donde la abundancia de menor SO₂ se aprecia en el año 2009.

Figura 5.6 Promedios Anuales Verano Región Norte



Nota. 5.6 Promedios anuales verano, para la región Norte 2005-2021. Gráfica elaborada con Matlab 2022a [90].

En la figura 5.6 se observan los promedios de los veranos para la región norte, se aprecia un descenso marcado en la abundancia de SO₂. Para el año 2016 se visualiza el valor mínimo de toda la serie, de 1.10 DU.

Es importante notar que las abundancias poseen valores más pequeños que los de la región sur, nuevamente esto se debe a que en la región sur se encuentran los volcanes activos y la zona industrial del país.

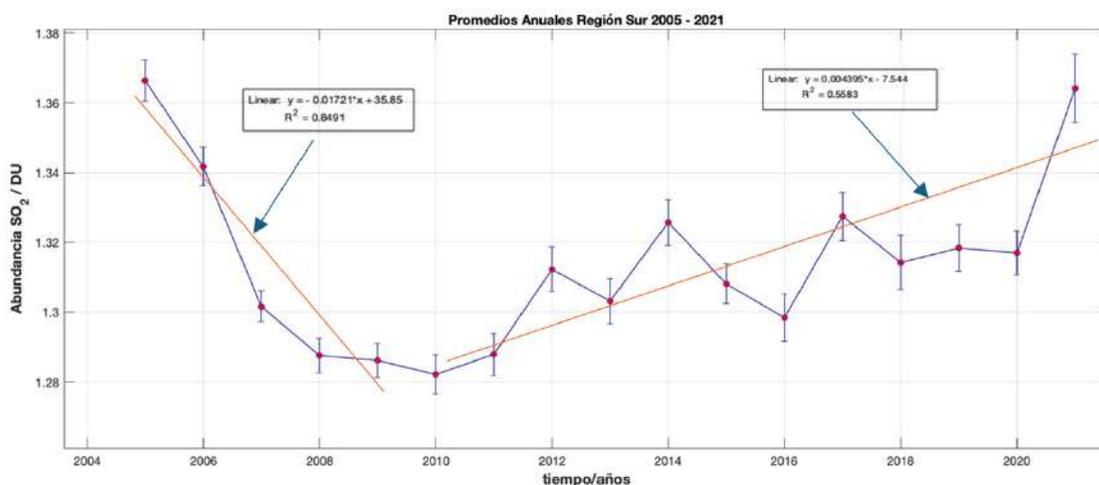
5.1.2 Series temporales de promedios anuales

Se realizaron series temporales de promedios anuales considerando todo el territorio guatemalteco. La región sur (Figura 5.7) presenta un comportamiento similar al que muestran las estaciones climáticas individuales, verano - invierno, es decir, la serie temporal no parece depender de las estaciones climáticas, presentando de igual forma un valor mínimo en las abundancias para el año 2010.

Luego se observa un crecimiento constante hasta el año 2020, que debido a la pandemia del COVID-19, las emisiones se redujeron en relación con la tendencia que trae de los años anteriores.

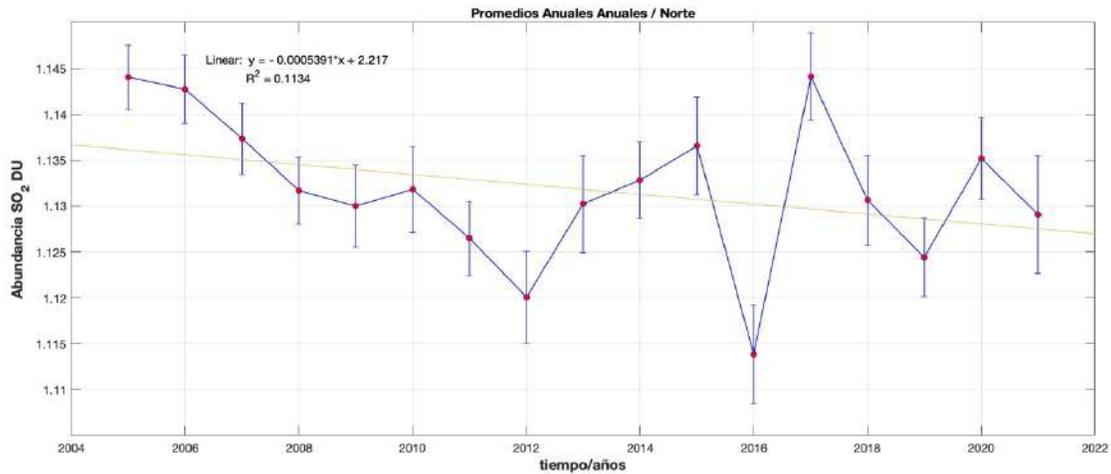
Para el año 2021, las abundancias de nuevo incrementan hasta alcanzar valores equivalentes a los del año 2005. De nuevo se estima que, a pesar del incremento de la producción de energía, desarrollo industrial y parque vehicular, las abundancias del año 2020 son equivalentes a las del 2005, alrededor de 1.365 DU. Esto se entiende debido a la aplicación de ciertas políticas ambientales, y la modernización del parque vehicular y de la tecnología para la generación eléctrica.

Figura 5.7 Promedios Anuales Región Sur



Nota. Promedios anuales totales, para la región Sur 2005-2021. Gráfica elaborada con Matlab 2022a [90].

Figura 5.8 Promedios Anuales Norte



Nota 5.8 Promedios anuales totales, para la región Norte 2005-2021. Gráfica elaborada con Matlab 2022a [90].

La serie temporal de los promedios anuales para la región norte (figura 5.8) presentan una tendencia a la baja, con una abundancia en general menor a la que muestra la región sur, de nuevo no existe dependencia de las abundancias con relación a la estación climática del año. El mínimo encontrado para esta serie se presenta en el año 2016.

5.2 Periodicidad

Para comprender si existe una periodicidad se empleó el método de la transformada rápida de Fourier [90] aplicado a las contribuciones naturales en las cuales no se observó ciclicidad, esto ya se esperaba, debido a que las principales contribuciones naturales (volcanes) no tienen ciclos definidos y por tanto no es posible predecir algún período temporal en este tipo de eventos.

Al aplicar la transformada rápida de Fourier a las contribuciones antropogénicas se obtiene períodos bien definidos, los cuales se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1
Períodos principales

	Período (días)
1	6003
2	3015
3	182
4	7

Nota. Períodos principales por medio de transformada rápida de Fourier, FFT. Elaboración propia con datos generados de Matlab 2020a [90].

Los períodos 1 y 2 de la Tabla 5.1, corresponden con 6003 y 3015 días respectivamente, el primero corresponde con la totalidad de datos analizados y el segundo con la mitad de estos, estos períodos no son relevantes ya que debido al algoritmo de transformada rápida de Fourier utilizado, estas ciclicidades son soluciones triviales.

Los períodos interesantes de estudiar son los que corresponden con 182 y 7 días respectivamente. El primero corresponde con una variación semestral de las abundancias antropogénicas, lo cual se explica con variaciones en actividad industrial, principalmente con zafra, actividad que está muy ligada con la demanda y generación de energía por diferentes tecnologías [79], [3].

El período de 7 días es más interesante ya que corresponde con variaciones `semanales` en los aumentos de abundancia de SO_2 , esto se asocia con las actividades de inicio de semana y a las emisiones provocadas por el transporte en general, carga, movilidad, y los ciclos de producción de actividades industriales, que por su carácter poseen períodos de producción semanal.

5.3 Distribución Espacial del Gas

En el mapa 5.1 se observan la abundancia de SO₂ en todo el territorio de Guatemala en el período 2005–2021 abarcando el intervalo completo de estudio. Este análisis revela que las mayores abundancias de este contaminante se encuentran predominantemente en sur del país, en la región que se ha separado como región sur. En esta parte se encuentra la mayor actividad industrial del país, generadoras eléctricas [79] y producción azucarera [80].

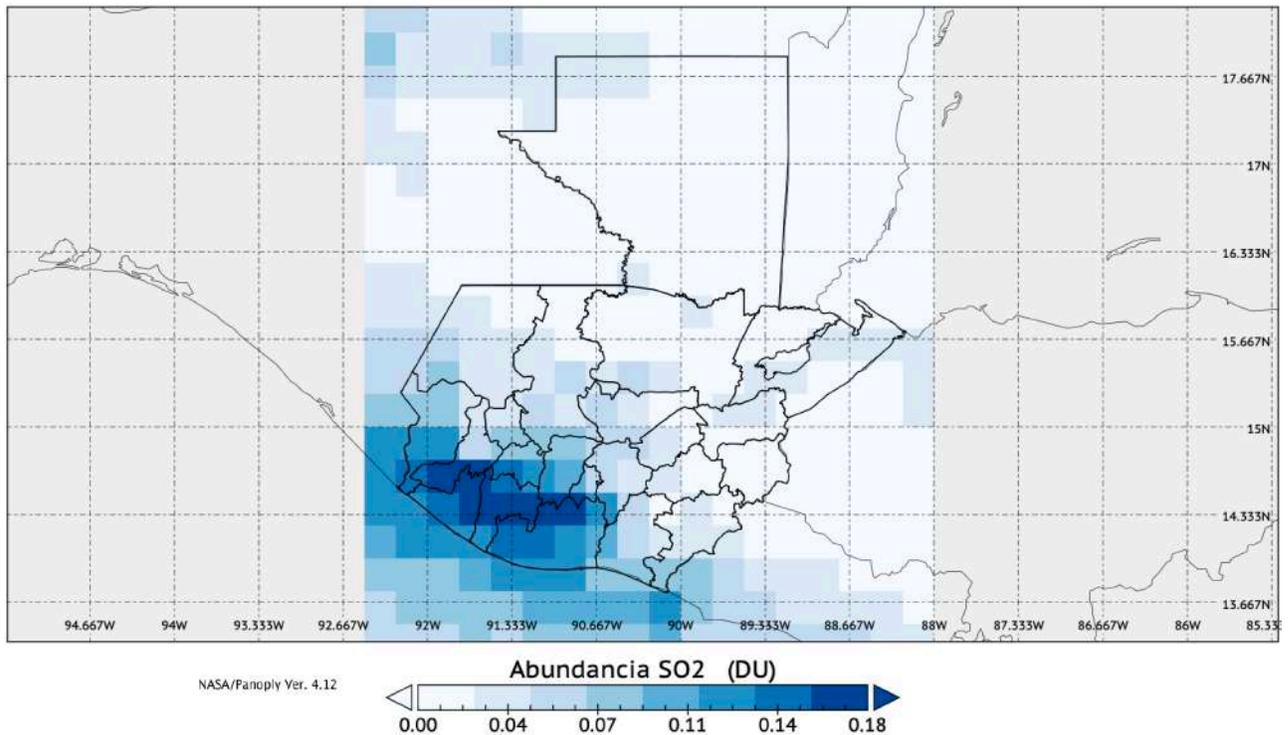
La región sur es también hogar de los tres volcanes activos de Guatemala: Fuego, Pacaya y Santiaguito. Estos volcanes contribuyen de manera natural a las emisiones de SO₂, generando picos de contaminación que se suman a las fuentes antropogénicas.

La combinación de estas actividades industriales con la intensa actividad volcánica explica una alta abundancia de SO₂ en esta región, haciendo de esta zona un punto crítico para el monitoreo y estudio.

Resaltan también las abundancias que se propagan hacia el océano pacífico y que proceden de El Salvador, esto es producido por la contaminación de SO₂, que proviene del volcán Santa Ana, del mencionado país.

Mapa 5.1

Distribución de SO₂ entre 2005 y 2021.



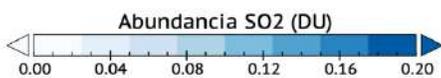
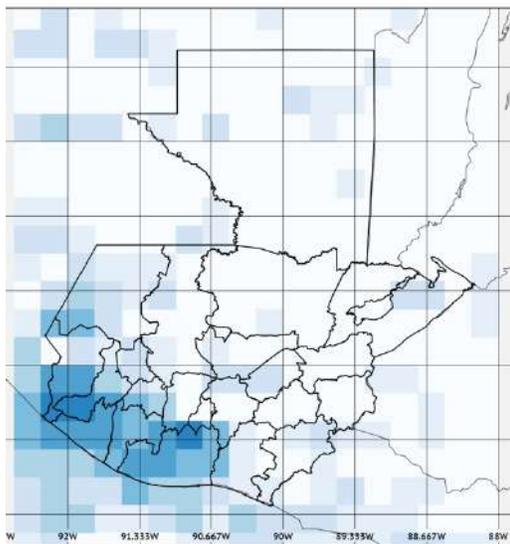
Nota. Columna de abundancia de SO₂, sobre Guatemala, período 2005-2021. Mapa generado con Panoply NASA, Ver 4.12. (Stohl et al., 2003) [75] [24].

Del Mapa 5.1 también se observa que las contribuciones a la atmósfera de las abundancias del SO₂ provenientes de la región norte son bajas en comparación con la contribución que hace la región sur. Esto se observa de la misma forma cuando se analizaron las series temporales de cada región, 'norte – sur'.

No se observan abundancias de SO₂ provenientes de México y Honduras, sin embargo, es necesario realizar más estudios con modelos de dispersión para verificar esta afirmación.

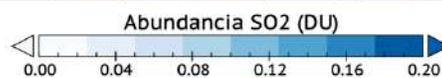
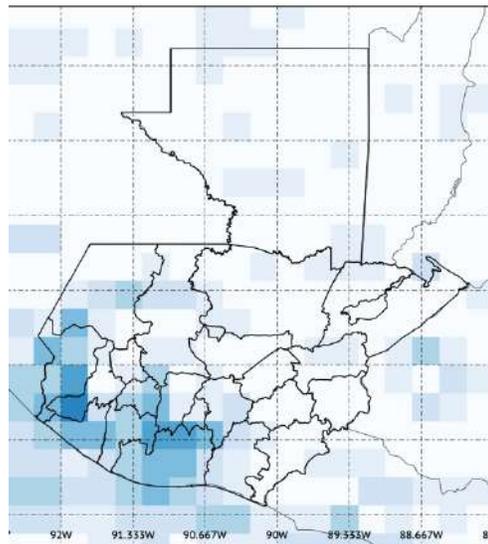
Mapa 5.2 Abundancias de SO₂

2007



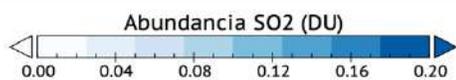
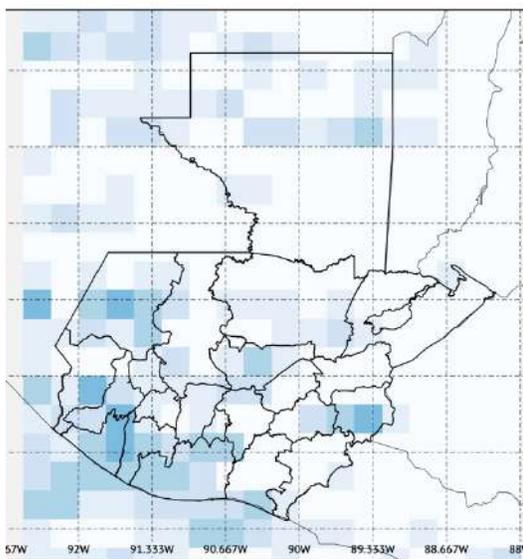
a.

2009



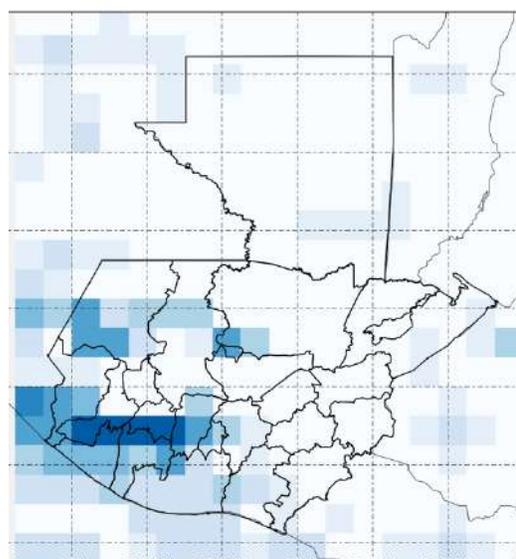
b.

2010



c.

2011



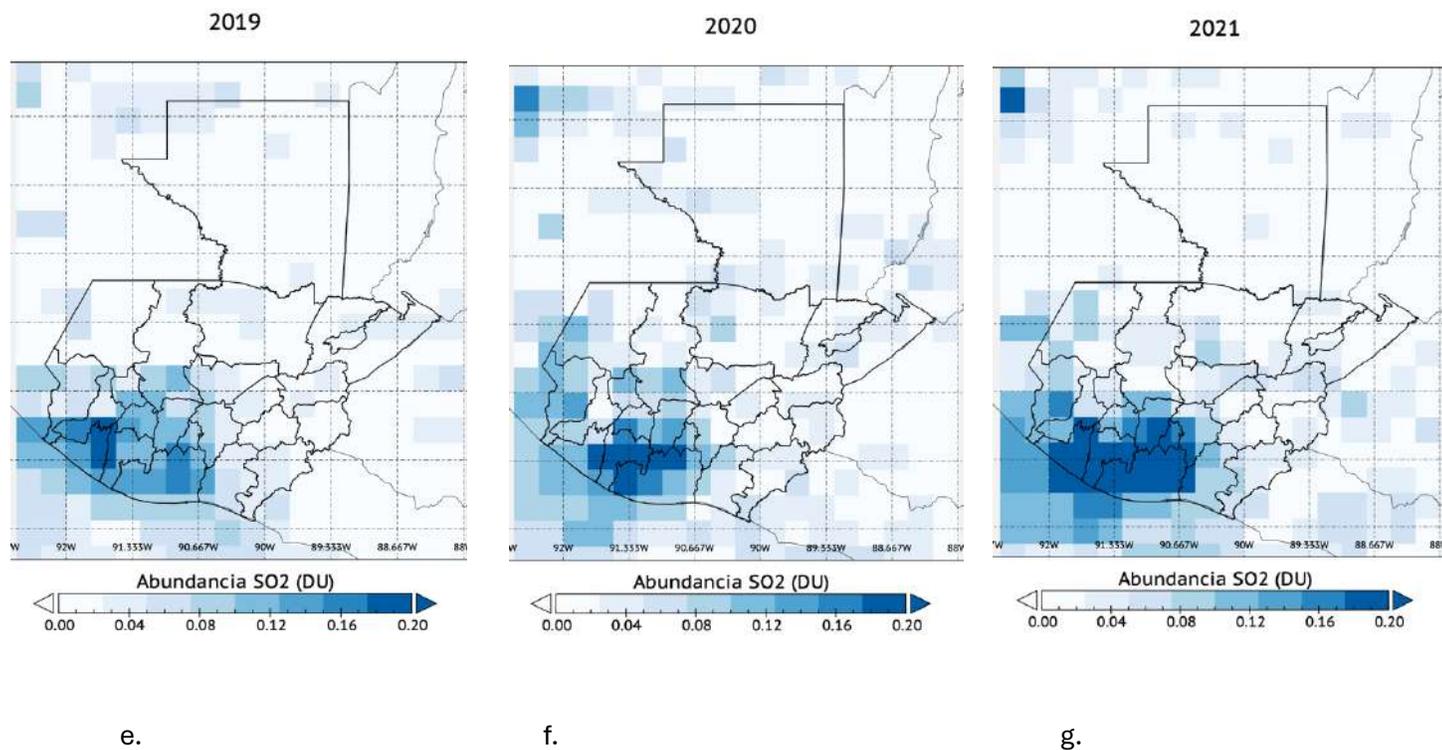
d.

Nota. Mapas de Columna de abundancia de SO₂, sobre Guatemala. a. 2007, b. 2009, c. 2010, d. 2011.

Mapas generados con Panoply NASA, Ver 4.12. [75] [24].

Mapa 5.3

Abundancia de SO₂



Nota. 5.3 Mapas de Columna de abundancia de SO₂, sobre Guatemala e. 2019, f. 2020, g. 2021. Mapas generados con Panoply NASA, Ver 4.12. [75].

Los mapas 5.2 a, b, c y d, muestran la distribución espacial en el territorio de Guatemala del SO₂, para los años 2007, 2009, 2010 y 2011 respectivamente.

Se han seleccionado esos años, donde se aprecia la reducción en general de la abundancia del SO₂, una reducción de 0.17 DU a 0.12 DU del año 2007 al 2011, esto se manifiesta también en las series temporales para la región Sur (figura 5.7), donde hay un descenso hasta el año 2010. De igual forma se observa el incremento en la abundancia que se da para el año 2011, en donde el máximo se sitúa en 0.26 DU.

Se han seleccionado para su análisis los mapas 5.3 e, f, y g, que corresponden con los años 2019, 2020 y 2021 respectivamente, ya que es el período de tiempo que corresponde con la pandemia del COVID-19. Se observa que existe una reducción, de 0.24 DU a 0.22 DU del año 2019 al 2020, para luego aumentar a 0.43 DU en el año 2021.

En los mapas analizados, se detecta que las mayores abundancias de SO₂, se desplazan hacia la región Sur, área del país con mayor industria y volcanes activos, fortaleciendo lo encontrado en las series temporales.

6 SEXTO CAPÍTULO. MODELO DE DISPERSIÓN. HYSPLIT

6.1 Introducción

Los pronosticadores de calidad del aire, los equipos de respuesta a emergencias, la industria de la aviación, las agencias gubernamentales y la comunidad investigadora en ciencias atmosféricas requieren herramientas avanzadas para analizar y predecir el transporte y la dispersión de contaminantes en la atmósfera. En respuesta a esta demanda, se ha desarrollado continuamente desde 1997 el sistema web único denominado Real-time Environmental Applications and Display System (READY) [95]. Este sistema proporciona acceso a un conjunto de herramientas diseñadas para generar resultados de modelos de trayectoria y dispersión de partículas en el aire, además de visualizar datos meteorológicos de manera efectiva.

El modelo HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) es una herramienta computacional desarrollada por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y el ARL (Air Resources Laboratory) para simular la dispersión y el transporte de contaminantes atmosféricos [96]

Este modelo combina enfoques lagrangianos y eulerianos para proporcionar predicciones precisas y detalladas del movimiento de partículas en la atmósfera. HYSPLIT es ampliamente utilizado para estudiar diversos fenómenos atmosféricos, incluidos el transporte de contaminantes, las trayectorias de partículas y la deposición de aerosoles y gases [96].

El modelo HYSPLIT se destaca como una herramienta de análisis extremadamente útil para la simulación de dispersiones y trayectorias de partículas en la atmósfera. Su capacidad para integrar datos meteorológicos detallados y simular la dispersión de contaminantes lo convierte en una herramienta poderosa para la investigación ambiental y la gestión de la calidad del aire. Aunque su

aplicación directa no es el objetivo principal de este doctorado, se presenta como una herramienta fundamental que puede ser utilizada en futuras investigaciones, presentando algunos ejemplos puntuales sobre eventos en el territorio guatemalteco. La inclusión de HYSPLIT en este trabajo tiene como propósito destacar su relevancia y potencial en estudios avanzados sobre la dispersión de contaminantes y las trayectorias de partículas, proporcionando una base sólida para investigaciones futuras que busquen explorar estos fenómenos en mayor profundidad.

La decisión de no aplicar HYSPLIT directamente en este doctorado se debe a que el enfoque principal de esta investigación está orientado hacia la descripción y análisis del comportamiento del SO_2 sobre el territorio de Guatemala. Sin embargo, al describir y analizar las capacidades de HYSPLIT, se sientan las bases para que futuros investigadores puedan aprovechar esta herramienta en estudios investigativos. De esta manera, se abre un camino para que futuros trabajos académicos y proyectos de investigación utilicen HYSPLIT como una herramienta clave para modelar y comprender mejor la dispersión de contaminantes y las trayectorias de partículas en la atmósfera, fortaleciendo así el conocimiento y la capacidad de respuesta ante problemas ambientales complejos.

6.2 Breve descripción del modelo HYSPLIT

HYSPLIT utiliza un enfoque híbrido que integra métodos lagrangianos y eulerianos para simular el transporte y la dispersión de partículas en la atmósfera. En el enfoque lagrangiano, las trayectorias de las partículas individuales se calculan a medida que se mueven con el flujo de viento. En el enfoque euleriano, las concentraciones de contaminantes se calculan en una cuadrícula fija. Esta combinación permite al modelo capturar tanto los movimientos detallados de partículas individuales como las distribuciones espaciales y temporales de las concentraciones de contaminantes [97].

El modelo HYSPLIT requiere datos meteorológicos precisos para funcionar correctamente, estos se obtienen de modelos numéricos de predicción del tiempo y de observaciones meteorológicas, y se utilizan para simular las condiciones atmosféricas que afectan el transporte y la dispersión de contaminantes. HYSPLIT puede realizar simulaciones de trayectorias adelantadas y trayectorias retrasadas en el tiempo, lo que permite rastrear la fuente de contaminación o predecir la dispersión de emisiones futuras [97].

El modelo también incluye módulos para simular la deposición seca y húmeda de contaminantes, proporcionando una visión completa del destino final de las partículas y gases en la atmósfera.

6.3 Importancia y aplicaciones del modelo en estudios ambientales

El modelo HYSPLIT es una herramienta esencial en la investigación y gestión ambiental debido a su capacidad para simular de manera precisa el transporte y la dispersión de contaminantes en la atmósfera. Una de las aplicaciones más destacadas de HYSPLIT es el monitoreo de la dispersión de cenizas volcánicas.

Durante una erupción volcánica, el modelo puede predecir la trayectoria de las nubes de ceniza, lo cual es crucial para la seguridad de la aviación y la salud pública. Estudios como los realizados por [95] han demostrado la eficacia de HYSPLIT en la predicción de la dispersión de cenizas volcánicas y su impacto en el tráfico aéreo.

Otra aplicación importante de HYSPLIT es la evaluación de la dispersión de contaminantes industriales. El modelo se utiliza para simular la dispersión de emisiones de fábricas y plantas de energía, permitiendo a investigadores y a los responsables de políticas evaluar el impacto de estas emisiones en la calidad del aire y la salud pública. Se ha utilizado HYSPLIT para estudiar la dispersión de emisiones de una planta química [98], demostrando cómo el modelo puede ayudar

a identificar áreas afectadas por la contaminación y a desarrollar estrategias de mitigación.

HYSPLIT también se utiliza en estudios de transporte de contaminantes a larga distancia, como el seguimiento de plumas de contaminación transfronteriza. Este tipo de estudios es crucial para comprender el impacto global de las emisiones locales y para desarrollar políticas ambientales internacionales.

Por ejemplo, [99] utilizaron HYSPLIT para rastrear la dispersión de contaminantes desde Asia hasta América del Norte, proporcionando evidencia de la interconexión global de la contaminación atmosférica.

6.4 Fundamentos Teóricos del Modelo HYSPLIT

El modelo HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) se basa en un conjunto de fundamentos teóricos que integran enfoques lagrangianos y eulerianos para simular con precisión el transporte y la dispersión de partículas en la atmósfera. Este enfoque híbrido permite capturar tanto los movimientos detallados de partículas individuales como las distribuciones espaciales y temporales de las concentraciones de contaminantes.

6.4.1 Conceptos básicos del transporte y dispersión atmosférica

La dispersión atmosférica es un proceso complejo influenciado por múltiples factores meteorológicos y topográficos. El transporte de contaminantes en la atmósfera es gobernado por las ecuaciones de movimiento de fluidos y las leyes de la termodinámica. Estas ecuaciones describen cómo las partículas y gases se desplazan debido a las fuerzas del viento, la turbulencia atmosférica y otros factores ambientales.

6.4.2 Enfoque Lagrangiano

En el enfoque lagrangiano, el movimiento de los contaminantes se modela rastreando trayectorias individuales de partículas a lo largo del tiempo. Cada partícula se considera como un punto que se desplaza con el flujo de viento, y su trayectoria se calcula utilizando las velocidades del viento y los coeficientes de difusión [98]. La ecuación de movimiento básica para una partícula en este enfoque es:

$$\frac{dx}{dt} = v(x, t) + u'(t)$$

donde:

- x es la posición de la partícula
- $v(x, t)$ es la velocidad del viento en la posición x y en el tiempo t
- $u'(t)$ es un término de fluctuación aleatoria que representa la turbulencia atmosférica

Este enfoque es particularmente útil para modelar el transporte de contaminantes a nivel microscópico, permitiendo una simulación detallada de las trayectorias individuales de las partículas [98]. El enfoque lagrangiano es efectivo para capturar las características de dispersión en escalas pequeñas y para seguir el comportamiento de las partículas en condiciones complejas de flujo, como en la proximidad de fuentes puntuales o durante eventos de contaminación específicos.

Una de las ventajas clave del enfoque lagrangiano es su capacidad para modelar la dispersión en condiciones de turbulencia atmosférica. La turbulencia, que se refiere a las fluctuaciones caóticas en el flujo de aire, juega un papel crucial en la dispersión de contaminantes. Mediante la inclusión del término de fluctuación aleatoria $u'(t)$, el enfoque lagrangiano puede simular cómo las partículas se dispersan debido a la turbulencia, proporcionando una visión más realista del transporte de contaminantes en la atmósfera [99].

6.4.3 Enfoque Euleriano

En el enfoque euleriano, la concentración de contaminantes se calcula en una cuadrícula fija. Este enfoque utiliza la ecuación de advección-difusión para modelar cómo las concentraciones de contaminantes cambian en el tiempo y el espacio:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla C = \nabla \cdot (K \nabla C) + S$$

Donde:

- C es la concentración del contaminante
- \vec{u} es la velocidad del viento
- K es el tensor de difusividad
- S es la fuente o sumidero del sistema

El enfoque euleriano es ideal para capturar la distribución espacial de los contaminantes en una escala más amplia, proporcionando una visión global de las concentraciones y su evolución en el tiempo [98]. Este enfoque es particularmente útil para modelar contaminantes en áreas extensas y para integrar efectos de múltiples fuentes de emisión sobre una región específica.

Una de las principales ventajas del enfoque euleriano es su capacidad para manejar interacciones complejas entre diferentes procesos atmosféricos. Por ejemplo, la advección describe el transporte de contaminantes debido al movimiento del aire, mientras que la difusión describe cómo los contaminantes se dispersan debido a gradientes de concentración. La ecuación de advección-difusión euleriana puede integrar estos procesos para proporcionar una imagen completa de cómo los contaminantes se mueven y se mezclan en la atmósfera [95].

6.4.4 Integración del Enfoque Híbrido

El modelo HYSPLIT integra estos dos enfoques para maximizar sus ventajas. En este enfoque híbrido, las trayectorias de las partículas calculadas mediante el método lagrangiano se utilizan para alimentar el modelo euleriano, que luego calcula las distribuciones de concentración en una cuadrícula fija. Este proceso permite a HYSPLIT combinar la precisión de las simulaciones de trayectorias individuales con la capacidad de modelar distribuciones de contaminantes en escalas amplias.

Por ejemplo, las trayectorias lagrangianas pueden proporcionar información detallada sobre el transporte de contaminantes desde una fuente puntual específica, mientras que el modelo euleriano puede utilizar esta información para calcular cómo las concentraciones de estos contaminantes se distribuyen en una región más amplia y cómo evolucionan en el tiempo [98].

El enfoque híbrido también facilita la incorporación de procesos adicionales como la deposición seca y húmeda. Las trayectorias de las partículas pueden ser ajustadas para considerar la deposición a lo largo de su camino, y el modelo euleriano puede ajustar las concentraciones de contaminantes en la cuadrícula en función de estas pérdidas.

El enfoque híbrido utilizado en HYSPLIT ha demostrado ser altamente efectivo en diversas aplicaciones, tales como:

- **Monitoreo de erupciones volcánicas:** Permite rastrear la dispersión de cenizas volcánicas en tiempo real, crucial para la aviación y la salud pública [100], [101].
- **Evaluación de la dispersión de contaminantes industriales:** Ayudando a identificar las áreas afectadas por emisiones de fábricas y plantas de energía [102] [103] [104].
- **Estudios de transporte transfronterizo:** Proporcionando una comprensión de la interconexión global de la contaminación atmosférica [99] [95].

6.5 Configuración del Modelo HYSPLIT

La configuración inicial del modelo implica la selección de los parámetros de entrada, que incluyen datos meteorológicos, características de las partículas, y condiciones iniciales y de contorno. Además, la configuración del modelo debe especificar los tipos de simulación a realizar, así como los parámetros específicos para cada tipo, lo que permite personalizar las simulaciones según las necesidades particulares del estudio.

6.5.1 Descripción de los diferentes tipos de simulaciones

Simulaciones de Trayectoria: Este tipo de simulación calcula las trayectorias de partículas individuales a medida que se desplazan con el flujo del viento. Las trayectorias pueden ser calculadas hacia delante (trayectorias adelantadas), para predecir el movimiento futuro de los contaminantes desde una fuente, o hacia atrás (trayectorias retrasadas), para determinar el origen de una pluma de contaminantes observada. Las simulaciones de trayectoria son esenciales para rastrear la dispersión de emisiones específicas, como cenizas volcánicas o contaminantes industriales.

Simulaciones de Dispersión: Las simulaciones de dispersión modelan cómo se dispersan las partículas en la atmósfera a medida que se transportan. Estas simulaciones consideran procesos como la difusión turbulenta, la sedimentación y la deposición seca y húmeda. Las simulaciones de dispersión son fundamentales para evaluar la calidad del aire y predecir el impacto de las emisiones en la salud humana y el medio ambiente.

Simulaciones de Depósito: Este tipo de simulación se centra en el cálculo de la deposición de partículas y gases en la superficie terrestre. La deposición puede ser seca, donde las partículas se depositan directamente en el suelo o la vegetación, o

húmeda, donde las partículas son capturadas por la precipitación y depositadas. Las simulaciones de depósito son cruciales para estudiar el impacto de la lluvia ácida y la transferencia de contaminantes a los ecosistemas terrestres y acuáticos.

Simulaciones de Concentración: Las simulaciones de concentración calculan las concentraciones de contaminantes en una cuadrícula fija, permitiendo la evaluación de la distribución espacial y temporal de los contaminantes. Este tipo de simulación es útil para generar mapas de concentración y evaluar la exposición de la población a los contaminantes.

6.5.2 Parámetros de entrada y su configuración

La configuración del modelo HYSPLIT comienza con la definición precisa de los parámetros de entrada, esenciales para garantizar la precisión de las simulaciones de transporte y dispersión de contaminantes atmosféricos. Estos parámetros incluyen datos meteorológicos, propiedades de las partículas, y condiciones iniciales y de contorno.

6.5.2.1 Datos Meteorológicos

Los datos meteorológicos son fundamentales para la configuración del modelo HYSPLIT, ya que proporcionan información detallada sobre la velocidad del viento, la temperatura, la humedad relativa y la presión atmosférica [98]. Estos datos se obtienen de modelos de predicción meteorológica numérica y se integran en HYSPLIT para simular condiciones atmosféricas reales.

Los datos de velocidad y dirección del viento son particularmente críticos, ya que determinan la trayectoria de las partículas. Estos datos se representan como campos vectoriales de viento $\vec{V}(x, y, z, t)$, que se utilizan para calcular el transporte adveccional de las partículas [95].

$$\vec{V}(x, y, z, t) = \left(\frac{\partial x}{\partial t}, \frac{\partial y}{\partial t}, \frac{\partial z}{\partial t} \right)$$

6.5.2.2 Propiedades de las Partículas

Las propiedades físicas y químicas de las partículas o gases que se están modelando también son cruciales. Estos incluyen la masa, densidad, tamaño, coeficiente de sedimentación y coeficiente de difusión de las partículas. Para gases, se consideran factores como la reactividad química y la solubilidad en agua.

La precisión de la simulación depende en gran medida de la exactitud con la que se configuren estos parámetros. Por ejemplo, el coeficiente de sedimentación, V_s , afecta la tasa a la cual las partículas se depositan en la superficie terrestre [105], y viene dado como:

$$V_s = \frac{2}{9} \frac{(\rho_p - \rho_a) g r^2}{\eta}$$

Donde: ρ_p es la densidad de las partículas

ρ_a es la densidad del aire

η es la viscosidad del aire

6.5.2.3 Condiciones Iniciales y de Frontera

Las condiciones iniciales se refieren a la ubicación y el tiempo de emisión de las partículas o gases. Estas se establecen con base en datos observacionales o estimaciones razonables derivadas de estudios previos. Las condiciones de contorno, por otro lado, incluyen las limitaciones espaciales y temporales del modelo. Estas condiciones determinan el dominio espacial y el periodo de tiempo de la simulación. La configuración de estas condiciones debe ser cuidadosamente considerada para asegurar que la simulación sea representativa de las condiciones reales [95].

6.5.3 Trayectorias de Partículas

Las trayectorias de partículas son una parte fundamental del modelo HYSPLIT y se utilizan para rastrear el movimiento de partículas individuales a través de la atmósfera. Estas trayectorias se calculan utilizando un enfoque híbrido que combina los métodos lagrangianos y eulerianos. El enfoque lagrangiano sigue las trayectorias de partículas individuales a medida que se mueven con el flujo del viento, mientras que el enfoque euleriano utiliza una cuadrícula fija para calcular las concentraciones de contaminantes.

6.5.3.1 Cálculo de trayectorias adelantadas y retrasadas

El cálculo de trayectorias adelantadas y retrasadas es una técnica clave en el uso de HYSPLIT. Las trayectorias hacia adelante se utilizan para predecir el movimiento futuro de las partículas desde una fuente específica. Este tipo de simulación es útil para pronosticar la dispersión de contaminantes y evaluar el impacto potencial en áreas receptoras. La posición futura de una partícula en el tiempo $t + \Delta t$ se puede calcular utilizando la ecuación de advección [98]:

$$\vec{x}(t + \Delta t) = \vec{x}(t) + \vec{V}(\vec{x}, t) \Delta t$$

donde

\vec{x} es la posición de la partícula

\vec{V} es la velocidad del viento

En contraste, las trayectorias hacia atrás se utilizan para determinar el origen de una pluma de contaminantes observada. Este método es esencial para identificar las fuentes de contaminación y establecer relaciones fuente-receptor. La trayectoria inversa se calcula rastreando las partículas hacia atrás en el tiempo desde una ubicación de observación específica [105].

6.6 Aplicaciones de HYSPLIT para el territorio de Guatemala

El modelo HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) se presenta como una herramienta poderosa y versátil para el análisis de la dispersión y transporte de contaminantes atmosféricos en el territorio de Guatemala.

Dada la compleja topografía del país, que incluye una cadena de volcanes activos, extensas áreas agrícolas y urbanas, y una diversidad de climas, el uso de HYSPLIT es crucial para comprender mejor los patrones de contaminación y sus impactos ambientales y de salud. La capacidad de HYSPLIT para integrar datos meteorológicos detallados y simular la dispersión de contaminantes proporciona información precisa sobre la distribución espacial y temporal de las partículas y gases emitidos en la atmósfera guatemalteca [95].

Guatemala enfrenta desafíos significativos en la gestión de la calidad del aire debido a fuentes naturales y antropogénicas de contaminación, como las erupciones volcánicas, la quema de combustibles fósiles y las emisiones industriales.

El modelo HYSPLIT permite simular cómo estas emisiones se dispersan en la atmósfera, proporcionando datos valiosos sobre la trayectoria y concentración de los contaminantes.

Estas simulaciones son esenciales para prever episodios de alta contaminación, planificar respuestas a emergencias y diseñar políticas ambientales efectivas [105]. Por ejemplo, la capacidad de HYSPLIT para modelar la dispersión de cenizas volcánicas es crucial para la aviación y la protección de la salud pública en regiones cercanas a los volcanes activos [97].

La aplicación de HYSPLIT en Guatemala no solo se limita a la modelación de eventos de contaminación actuales, sino que también ofrece la capacidad de realizar estudios retrospectivos para identificar fuentes de contaminación pasadas y sus impactos. Además, el modelo puede ser utilizado para proyectar escenarios futuros bajo diferentes condiciones climáticas y de emisión, lo que es crucial para la planificación a largo plazo en la gestión de la calidad del aire. En conjunto, HYSPLIT se posiciona como una herramienta indispensable para investigadores, autoridades ambientales y responsables de políticas en Guatemala, proporcionando un soporte robusto para la toma de decisiones informadas y la protección del medio ambiente y la salud pública [95].

6.6.1 Modelado de Cenizas Volcánicas

El modelado de cenizas volcánicas es una aplicación crítica del modelo HYSPLIT, especialmente relevante para países como Guatemala, que se encuentran en zonas de alta actividad volcánica. HYSPLIT es una herramienta avanzada desarrollada por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y el ARL (Air Resources Laboratory) que permite simular la dispersión y deposición de cenizas volcánicas en la atmósfera, proporcionando información crucial para la seguridad aérea, la gestión de emergencias y la salud pública [95].

6.6.1.1 Importancia del Monitoreo de Cenizas

Las erupciones volcánicas liberan grandes cantidades de ceniza en la atmósfera, las cuales pueden ser transportadas a largas distancias por los vientos atmosféricos. La ceniza volcánica representa una amenaza significativa para la aviación, ya que puede dañar los motores de las aeronaves y reducir la visibilidad.

Además, la deposición de ceniza puede afectar la infraestructura, la agricultura y la salud humana. Por lo tanto, es esencial predecir con precisión la dispersión de la ceniza para mitigar estos riesgos.

6.6.1.2 Beneficios del Modelado de Cenizas y Gases

El uso de HYSPLIT para el modelado de cenizas volcánicas proporciona varias ventajas. Primero, permite predecir la dispersión de ceniza en tiempo real, lo que es crucial para la emisión de alertas y la toma de decisiones rápidas durante una erupción volcánica. Segundo, HYSPLIT puede realizar simulaciones retrospectivas para analizar eventos eruptivos pasados, lo que ayuda a mejorar la comprensión de los patrones de dispersión y a desarrollar mejores modelos predictivos para el futuro [97].

Además, las simulaciones de HYSPLIT pueden integrarse con datos de observación de satélites y estaciones terrestres para validar y ajustar los modelos, aumentando así su precisión. Este enfoque integrado es fundamental para garantizar que las predicciones sean fiables y útiles para la gestión de desastres y la planificación a largo plazo.

6.6.1.3 Caso de Estudio I: Erupción Volcán de Fuego junio 2018

La erupción del volcán de Fuego en Guatemala el 3 de junio de 2018 fue uno de los eventos volcánicos más significativos y devastadores de la región en las últimas décadas. Esta erupción produjo una gran cantidad de cenizas y gases que se dispersaron rápidamente en la atmósfera, afectando no solo a Guatemala sino también a territorios vecinos como México.

El modelo HYSPLIT puede ser una herramienta clave para analizar y predecir la dispersión de estos materiales volcánicos, proporcionando información esencial para la gestión de emergencias y la mitigación de riesgos.

Descripción del Evento y Datos Utilizados

La erupción del volcán de Fuego en 2018 generó una columna eruptiva que alcanzó altitudes superiores a los 10 km, dispersando cenizas y gases como SO_2 a través de una vasta región. Para modelar este evento con HYSPLIT, se integran datos meteorológicos de alta resolución obtenidos de modelos de predicción numérica del tiempo, incluyendo variables como la velocidad y dirección del viento, la temperatura y la humedad relativa. Estos datos son fundamentales para simular con precisión la trayectoria y dispersión de las partículas de ceniza y los gases emitidos durante la erupción [95].

La configuración del modelo también requiere especificar parámetros eruptivos como la tasa de emisión de ceniza, la altura de la columna eruptiva y el tamaño de las partículas. Estos parámetros pueden obtenerse de observaciones directas y estimaciones de estudios previos sobre el comportamiento del volcán de Fuego [15] [71].

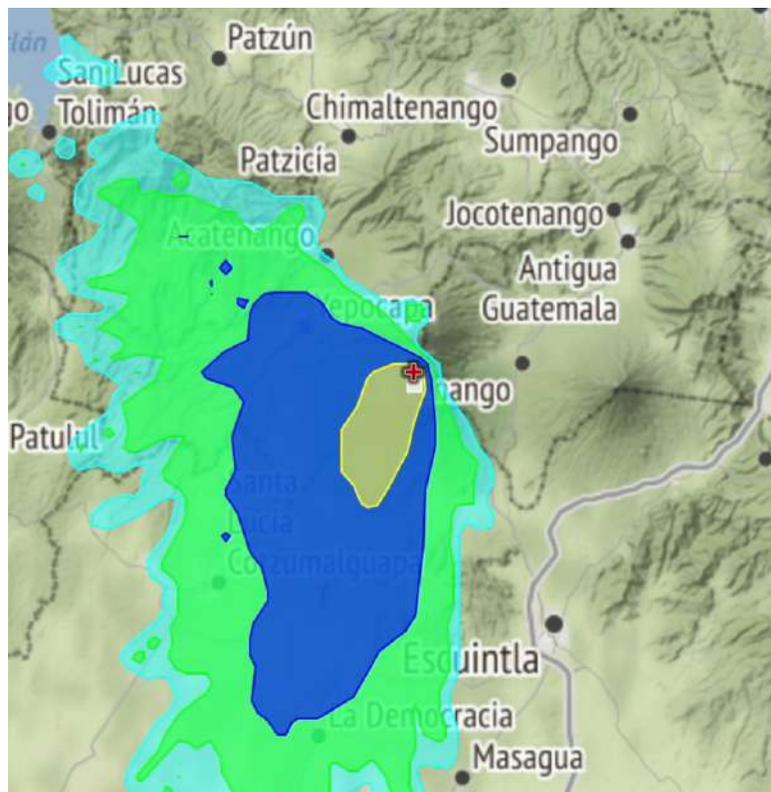
El modelo HYSPLIT permite simular la dispersión de cenizas desde el volcán de Fuego hacia Guatemala y México. Las simulaciones muestran en las figuras No. 6.1 a 6.5 cómo las cenizas fueron transportadas por los vientos predominantes hacia el oeste y noroeste, afectando significativamente áreas pobladas y rutas aéreas. La simulación hacia adelante del movimiento de cenizas muestra que las partículas más finas pudieron viajar grandes distancias, mientras que las partículas más gruesas se depositaron más cerca de la fuente [95,98].

La figura 6.1 muestra una modelación, con HYSPLIT de la dispersión de materiales emitidos durante la erupción del volcán de Fuego en Guatemala. El área coloreada en diferentes tonalidades indica la extensión y concentración de la columna de ceniza y gases volcánicos dispersados por la erupción. El área en azul oscuro representa la mayor concentración de estos materiales, mientras que las áreas en verde y azul claro muestran una dispersión menos densa a medida que los materiales volcánicos se alejan del volcán. La región de color beige más cercana

al volcán indica una zona con alta actividad volcánica, donde las emisiones fueron más intensas.

Este análisis, basado en el modelo HYSPLIT, destaca cómo las partículas y gases emitidos por el volcán se propagaron hacia el suroeste, afectando áreas significativas en la región, incluyendo partes de los departamentos de Escuintla y Chimaltenango.

Figura 6.1 *Dispersión de Cenizas*



Nota. Modelación por HYSPLIT de la erupción del volcán de Fuego de Junio de 2018. Realizado por medio de HYSPLIT [106].

Las siguientes figuras No 6.2 a, b, c y d, muestran la evolución temporal de la dispersión de cenizas y gases volcánicos durante la erupción del volcán, utilizando

el modelo HYSPLIT. Cada imagen representa diferentes etapas en la dispersión de las emisiones volcánicas separadas por 5 horas de evolución a medida que se alejan del volcán.

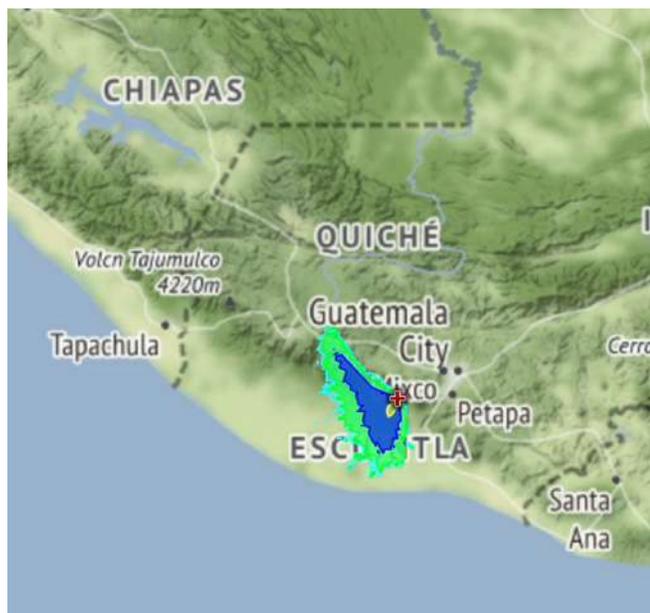
En la imagen **a**, se observa la dispersión inicial de las cenizas volcánicas concentradas en la región sur del país, especialmente alrededor del volcán. La alta concentración en esta área refleja la actividad eruptiva intensa, con una mayor cantidad de ceniza y gases siendo emitidos y dispersados en la atmósfera.

En la figura **b** se muestra cómo las partículas continúan propagándose hacia el noreste, afectando áreas más extensas a medida que se alejan del volcán. Aquí, las emisiones se dispersan más ampliamente debido a las corrientes de viento predominantes y dependiendo de la topografía del lugar, afectando una mayor parte del territorio guatemalteco, e incluso alcanzando áreas en el norte del país.

En el panel **c**, se evidencia una dispersión más avanzada, donde las cenizas han comenzado a desplazarse hacia el oeste, afectando regiones tanto de Guatemala como del sur de México. La disminución en la concentración de partículas indica que las cenizas están siendo diluidas en la atmósfera a medida que se distribuyen sobre un área más amplia.

Finalmente, en la imagen **d** se ilustra la etapa final de la dispersión, donde las cenizas y gases han sido transportados a distancias significativas desde el volcán, con una mayor concentración en el sur de México. La dirección del viento ha llevado los residuos volcánicos hacia el noroeste, lo que resulta en un impacto transfronterizo. Este análisis es crucial para entender cómo las erupciones volcánicas pueden afectar regiones distantes, tanto en términos de calidad del aire como en la posible deposición de materiales volcánicos en áreas habitadas.

Figura 6.2 Evolución de las Cenizas y Gases



a.



b.



c.



d.

Nota. Evolución por modelación de trayectorias adelantadas de las cenizas y gases. Realizado por medio de HYSPLIT [106].

6.6.2 Análisis de la Dispersión de Humo de Incendios

La dispersión del humo generado por incendios forestales y de vertederos constituye un problema ambiental significativo que afecta la calidad del aire y la salud pública. Guatemala, con su geografía diversa y actividad volcánica, enfrenta regularmente desafíos relacionados con incendios forestales y emisiones de vertederos. Estos eventos no solo tienen un impacto local inmediato, sino que también pueden afectar regiones más amplias debido al transporte atmosférico de los contaminantes.

El modelo HYSPLIT es una herramienta esencial para simular y analizar la dispersión de contaminantes atmosféricos como el humo de incendios. HYSPLIT permite predecir la trayectoria y concentración de las partículas emitidas, facilitando la toma de decisiones informadas para la gestión de emergencias y la protección de la salud [95]. La capacidad de este modelo para integrar datos meteorológicos detallados y simular condiciones reales lo convierte en una herramienta indispensable en la gestión de la calidad del aire.

El uso de HYSPLIT en el contexto de incendios forestales y vertederos en Guatemala proporciona una comprensión profunda de cómo los contaminantes se dispersan y afectan áreas circundantes y más lejanas. Los estudios de caso, como el incendio forestal en el Volcán de Agua y el incendio del vertedero de AMSA en 2024, destacan la relevancia y eficacia de HYSPLIT en la evaluación y mitigación de los impactos de estos eventos. A continuación, se presentarán detalles específicos sobre la aplicación de HYSPLIT en estos incidentes, demostrando su valor en la gestión ambiental.

6.6.2.1 Caso de Estudio II: Incendio del Vertedero de Basura de AMSA

En mayo de 2024, un incendio significativo ocurrió en el vertedero de basura de la Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca y del Lago de Amatitlán (AMSA), generando grandes cantidades de humo y contaminantes atmosféricos [107], fue

alimentado por materiales altamente combustibles presentes en el basurero. Al igual que con el incendio del Volcán de Agua, el modelo HYSPLIT puede ser utilizado para simular la dispersión de estos contaminantes y evaluar su impacto.

La tasa de emisión de partículas y gases, incluyendo compuestos tóxicos como dioxinas y furanos, fue estimada en base a la composición del material en el vertedero. Estos parámetros fueron esenciales para simular con precisión la dispersión y deposición de los contaminantes.

Resultados de la Simulación

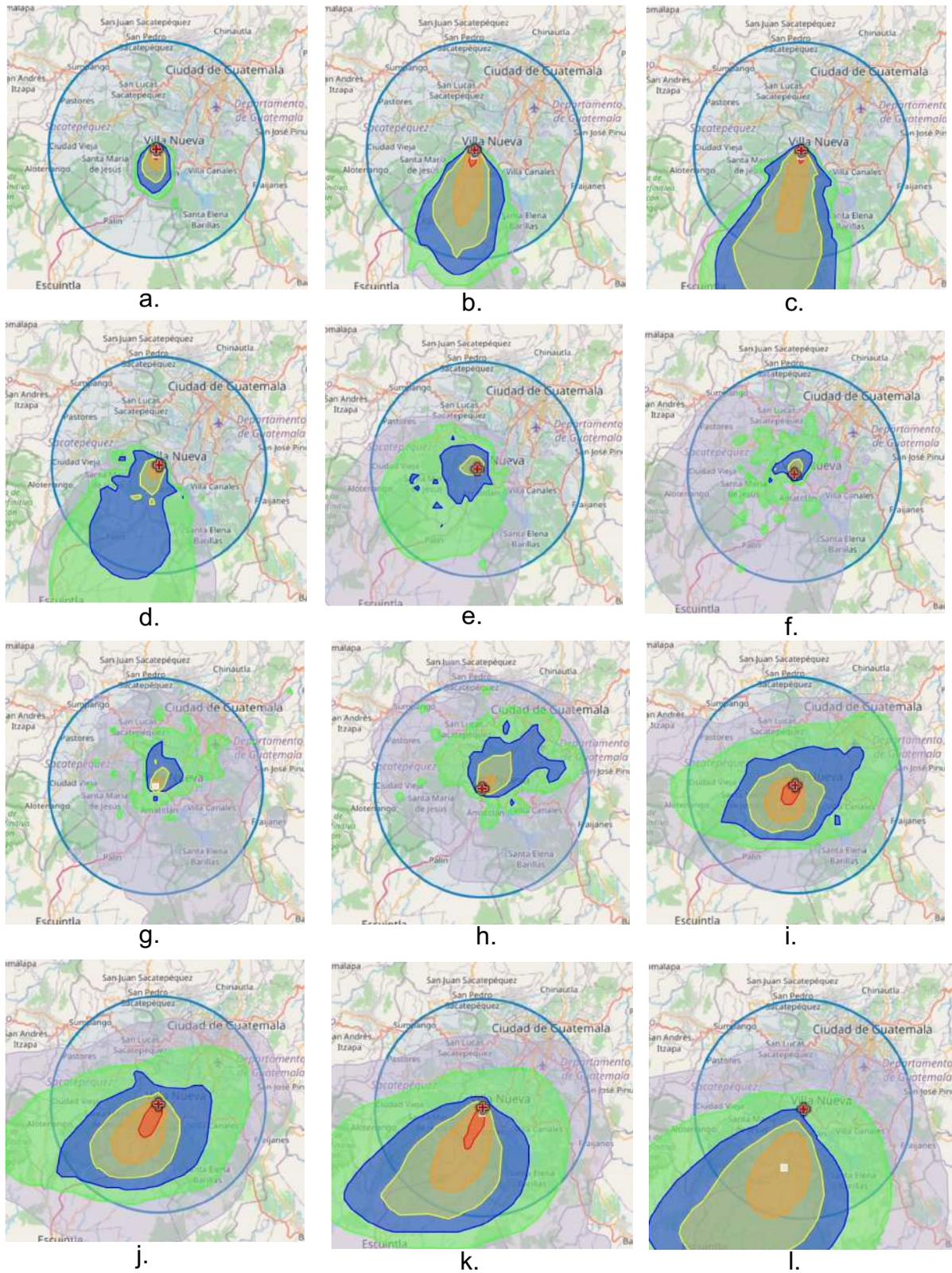
Las simulaciones con HYSPLIT muestran que el humo y los gases tóxicos se dispersaron rápidamente, afectando las áreas circundantes al vertedero y potencialmente alcanzando zonas más alejadas dependiendo de las condiciones del viento. Las simulaciones indicaron que las partículas más finas y los gases ligeros pudieron ser transportados a mayores distancias, aumentando el área de impacto [95,98].

Impactos y Aplicaciones

El análisis de la dispersión del humo del incendio en AMSA puede ayudar a las autoridades locales y nacionales a planificar y ejecutar medidas de mitigación efectivas. Las simulaciones ayudaron a identificar áreas de alto riesgo y a coordinar la respuesta de emergencia para minimizar los efectos adversos en la salud pública y el medio ambiente [97].

En la figura No. 6.3, se observa la evolución en la dispersión de cenizas y gases tóxicos que emanan del basurero.

Figura 6.3 *Dispersión de Contaminantes Incendio AMSA*



Nota. Dispersión adelantada de los gases contaminantes, modelación realizada con [106].

Las secuencias iniciales de imágenes, **a**, **b**, y **c**, proporcionan una visión clara del inicio y expansión temprana de la nube de contaminación provocada por el incendio de AMSA. En la figura **a**, se observa una alta concentración de contaminantes en el área inmediata al incendio, con la nube de polución aún localizada en torno al epicentro del fuego.

Conforme avanza el tiempo, las figuras **b** y **c** muestran cómo la nube de contaminación comienza a expandirse hacia el norte y noreste, afectando áreas circundantes. Este movimiento inicial indica cómo las condiciones atmosféricas, como la dirección y velocidad del viento, influyen en la dispersión de los contaminantes desde la fuente original.

La secuencia de imágenes presentadas en las figuras **d** a **i** del modelo de dispersión HYSPLIT muestra una notable oscilación en la propagación de gases y contaminantes emitidos durante el incendio de AMSA. Estas imágenes, generadas cada dos horas, reflejan cómo las condiciones meteorológicas y las variaciones en las corrientes de viento influyen en la dispersión y concentración de los contaminantes a lo largo del tiempo.

En las primeras imágenes (figuras **d** y **e**), se observa una expansión inicial de la nube de contaminación hacia el norte, extendiéndose sobre Villa Nueva y acercándose a la Ciudad de Guatemala.

A medida que avanzan las horas, en las figuras **f** y **g**, la dispersión se intensifica, y la concentración de contaminantes comienza a reducirse en el área central, dispersándose en diferentes direcciones. Esto sugiere un cambio en la dirección del viento o una variación en la intensidad del fuego, lo que provoca que las áreas afectadas varíen en extensión y concentración.

En las imágenes posteriores (figuras **h** e **i**), la contaminación alcanza el Aeropuerto Internacional La Aurora, lo que ocasionó la suspensión temporal de

actividades en el aeropuerto debido a los riesgos para la seguridad de las aeronaves. Este evento subraya la importancia de contar con herramientas como HYSPLIT para la alerta temprana en situaciones de contaminación atmosférica, particularmente en áreas críticas como rutas de vuelo y aeropuertos. La capacidad de prever la dispersión de contaminantes en tiempo real sería invaluable para proteger tanto la salud pública como la operatividad de infraestructuras clave en futuras emergencias.

6.6.3 Dispersión de Contaminantes Industriales

El modelo HYSPLIT es una herramienta robusta y versátil para simular la dispersión de contaminantes industriales en la atmósfera. En el contexto de Guatemala, donde las generadoras eléctricas por combustibles fósiles representan una fuente significativa de emisiones contaminantes [24] [108], HYSPLIT se utiliza para modelar la dispersión de partículas y gases resultantes de estas plantas. Estudios recientes [109] han demostrado la eficacia de HYSPLIT en la evaluación de la calidad del aire y la predicción de la dispersión de contaminantes en diferentes condiciones meteorológicas y topográficas.

Las generadoras eléctricas por combustibles fósiles emiten grandes cantidades de dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas finas (PM_{2.5}). La capacidad de HYSPLIT para integrar datos meteorológicos detallados y simular la dispersión de estos contaminantes permite evaluar el impacto ambiental y de salud de las emisiones.

En Guatemala, donde la topografía montañosa y la variabilidad climática complican la dispersión de contaminantes, HYSPLIT proporciona una herramienta esencial para comprender cómo estos contaminantes se distribuyen y afectan diferentes regiones del país.

Un aspecto clave del uso de HYSPLIT en este contexto es la capacidad de realizar simulaciones bajo diversos escenarios de emisión y condiciones meteorológicas. Esto permite prever cómo las variaciones en la operación de las plantas generadoras y cambios en las condiciones climáticas pueden influir en la dispersión de contaminantes.

Por ejemplo, durante la estación seca, las condiciones de viento pueden facilitar el transporte de contaminantes a largas distancias, afectando áreas pobladas y sensibles. Por otro lado, en la estación lluviosa, la deposición húmeda puede reducir la concentración de contaminantes en la atmósfera, pero aumentar la deposición en el suelo y cuerpos de agua [24].

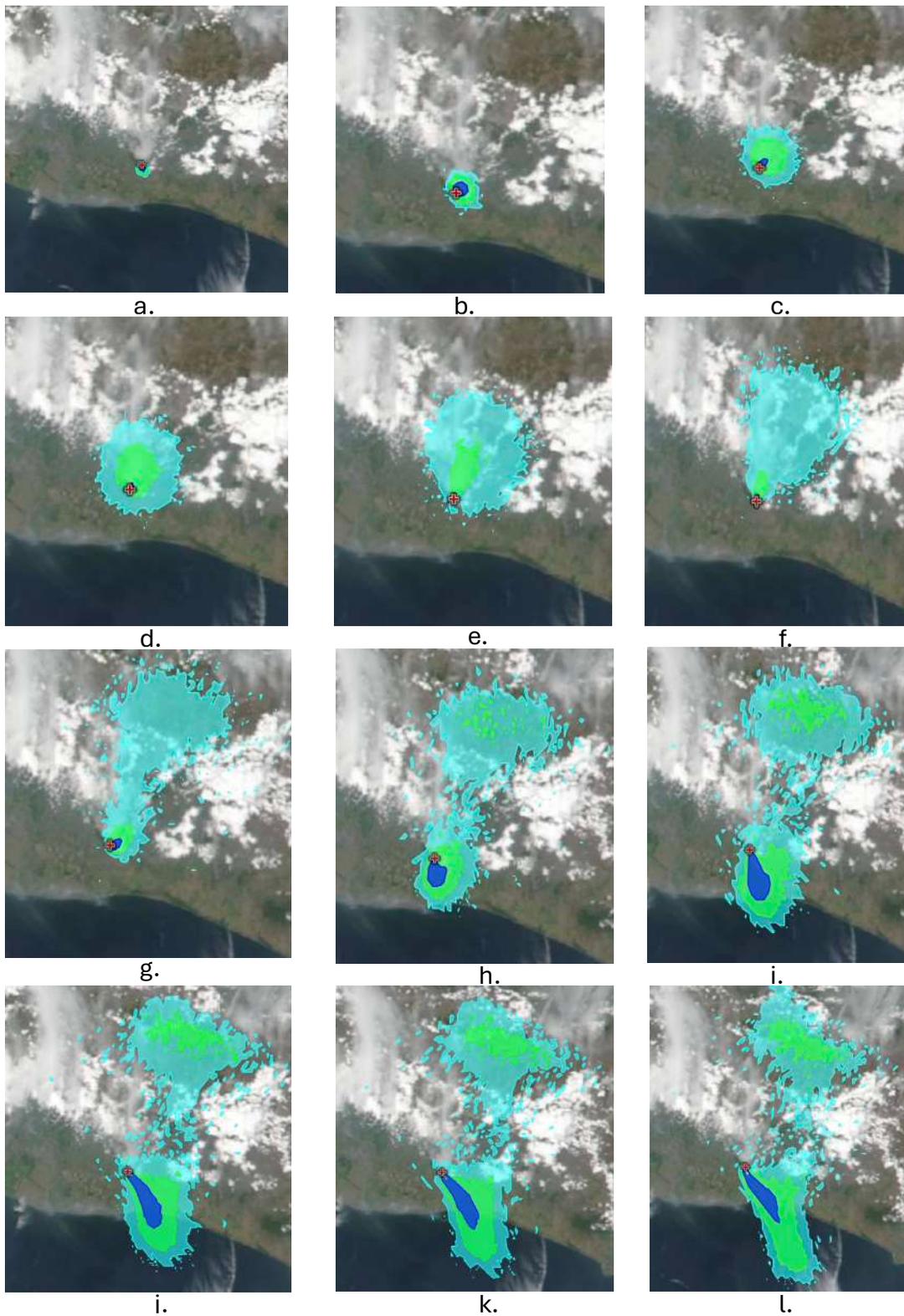
Además, el uso de HYSPLIT facilita la identificación de áreas prioritarias para la implementación de medidas de control de emisiones y la protección de la salud pública.

6.6.3.1 Caso de Estudio III. Dispersión de Gases Contaminantes de Generadoras Eléctricas

A continuación, se presentan algunas modelaciones sobre la dispersión de contaminantes de una industria de generación eléctrica, localizada en el departamento de Escuintla, la cual produce energía por medio de carbón.

Para esta modelación, se ha integrado con el modelo de HYSPLIT, una imagen satelital en el espectro visible, para poder observar las condiciones meteorológicas en el momento de la dispersión.

Figura 6.4 *Dispersión de Gases en Generadora Eléctrica*



Nota. Dispersión adelantada de gases contaminantes de una generadora eléctrica por medio de carbón. Modelación realizada con [106].

La modelación presentada en la figura No. 6.4 muestra la dispersión de gases contaminantes emitidos por una planta generadora de electricidad que utiliza carbón como fuente de energía. La visualización combina los datos obtenidos del modelo HYSPLIT con imágenes satelitales en el espectro visible, cada imagen se realizó cada hora (1 hora) luego de la emisión, lo que permite una comprensión detallada de cómo estos contaminantes se dispersan en la atmósfera.

En las primeras imágenes a. b. y c., se observa que los gases emitidos comienzan a expandirse hacia el suroeste, lo cual es consistente con las condiciones atmosféricas locales, incluyendo la dirección del viento predominante en la región.

Con el paso de las horas, los contaminantes se dispersan de manera más amplia, cubriendo una mayor área y comenzando a moverse hacia el noreste, en dirección al interior de Guatemala, como se observa en las figuras h., j., e i.

Hacia las imágenes j, k, y l, se evidencia cómo la pluma de contaminación avanza hacia el interior del país, alcanzando regiones más densamente pobladas, incluida la capital, Ciudad de Guatemala.

Este tipo de dispersión es importante debido a la potencial exposición de la población a niveles elevados de contaminantes, como dióxido de azufre y otras partículas tóxicas, que tienen efectos adversos sobre la salud y el medio ambiente.

El uso de HYSPLIT en combinación con imágenes satelitales es crucial para el monitoreo en tiempo real de estos eventos. HYSPLIT permite modelar la dispersión de los contaminantes en la atmósfera.

Conclusiones

1. Las abundancias de SO₂ han variado a lo largo del tiempo y dependen del área del país estudiada, región Norte o región Sur. Las variaciones observadas en la región sur tienen un decrecimiento desde el año 2005 al año 2010, mientras que para el período de 2011 al 2021 presenta un incremento constante. Para la región Norte, las abundancias muestran un decrecimiento constante y existen diferencias significativas en los valores de la abundancia entre las dos regiones estudiadas, siendo la región Norte el área que menor contaminación de SO₂ presenta.
2. Los comportamientos en las abundancias en la región Sur no muestran una dependencia con las estaciones climáticas invierno – verano, sin embargo, el comportamiento para la región Norte es diferente, se aprecia un aumento para el invierno y una pendiente negativa en el verano.
3. Se encuentran ciclos definidos de 7 y 182 días respectivamente en las abundancias de SO₂ para las fuentes antropogénicas, estos períodos pueden coincidir con las actividades económicas e industriales de esta parte del país. Para las fuentes naturales, no se encuentran períodos definidos.
4. Las distribuciones espaciales máximas de las abundancias encontradas corresponden con la región sur, área de mayor industrialización y región donde se encuentran los 3 volcanes activos. Para la región Norte, no se identifican, mediante este estudio, abundancias importantes que puedan contribuir a la contaminación atmosférica de SO₂.
5. El uso del modelo HYSPLIT demuestra ser una herramienta eficaz para el análisis de la dispersión de gases y material particulado en la atmósfera. Este modelo resulta particularmente útil para la gestión de desastres naturales, como las erupciones volcánicas, así como para el monitoreo de fuentes antropogénicas como las plantas de energía e incendios. Su capacidad para

simular la dispersión de gases y aerosoles en tiempo real lo convierte en una herramienta fundamental para la toma de decisiones en la planificación ambiental, la protección de la salud pública y la seguridad aérea

Recomendaciones

- 1. Realizar estudios adicionales sobre las abundancias de SO₂ en la superficie y en la columna vertical a diferentes alturas:** Estos estudios permitirán desarrollar modelos que correlacionen los datos satelitales con las mediciones terrestres, mejorando la precisión en la detección y análisis de la distribución del SO₂ en la atmósfera guatemalteca.
- 2. Desarrollar un análisis de trayectorias utilizando modelos de dispersión:** Esto facilitará la identificación del origen de las concentraciones de SO₂ detectadas, así como la localización de posibles fuentes no reportadas. Este análisis contribuirá a una mejor comprensión de los patrones de dispersión del SO₂ y permitirá abordar más eficazmente la contaminación atmosférica en la región.
- 3. Realizar un estudio de series temporales de las actividades volcánicas:** Este estudio se orientará a relacionar directamente las emisiones naturales con las antropogénicas, tal como se ha planteado en este trabajo. La identificación de patrones temporales ayudará a afinar la separación de fuentes y a mejorar las estrategias de monitoreo y mitigación de la contaminación por SO₂.
- 4. Implementar el uso del modelo HYSPLIT para realizar simulaciones de dispersión de SO₂ bajo diferentes condiciones meteorológicas en Guatemala:** Esto permitirá no solo validar los resultados obtenidos en este estudio, sino también prever posibles escenarios de dispersión ante eventos volcánicos o industriales significativos. El uso de HYSPLIT contribuiría a una mejor comprensión de la influencia de las condiciones atmosféricas en la dispersión de SO₂ y ayudaría a identificar áreas potencialmente afectadas que aún no cuentan con monitoreo adecuado.

5. Desarrollar un sistema de monitoreo continuo utilizando una red de sensores terrestres en combinación con datos satelitales: Este sistema permitiría una vigilancia más precisa y en tiempo real de las concentraciones de SO₂, facilitando la identificación de eventos anómalos y su rápida respuesta. Además, un sistema integrado ayudaría a reducir las incertidumbres en las estimaciones de SO₂ mediante la correlación directa entre datos satelitales y mediciones de superficie.

6. Realizar estudios de impacto ambiental y de salud pública asociados con la exposición a largo plazo a SO₂ en áreas cercanas a fuentes naturales y antropogénicas: Estos estudios deberían enfocarse en poblaciones vulnerables y en zonas de alta densidad poblacional en la región sur de Guatemala, donde la exposición al SO₂ es más pronunciada. La información obtenida podría utilizarse para mejorar las políticas de salud pública y desarrollar planes de mitigación específicos para reducir los riesgos asociados con la contaminación atmosférica.

Referencias

- [1] J. M. Wallace and P. V. Hobbs, *Atmospheric Science: An Introductory Survey*, 2nd ed (Elsevier Academic Press, Amsterdam ; Boston, 2006).
- [2] NASA, *Multi-Decadal Sulfur Dioxide Climatology from Satellite Instruments*, <https://earthdata.nasa.gov/esds/competitive-programs/measures/multi-decadal-sulfur-dioxide>.
- [3] IAEA, *CLIMATE CHANGE AND NUCLEAR POWER 2018* (Printed by the IAEA in Austria, 2019).
- [4] IPCC, editor , *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1st ed. (Cambridge University Press, 2014).
- [5] P. L. Ward, Sulfur dioxide initiates global climate change in four ways, *Thin Solid Films* **517**, 3188 (2009).
- [6] A. J. Cohen et al., Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015, *The Lancet* **389**, 1907 (2017).
- [7] Chen, W. G. Kuschner, J. Gokhale, and S. Shofer, Outdoor Air Pollution: Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide, and Carbon Monoxide Health Effects, *The American Journal of the Medical Sciences* **333**, 249 (2007).
- [8] Chen, W. Huang, C.-M. Wong, Z. Wang, T. Quoc Thach, B. Chen, and H. Kan, Short-term exposure to sulfur dioxide and daily mortality in 17 Chinese cities: The China air pollution and health effects study (CAPES), *Environmental Research* **118**, 101 (2012).
- [9] Barringer and Davies, Satellite monitoring of atmospheric gases, *J. Br. Interplanet. Soc* **30**, 178 (1977).
- [10] Bertaux and Belton, Evidence of SO₂ on Io from UV observations, *Nature* **282**, (1979).
- [11] Krueger, Sighting of El Chichón sulphur dioxide clouds with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer, *Science* **220**, 1377 (1983).
- [12] McPeters, Schlesinger, and Heath, Satellite observation of SO₂ from El Chichon: identification and measurement, *Geophys. Res. Lett* **11**, 1203 (1984).
- [13] Bluth and Carn, Exceptional sulfur degassing from Nyamuragira volcano, 1979–2005, *International Journal of Remote Sensing* **29**, 6667 (2008).
- [14] G. J. S. Bluth, S. D. Doiron, C. C. Schnetzler, A. J. Krueger, and L. S. Walter, Global tracking of the SO₂ clouds from the June, 1991 Mount Pinatubo eruptions, *Geophysical Research Letters* **19**, 151 (1992).
- [15] L. A. Rodríguez, I. M. Watson, W. I. Rose, Y. K. Branan, G. J. S. Bluth, G. Chigna, O. Matías, D. Escobar, S. A. Carn, and T. P. Fischer, SO₂ emissions to the atmosphere from active volcanoes in Guatemala and El Salvador, 1999–2002, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **138**, 325 (2004).
- [16] S. A. Carn, A. J. Krueger, N. A. Krotkov, and M. A. Gray, Fire at Iraqi sulfur plant emits SO₂ clouds detected by Earth Probe TOMS, *Geophysical Research Letters* **31**, 2004GL020719 (2004).

- [17] Eisinger, and Burrows, Tropospheric sulphur dioxide observed by the ERS-2 GOME instrument, *Geophys. Res. Lett.* **25**, 4177 (1998).
- [18] M. F. Khokhar, U. Platt, and T. Wagner, *Temporal Trends of Anthropogenic SO₂ Emitted by Non-Ferrous Metal Smelters in Peru and Russia Estimated from Satellite Observations*.
- [19] Bovensmann, Buchwitz, Burrows, Frerick, and Noël, SCIAMACHY: Mission objectives and measurement modes, *J. Atmos. Sci.* **127** (1999).
- [20] Callies, Corpaccioli, Eisinger, Hahne, and Lefebvre, GOME-2-Metop's second-generation sensor for operational ozone monitoring, *ESA Bull.* **102**, 28 (2000).
- [21] M. R. Schoeberl et al., Overview of the EOS aura mission, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **44**, 1066 (2006).
- [22] NASA, *Applied Remote Sensing Training*, <https://arset.gsfc.nasa.gov>.
- [23] V. E. Fioletov et al., Application of OMI, SCIAMACHY, and GOME-2 satellite SO₂ retrievals for detection of large emission sources: OMI, SCIAMACHY, and GOME-2 satellite SO₂, *J. Geophys. Res. Atmos.* **118**, 11,399 (2013).
- [24] R. E. Contreras, K. I. Aguilar Ovando, Rivera Cárdenas, Claudia Inés, and J. A. García Reynoso, Análisis de las abundancias, series temporales y distribución espacial del SO₂ sobre Guatemala basado en las observaciones del detector satelital OMI/AURA en el período de 2005 - 2021, *Rev. Escuela Física* **11**, 33 (2023).
- [25] L. Clarisse, D. Hurtmans, C. Clerbaux, J. Hadji-Lazaro, Y. Ngadi, and P.-F. Coheur, Retrieval of sulphur dioxide from the infrared atmospheric sounding interferometer (IASI), *Atmos. Meas. Tech.* **5**, 581 (2012).
- [26] F. Karagulian, L. Clarisse, C. Clerbaux, A. J. Prata, D. Hurtmans, and P. F. Coheur, Detection of volcanic SO₂, ash, and H₂SO₄ using the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI), *J. Geophys. Res.* **115**, 2009JD012786 (2010).
- [27] L. Clarisse, M. Fromm, Y. Ngadi, L. Emmons, C. Clerbaux, D. Hurtmans, and P.-F. Coheur, Intercontinental transport of anthropogenic sulfur dioxide and other pollutants: An infrared remote sensing case study: TRANSPORT OF ANTHROPOGENIC POLLUTANTS, *Geophys. Res. Lett.* **38**, n/a (2011).
- [28] S. Bauduin, L. Clarisse, C. Clerbaux, D. Hurtmans, and P. Coheur, IASI observations of sulfur dioxide (SO₂) in the boundary layer of Norilsk, *JGR Atmospheres* **119**, 4253 (2014).
- [29] N. A. Krotkov et al., Aura OMI observations of regional SO₂ and NO₂ pollution changes from 2005 to 2014, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* **15**, 26555 (2015).
- [30] M. Rix, P. Valks, N. Hao, D. Loyola, H. Schlager, H. Huntrieser, J. Flemming, U. Koehler, U. Schumann, and A. Inness, Volcanic SO₂, BrO and plume height estimations using GOME-2 satellite measurements during the eruption of Eyjafjallajökull in May 2010, *J. Geophys. Res.* **117**, 2011JD016718 (2012).
- [31] N. Theys et al., Volcanic SO₂ fluxes derived from satellite data: a survey using OMI, GOME-2, IASI and MODIS, *Atmos. Chem. Phys.* **13**, 5945 (2013).

- [32] J. Jin, J. Ma, W. Lin, H. Zhao, R. Shaiganfar, S. Beirle, and T. Wagner, MAX-DOAS measurements and satellite validation of tropospheric NO₂ and SO₂ vertical column densities at a rural site of North China, *Atmospheric Environment* **133**, 12 (2016).
- [33] C. Li, Q. Zhang, N. A. Krotkov, D. G. Streets, K. He, S.-C. Tsay, and J. F. Gleason, Recent large reduction in sulfur dioxide emissions from Chinese power plants observed by the Ozone Monitoring Instrument: SO₂ FROM POWER PLANTS OBSERVED BY OMI, *Geophys. Res. Lett.* **37**, (2010).
- [34] V. E. Fioletov, C. A. McLinden, N. Krotkov, M. D. Moran, and K. Yang, Estimation of SO₂ emissions using OMI retrievals: SO₂ EMISSIONS AND OMI RETRIEVALS, *Geophys. Res. Lett.* **38**, n/a (2011).
- [35] B. De Foy, N. A. Krotkov, N. Bei, S. C. Herndon, L. G. Huey, A.-P. Martínez, L. G. Ruiz-Suárez, E. C. Wood, M. Zavala, and L. T. Molina, Hit from both sides: tracking industrial and volcanic plumes in Mexico City with surface measurements and OMI SO₂ retrievals during the MILAGRO field campaign, *Atmos. Chem. Phys.* **9**, 9599 (2009).
- [36] C. Li, J. Joiner, N. A. Krotkov, and P. K. Bhartia, A fast and sensitive new satellite SO₂ retrieval algorithm based on principal component analysis: Application to the ozone monitoring instrument, *Geophysical Research Letters* **40**, 6314 (2013).
- [37] V. E. Fioletov, C. A. McLinden, N. Krotkov, and C. Li, Lifetimes and emissions of SO₂ from point sources estimated from OMI, *Geophys. Res. Lett.* **42**, 1969 (2015).
- [38] N. Theys et al., Sulfur dioxide vertical column DOAS retrievals from the Ozone Monitoring Instrument: Global observations and comparison to ground-based and satellite data: SO₂ column OMI DOAS retrievals, *J. Geophys. Res. Atmos.* **120**, 2470 (2015).
- [39] N. A. Krotkov et al., Aura OMI observations of regional SO₂ and NO₂; pollution changes from 2005 to 2015, *Atmos. Chem. Phys.* **16**, 4605 (2016).
- [40] W. T. Luke, Evaluation of a commercial pulsed fluorescence detector for the measurement of low-level SO₂ concentrations during the Gas-Phase Sulfur Intercomparison Experiment, *J. Geophys. Res.* **102**, 16255 (1997).
- [41] H. Chong et al., High-resolution mapping of SO₂ using airborne observations from the GeoTASO instrument during the KORUS-AQ field study: PCA-based vertical column retrievals, *Remote Sensing of Environment* **241**, 111725 (2020).
- [42] Oliva, INFORME ANUAL DE LA CALIDAD DEL AIRE CIUDAD DE GUATEMALA 2017, LABORATORIO DE MONITOREO DEL AIRE, 2018.
- [43] R. Andres, W. Rose, R. Stoiber, S. Williams, O. Matías, and R. Morales, A summary of sulfur dioxide emission rate measurements from Guatemalan volcanoes, *Bull Volcanol* **55**, 379 (1993).
- [44] Prandi, MULTI-INSTRUMENTAL INVESTIGATION OF VOLCANIC OUTGASSING AT PACAYA VOLCANO, GUATEMALA, PhD Thesis, Michigan Technological University, 2015.

- [45] Scott, Origin and Evolution of the Santiaguito Lava Dome Complex, Guatemala, PhD Thesis, Department of Earth Sciences, University of Oxford, 2012.
- [46] INSIVUMEH, PROGRAMA DE CALIDAD DEL AIRE DE INSIVUMEH PARA LA REPÚBLICA DE GUATEMALA, 2019.
- [47] Air Quality Data, *PurpleAir*, (unpublished).
- [48] INE, *Población Proyectada, Senso Naciola 2022*, <https://www.ine.gob.gt>.
- [49] NASA, Fundamentals of Remote Sensing, (2022).
- [50] P. F. Levelt, G. H. J. van den Oord, M. R. Dobber, A. Malkki, Huib Visser, Johan de Vries, P. Stammes, J. O. V. Lundell, and H. Saari, The ozone monitoring instrument, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **44**, 1093 (2006).
- [51] Stephens et al, The CloudSat Mission and the A Train, *Bull. Amer. Meteorol. Soc* **83**, 1771 (2002).
- [52] N. A. Krotkov, S. A. Carn, A. J. Krueger, P. K. Bhartia, and Kai Yang, Band residual difference algorithm for retrieval of SO₂ from the aura ozone monitoring instrument (OMI), *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **44**, 1259 (2006).
- [53] NASA ,OMI, Ozone Monitoring Instrument (OMI) Data User's Guide, (2012).
- [54] Z. Qu et al., SO₂ Emission Estimates Using OMI SO₂ Retrievals for 2005–2017, *J. Geophys. Res. Atmos.* **124**, 8336 (2019).
- [55] IAEA, *Climate Change and Nuclear Power 2022, Securing Clean Energy for Climate Resilience* (Printed by the IAEA in Austria, Viena, 2022).
- [56] D. H. Ehhalt, Photooxidation of trace gases in the troposphere Plenary Lecture, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **1**, 5401 (1999).
- [57] C. Clerbaux, P.-F. Coheur, L. Clarisse, J. Hadji-Lazaro, D. Hurtmans, S. Turquety, K. Bowman, H. Worden, and S. A. Carn, Measurements of SO₂ profiles in volcanic plumes from the NASA Tropospheric Emission Spectrometer (TES), *Geophys. Res. Lett.* **35**, L22807 (2008).
- [58] Jacob, *INTRODUCTION TO ATMOSPHERIC CHEMISTRY: SUPPLEMENTAL QUESTIONS AND PROBLEMS*, 11th ed. (Harvard University, 2021).
- [59] Finlayson, and Pitts, *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere* (Elsevier, 2000).
- [60] J. H. Seinfeld and S. N. Pandis, *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, Third edition (Wiley, Hoboken, New Jersey, 2016).
- [61] J. Ngarambe, S. J. Joen, C.-H. Han, and G. Y. Yun, Exploring the relationship between particulate matter, CO, SO₂, NO₂, O₃ and urban heat island in Seoul, Korea, *Journal of Hazardous Materials* **403**, 123615 (2021).
- [62] C. Lee, R. V. Martin, A. van Donkelaar, H. Lee, R. R. Dickerson, J. C. Hains, N. Krotkov, A. Richter, K. Vinnikov, and J. J. Schwab, SO₂ emissions and lifetimes: Estimates from inverse modeling using in situ and global, space-based (SCIAMACHY and OMI) observations, *J. Geophys. Res.* **116**, D06304 (2011).
- [63] S. A. Carn, V. E. Fioletov, C. A. McLinden, C. Li, and N. A. Krotkov, A decade of global volcanic SO₂ emissions measured from space, *Sci Rep* **7**, 44095 (2017).
- [64] T. M. Sears, G. E. Thomas, E. Carboni, A. J. A. Smith, and R. G. Grainger, SO₂ as a possible proxy for volcanic ash in aviation hazard avoidance: SO₂ AS A

- POSSIBLE PROXY FOR VOLCANIC ASH, *J. Geophys. Res. Atmos.* **118**, 5698 (2013).
- [65] Fecaica, *Federación de Cámaras y Asociaciones Industriales de Centroamerica y República Dominicana*, <https://fecaica.com/industria-centroamericana/>.
- [66] GEO, *Global Energy Observatory*, <http://globalenergyobservatory.org/geoid/43653>.
- [67] S. Tilmes, J. H. Richter, M. J. Mills, B. Kravitz, D. G. MacMartin, F. Vitt, J. J. Tribbia, and J. Lamarque, Sensitivity of Aerosol Distribution and Climate Response to Stratospheric SO₂ Injection Locations, *J. Geophys. Res. Atmos.* **122**, (2017).
- [68] S. J. Smith, J. van Aardenne, Z. Klimont, R. J. Andres, A. Volke, and S. Delgado Arias, Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005, *Atmos. Chem. Phys.* **11**, 1101 (2011).
- [69] J. L. Davis, J. D. Green, and A. Reed, Interdependence with the environment: Commitment, interconnectedness, and environmental behavior, *Journal of Environmental Psychology* **29**, 173 (2009).
- [70] C. Mallik, P. S. Mahapatra, P. Kumar, S. Panda, R. Boopathy, T. Das, and S. Lal, Influence of regional emissions on SO₂ concentrations over Bhubaneswar, a capital city in eastern India downwind of the Indian SO₂ hotspots, *Atmospheric Environment* **209**, 220 (2019).
- [71] Michigan Tech, *MICHIGAN TECH VOLCANO PAGE*, <http://www.geo.mtu.edu/volcanoes/>.
- [72] G. Alfaro and Gómez, Primer reporte de evaluación del conocimiento sobre cambio climático en Guatemala, Universidad del Valle de Guatemala, 2019.
- [73] M. A. Canuto et al., Ancient lowland Maya complexity as revealed by airborne laser scanning of northern Guatemala, *Science* **361**, eaau0137 (2018).
- [74] K. J. Anchukaitis, M. J. Taylor, J. Martin-Fernandez, D. Pons, M. Dell, C. Chopp, and E. J. Castellanos, Annual chronology and climate response in *Abies guatemalensis* Rehder (Pinaceae) in Central America, *The Holocene* **23**, 270 (2013).
- [75] NASA, Panoply, (2020).
- [76] NASA, *Giovanni The Bridge Between Data and Science.*, <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>.
- [77] UNESCO, *Natural Sciences*, http://portal.unesco.org/science/en/ev.php-URL_ID%3D5756&URL_DO%3DDO_TOPIC&URL_SECTION%3D201.html.
- [78] Redford, protected areas and human displacement: a conservation perspective, 29 (2007).
- [79] incyt and URL, *Perfil energético de Guatemala Bases para el entendimiento del estado actual y tendencias de la energía* (2018).
- [80] SIB, SECTOR AZUCARERO, Análisis Sector Azucarero, Super Intendencia de Bancos, Sección Hidrocarburos, 2016.
- [81] C. R. Vásquez and S. M. Rovito, A New Species of Black *Bolitoglossa* (Caudata: Plethodontidae) from Guatemala, *Journal of Herpetology* **48**, 518 (2014).
- [82] M. Steinberg and M. Taylor, Guatemala's Altos de Chiantla: Changes on the High Frontier, *Mountain Research and Development* **28**, 255 (2008).

- [83] Google, Google Earth Pro, (2022).
- [84] *ARSET - Fundamentals of Remote Sensing* | NASA Applied Sciences, <http://appliedsciences.nasa.gov/get-involved/training/english/arset-fundamentals-remote-sensing>.
- [85] R. Rew, G. Davis, S. Emmerson, C. Cormack, J. Caron, R. Pincus, E. Hartnett, D. Heimbigner, L. Appel, and W. Fisher, Unidata NetCDF, (1989).
- [86] K. Yang, N. A. Krotkov, A. J. Krueger, S. A. Carn, P. K. Bhartia, and P. F. Levelt, Retrieval of large volcanic SO₂ columns from the Aura Ozone Monitoring Instrument: Comparison and limitations, *J. Geophys. Res.* **112**, D24S43 (2007).
- [87] C. Li, N. A. Krotkov, S. Carn, Y. Zhang, R. J. D. Spurr, and J. Joiner, New-generation NASA Aura Ozone Monitoring Instrument (OMI) volcanic SO₂ dataset: algorithm description, initial results, and continuation with the Suomi-NPP Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS), *Atmos. Meas. Tech.* **10**, 445 (2017).
- [88] C. Li, N. A. Krotkov, P. J. T. Leonard, S. Carn, J. Joiner, R. J. D. Spurr, and A. Vasilkov, Version 2 Ozone Monitoring Instrument SO₂ product (OMSO2 V2): new anthropogenic SO₂ vertical column density dataset, *Atmos. Meas. Tech.* **13**, 6175 (2020).
- [89] OMI Team, Ozone Monitoring Instrument (OMI) Data User's Guide, (2005).
- [90] MathWorks, MATLAB, (2022).
- [91] SIB, ANÁLISIS CUATRIMESTRAL DE SECTORES ECONÓMICOS, Análisis No. Agosto 2010, Super Intendencia de Bancos, Sección Hidrocarburos, 2010.
- [92] Banco de Guatemala, *Serie histórica de importaciones clasificadas por grupo CUODE*, <https://banguat.gob.gt/es/page/serie-historica-de-importaciones-clasificadas-por-grupo-cuode>.
- [93] CNEE, Gerencia de Planificación y Vigilancia de Mercados Eléctricos 2015 - 2019, No. 2015–2019, CNEE, 2020.
- [94] MARN, *Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales Gobierno de Guatemala*, <https://www.marn.gob.gt>.
- [95] A. F. Stein, R. R. Draxler, G. D. Rolph, B. J. B. Stunder, M. D. Cohen, and F. Ngan, NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System, *Bulletin of the American Meteorological Society* **96**, 2059 (2015).
- [96] García, *Modelación y Dispersión de gases usando Hysplit*, (unpublished).
- [97] G. Rolph, A. Stein, and B. Stunder, Real-time Environmental Applications and Display sYstem: READY, *Environmental Modelling & Software* **95**, 210 (2017).
- [98] Hess, Description of the HYSPLIT_4 modelling system, (2014).
- [99] A. Stohl, C. Forster, S. Eckhardt, N. Spichtinger, H. Huntrieser, J. Heland, H. Schlager, S. Wilhelm, F. Arnold, and O. Cooper, A backward modeling study of intercontinental pollution transport using aircraft measurements, *J. Geophys. Res.* **108**, 2002JD002862 (2003).
- [100] T. Chai, A. Crawford, B. Stunder, M. J. Pavolonis, R. Draxler, and A. Stein, Improving volcanic ash predictions with the HYSPLIT dispersion model by assimilating MODIS satellite retrievals, *Atmos. Chem. Phys.* **17**, 2865 (2017).

- [101] T. Hurst and C. Davis, Forecasting volcanic ash deposition using HYSPLIT, *J Appl. Volcanol.* **6**, 5 (2017).
- [102] Q. Hong, C. Liu, Q. Hu, C. Xing, W. Tan, T. Liu, and J. Liu, Vertical distributions of tropospheric SO₂ based on MAX-DOAS observations: Investigating the impacts of regional transport at different heights in the boundary layer, *Journal of Environmental Sciences* **103**, 119 (2021).
- [103] H. Salmabadi and M. Saeedi, Determination of the transport routes of and the areas potentially affected by SO₂ emanating from Khatoonabad Copper Smelter (KCS), Kerman province, Iran using HYSPLIT, *Atmospheric Pollution Research* **10**, 321 (2019).
- [104] T. Chai, X. Ren, F. Ngan, M. Cohen, and A. Crawford, Estimation of power plant SO₂ emissions using the HYSPLIT dispersion model and airborne observations with plume rise ensemble runs, *Atmos. Chem. Phys.* **23**, 12907 (2023).
- [105] Z. L. Fleming, P. S. Monks, and A. J. Manning, Review: Untangling the influence of air-mass history in interpreting observed atmospheric composition, *Atmospheric Research* **104–105**, 1 (2012).
- [106] NOAA, *NOAA Air Resources Laboratory*, <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>.
- [107] García and Domínguez, Recolectores de vertedero de AMSA cuentan cómo les afecta el incendio, (2024).
- [108] Contreras, La realidad actual del potencial hídrico de Guatemala, *Análisis de la Realidad Nacional* (2023).
- [109] Contreras, *Simposio de Calidad del Aire en Guatemala*, in (Guatemala, 2024).