



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

Analysis of the abundances, time series, and spatial distribution of SO₂ over Guatemala based on observations from the OMI/AURA satellite detector from the period 2005-2021

R. CONTRERAS², K. AGUILAR², C. RIVERA¹, A. GARCÍA¹

Recibido: 16 de enero de 2023 / Aceptado: 6 de febrero de 2023

¹Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México. claudia.rivera@atmosfera.unam.mx

²Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de San Carlos de Guatemala. recontrasgt@yahoo.com

RESUMEN

Se estudia el comportamiento del SO₂ en la capa PBL (*Planetary Boundary Layer*) sobre el territorio de Guatemala, este es un gas que posee efectos contaminantes muy elevados sobre la atmósfera, calidad del aire y cambio climático. En Guatemala no se ha realizado un estudio de la abundancia, tendencias y distribución espacial de este contaminante, se analizan datos de abundancia tomados del satélite Aura detector OMI en el período 2005 – 2021. El análisis se hace, separando el territorio en dos regiones, Norte y Sur y se evalúa cada una para las dos estaciones climáticas presentes en el país, invierno y verano. Se encuentra que para la región Norte, las abundancias a lo largo del tiempo permanecen en un rango de 1.114 DU y 1.144 DU; para la región Sur, las abundancias varían entre 1.282 DU y 1.366 DU, para el período analizado. En la región Sur, no se encuentra dependencia con la estación climática, no así en la región Norte, en donde se evidencia que en invierno la abundancia tiende a aumentar y en verano descende. La región Sur presenta un comportamiento descendente hasta el año 2010 y luego aumenta constantemente hasta el año 2021. Se analizan ciclicidades en la abundancia, encontrando períodos definidos de 182 y 8 días respectivamente. Se observa que la distribución espacial de abundancias se orienta hacia la región Sur del país en todo el período estudiado.

Abstract

The behavior of SO₂ in the Planetary Boundary Layer (PBL) over the territory of Guatemala is studied. This gas has highly polluting effects on the atmosphere, air quality, and climate change. A study on the abundance, trends, and spatial distribution of this pollutant has not been conducted in Guatemala. Abundance data from the Aura satellite's OMI detector are analyzed for the period 2005-2021. The analysis is performed by dividing the territory into two regions, North and South, and evaluating each region during the two climatic seasons in the country, winter and summer. It is found that for the North region, abundances over time remain within

* Esta obra está bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento - NoComercial 4.0 Internacional

* This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

a range of 1,114 DU and 1,144 DU, while for the South region, abundances vary between 1,282 DU and 1,366 DU during the analyzed period. In the South region, no dependence on the climatic season is found, unlike the North region, where it is evident that abundance tends to increase in winter and decrease in summer. The South region exhibits a declining trend until the year 2010, followed by a steady increase until the year 2021. Cyclicities in abundance are analyzed, revealing distinct periods of 182 and 8 days, respectively. The spatial distribution of abundances is observed to be oriented towards the Southern region of the country throughout the study period.

PALABRAS CLAVES

Atmosfera, contaminación, dióxido de azufre

KEYWORDS

Atmosphere, pollution, sulfur dioxide.

I | INTRODUCCIÓN

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 gases contaminantes a la atmósfera (NASA, 2020a), incrementando la abundancia de SO₂, NO₂, CO₂, CH₄ y N₂O y por tanto provocando un aumento del efecto de invernadero y el calentamiento terrestre (IAEA, 2019). Si las emisiones antropogénicas de estos gases continúan, se observarán cambios importantes en el clima y por ende impactará en el desarrollo de la humanidad y el medio ambiente (Ward, 2009).

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 (IAEA, 2019) 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.

El dióxido de azufre (SO₂) es un gas de vida corta, es producido principalmente por dos vías, por procesos naturales de la tierra, volcanes, fuentes termales y algunos tipos de incendio, y generado por causas humanas, principalmente por la industria, como la generación eléctrica por combustibles fósiles.

El SO₂ emitido por los volcanes, rápidamente se oxida en ácido sulfúrico, y debido a su baja presión de vapor, se adhiere a las partículas en aerosol (Ehhalt, 1999), provocando que la atmósfera pierda su capacidad de oxidación, alterando finalmente la temperatura global.

Exposiciones constantes a este gas afectan todo el entorno de la biósfera del planeta, tanto la salud del ser humano, incrementando las afecciones respiratorias (T.-M. Chen, Kuschner, Gokhale, y Shofer, 2007), la mortalidad, morbilidad cardiovascular y reducción en la esperanza de vida, (Cohen y cols., 2017), así como alteraciones en la flora y fauna debido al incremento de la lluvia ácida sobre los ecosistemas (R. Chen y cols., 2012), impactando finalmente el clima.

La contaminación del aire, fue responsable de 4.2 millones de muertes en 2016, esto consiste en aproximadamente el 7.6% de todas las muertes ocurridas en 2016 (Cohen y cols., 2017). 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 (Cohen y cols., 2017). Dentro de los contaminantes importantes del aire se encuentra: SO₂, O₃, NO₂, CO, CO₂, CH₄, entre otros. El gas que interesa para el desarrollo de este estudio es el dióxido de azufre.

Analizar y evaluar la evolución de las abundancias de SO₂, es de vital importancia para mitigar los riesgos, incluso para la aviación, ya que se disminuye la visibilidad y las cenizas y gotas de SO₂, pueden alterar los sistemas de navegación y producir daño catastrófico a las turbinas. (Clerbaux y cols., 2008)

1 | Contaminación de SO₂ en Guatemala

La principal fuente natural en la producción de SO₂ lo constituyen las erupciones de los volcanes activos, (Carn, Fioletov, McLinden, Li, y Krotkov, 2017) y afectan al desarrollo de las actividades humanas, principalmente aquellos volcanes que se encuentran en las cercanías de grandes ciudades (Sears, Thomas, Carboni, Smith, y Grainger, 2013), como en el caso de Guatemala, la cercanía de los volcanes de Pacaya, Fuego y Santiaguito, los cuales se encuentran cerca de grandes ciudades, de manera que un monitoreo constante de ese gas es de suma 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 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 industrializado de Centro América (Federación de Cámaras y Asociaciones Industriales de Centroamérica y República Dominicana (FECAICA), 2020), posee varias fuentes antropogénicas de SO₂, entre las que se encuentra: fundidoras, uso de combustible rico en azufre y generadoras a base de carbón (Globay Energy Observatory, 2020).

Otro problema asociado a las concentraciones de SO₂ en las capas superiores de la tropósfera, emitidas principalmente por la actividad volcánica, es el riesgo en la actividad aeronáutica, debido a que la ceniza (Sears y cols., 2013) y las pequeñas gotas de ácido sulfúrico, pueden disminuir la visibilidad, provocar daños en los sistemas de vuelo y causar daño fatal a las turbinas (Qu y cols., 2019), generando posibles accidentes aéreos y millonarias pérdidas monetarias.

2 | Mediciones de SO₂ en Guatemala

Existen diferentes tipos de sensores de dióxido de azufre, principalmente para mediciones en tierra, estos sensores son en la mayoría de los casos a un costo elevado, de modo que, para países como Guatemala, es imposible poseer una red fiable de detección de este gas. Incluso para los países desarrollados, existen regiones pobladas que no poseen detección de SO₂, debido al alto costo (Fioletov, McLinden, Krotkov, Moran, y Yang, 2011).

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 (Wallace y Hobbs, 2006), es importante realizar mediciones aéreas, con sensores instalados en aeronaves, para que estos realicen un barrido de detección de SO₂ a diferente altura cada cierto tiempo (Luke, 1997), (Chong y cols., 2020), lo cual para Guatemala es un proyecto muy elevado en su costo y no funcional, estas mediciones aéreas no son necesarias cuando se realiza la detección satelital, lo cual brinda una muy buena herramienta de

teledetección.

Los llamados países desarrollados, poseen una red de sensores de dióxido de azufre por diferentes partes de su territorio, sin embargo, no logran medir todas las áreas densamente pobladas (Chong y cols., 2020).

Guatemala no posee detectores de SO₂ para los volcanes activos, solo se hacen mediciones eventuales en tierra cuando existe alguna actividad considerable, y las únicas mediciones que se hacen son por medio de algunas estaciones terrestres que se encuentran en la capital (Oliva, 2018), 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 nacional, mucho menos estimación de las tendencias a futuro de este gas.

En el territorio guatemalteco, existen algunas mediciones de SO₂, 2006 y 2012, para el volcán de Pacaya y Fuego (Andres y cols., 1993), otra medición aislada del volcán de Pacaya realizada por Prandi (Prandi, 2015), una medición del año 2012 sobre el volcán Santiaguito (Scott, 2012), por lo que, no existen mediciones constantes y las pocas existentes para las erupciones volcánicas son en tierra y para fechas muy dispersas, entre 1993 al 2015.

Rodríguez (Rodríguez y cols., 2004) 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, en Guatemala 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 (INSIVUMEH, 2019), por falta de mantenimiento.

La facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, posee mediciones constantes en tierra pero solamente para tres estaciones: Musac, Incap y el edificio T-10 de la Universidad de San Carlos de Guatemala, estas mediciones abarcan un período de tiempo desde el año 2002 al 2018 (Oliva, 2018), sin embargo siguen siendo muy pocas mediciones para realizar un estudio completo del SO₂.

II | METODOLOGÍA

1 | fuentes de datos. Medición satelital

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.

Dentro de la flota de satélites de la NASA (NASA, 2020a) que poseen instrumentos para detectar SO₂, el satélite AURA es el que más tiempo y con mayor resolución ha estado coleccionando datos, desde octubre 2004 a la fecha actual.

El satélite AURA es un dispositivo con una órbita polar, hace un recorrido completo de todo el planeta

Propiedades de la medición	SO ₂
Longitud de Onda	310.5 - 340 nm
Detector de medición	UV-2
Algoritmos de datos	BDR- Band Residual Difference PCA - Principal Component Analysis
Correcciones atmosféricas	AMF - Air Mass Factor PBL - 0.9 km
Mediciones en columna	Tropósfera baja - 2.5 km Estratósfera media - 7.5 km Estratosfera - 17 km
Incertidumbre	0.5 - 0.9 DU
Modelo de transferencia radiativa	VLIDORT

Tabla 1: Detector de SO₂, instalado en el satélite AURA. Elaboración propia tomado de (Qu y cols., 2019), y (Levelt y cols., 2006)

al día, dentro de este satélite se encuentra el sensor, Ozone Monitoring Instrument, OMI, por sus siglas en inglés (Levelt y cols., 2006), el cual posee tres detectores de radiación en las regiones UV y visible, capacitados para identificar la huella de radiación producida por el SO₂ en diferentes capas atmosféricas (Fioletov y cols., 2011), esto implica que es posible cuantificar la abundancia de SO₂ de origen natural y antropogénico (Krotkov, Carn, Krueger, Bhartia, y Yang, 2006).

La tabla 1 muestra las propiedades del detector OMI, el cual se propone para la obtención de la abundancia de SO₂ para Guatemala, en donde se pueden observar sus capacidades tecnológicas para poder realizarlo.

Para este estudio se usaron los datos de densidad de columna vertical de la Planetary Boudary Layer, PBL, para SO₂ Nivel 3, estos datos se descargaron de la plataforma ‘Giovanni’ de NASA en formato ‘****data.nc’ (NASA, 2022), con una resolución espacial de 0.25 x 0.25 grados. Los datos se tomaron de lecturas diarias

2 | Distribución Espacial

Se obtienen mapas de distribución espacial para las abundancias de SO₂ para Guatemala, tomando los siguientes límites entre 92.5° - 88° Oeste y 13° - 19° 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 (NASA, 2020b), y se descargaron por medio de la plataforma Giovanni (NASA, 2022). Los datos utilizados para generar los mapas son nivel 3. Los datos promedios de los mapas se tomaron de lecturas mensuales y anuales.

Los datos nivel 3 han sido procesados y filtrados por NASA (Yang y cols., 2007),(Li y cols., 2017),(Li y cols., 2020), al igual la agencia espacial, ha realizado la verificación y garantía de calidad de los mismos (OMI Team, 2005), 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 (MathWorks, 2022).

3 | Estudio

Se analiza la abundancia de SO_2 del territorio de Guatemala, que se encuentra en el Istmo de Centro América con una extensión territorial de 108, 889 km^2 , 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.

Para el presente estudio, se separa en dos regiones, norte y sur, como se aprecia en la figura 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 (UNESCO, 2022) y reserva de la Biósfera Maya (Redford, 2007). En esta región existen algunos pozos petroleros (INCYT y URL, 2018). 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 (INCYT y URL, 2018), zona azucarera, zafra que se desarrolla entre los meses de noviembre y abril (de Bancos, 2016). Además, en esta región se encuentran los tres volcanes activos del país: Pacaya, Fuego y Santiaguito (Rodríguez y cols., 2004).

Cabe resaltar que las dos regiones pueden separarse de forma aproximada por dos cordilleras centrales, Sierra de las Minas (Vásquez-Almazán y Rovito, 2014) y Sierra de los Cuchumatanes (Steinberg y Taylor, 2008), esto es importante ya que las acumulaciones de SO_2 dependen de la orografía del país.

4 | Temporalidad

El presente estudio se realiza en el período de tiempo de 17 años comprendidos entre 2005 y 2021, obteniendo datos diarios de columna de abundancia. Las concentraciones también se analizaron por periodos de estaciones climáticas. Las cuatro estaciones que normalmente se establecen, no se presentan de forma marcada en Guatemala, para este caso en particular se delimitan dos estaciones climáticas, siendo estas la época lluviosa que comprende de mayo a octubre y la época seca, comprendida entre noviembre y abril, esto se tomó basado en la separación climática que realiza el Instituto Nacional de Sismología Vulcanología, Meteorología e Hidrología, INSIVUMEH (Alfaro y Gómez, 2019).

5 | Abundancia de SO_2 antropogénica - natural

Los datos obtenidos de satélite presentan la abundancia de SO_2 de todo el territorio nacional, en estas se encuentran tanto las contribuciones volcánicas como las antropogénicas con datos diarios de abundancia (alrededor de seis mil datos).

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 *outliers* para separar la contribución



Figura 1: Separación región Norte y región Sur. Imagen generada por Google Earth (Google, 2022)

de SO_2 natural de la antropogénica, es decir se consideran a los eventos volcánicos como datos de abundancia de SO_2 ‘anómalos’. El método de outliers se aplicó por medio del Software Matlab 2022a (MathWorks, 2022).

6 | Dependencia de la abundancia del SO_2 con la estación climática

La cantidad de dióxido de azufre, SO_2 , en la atmósfera puede variar según la estación del año debido a factores climáticos como la temperatura, la humedad, la presión atmosférica y la dinámica de la atmósfera para cada época del año. Por ejemplo, durante los meses de invierno, la combustión de combustibles fósiles para la calefacción puede aumentar la cantidad de SO_2 en la atmósfera, especialmente en las regiones frías y húmedas. Por otro lado, durante el verano, la cantidad de SO_2 puede variar debido a la dilución y la dispersión de los contaminantes en la atmósfera. Por lo tanto, la estacionalidad, es solo uno de factores analizados en esta investigación, que puede influir en la abundancia del SO_2 en la atmósfera.

7 | Análisis de Fourier para las series temporales Antropogénicas y Naturales

Se aplicó el método de la transformada rápida de Fourier para analizar y encontrar posibles periodicidades en la abundancia de SO_2 , eso se aplicó tanto para la contribución antropogénica como las emisiones naturales, este método se aplicó por medio del Software Matlab (MathWorks, 2022).

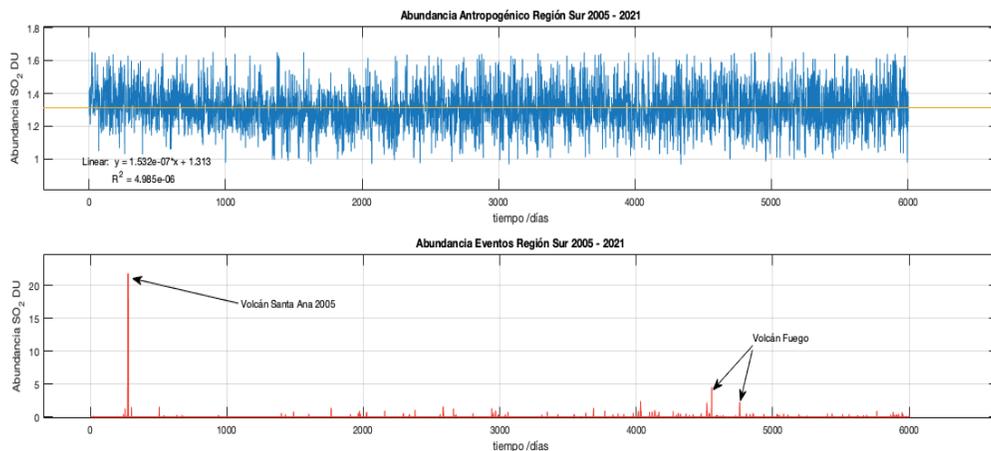


Figura 2: Abundancia de columna troposférica para datos a. antropogénicos. b. eventos volcánicos, se identifican claramente dos eventos volcánicos registrados. Figura elaborada con Matlab 2022a (MathWorks, 2022)

III | RESULTADOS

1 | Series temporales

La figura 2a y 2b, muestra la separación de los eventos antropogénicos de los eventos volcánicos para la región sur de Guatemala. La figura 2b muestra, la emisión de SO_2 , 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.

Para las contribuciones antropogénicas, figura 2a, se observa que la abundancia de SO_2 a en la región sur, permanece constante con un valor medio de 1.31 DU.

La región norte, figura 3a, presenta abundancias más bajas que en la región sur, en promedio de 1.13DU, 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 SO_2 .

2 | 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 No. 4 se observan los promedios durante el periodo de invierno de abundancias de SO_2 para la región sur, se. Se aprecia un descenso considerable 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 (Super Intendencia de Bancos, Sección Hidrocarburos, 2010) 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

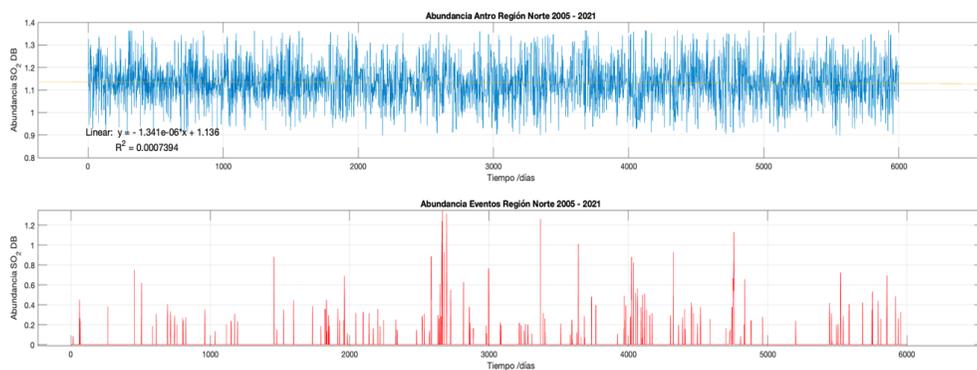


Figura 3: Abundancia de columna troposférica para datos a. antropogénicos b. eventos volcánicos. Figura elaborada con Matlab 2022a (MathWorks, 2022)

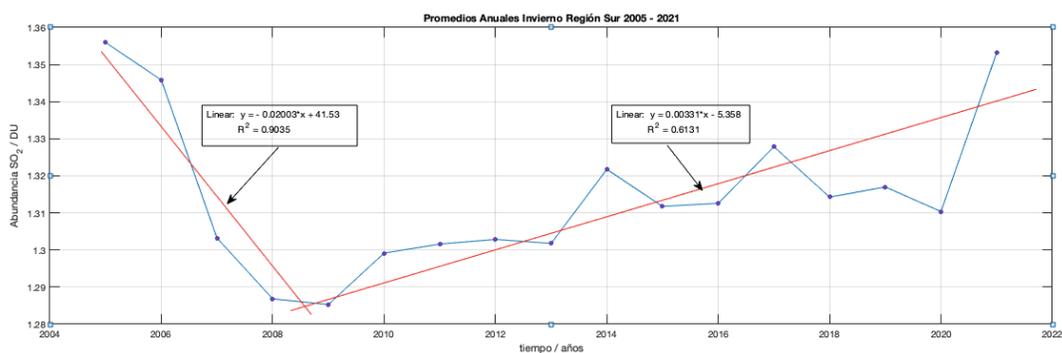


Figura 4: Promedios anuales estación de invierno para la región sur de 2005 a 2021. Gráfica elaborada con Matlab 2022a (MathWorks, 2022)

importación histórica de hidrocarburos (Banco de Guatemala, s.f.). Las tendencias al alza se perciben en los próximos años 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 (CNEE, 2020), sin embargo hay que considerar que con algunas políticas medioambientales (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales Gobierno de Guatemala, s.f.) y un parque vehicular más moderno se ha propiciado a que la abundancia no se dispare a niveles elevados.

Los promedios durante el invierno para la abundancia en la región Norte, figura No. 5, presenta un comportamiento constante, con muy poca tendencia al alza. Se observa que para el año 2012, la abundancia

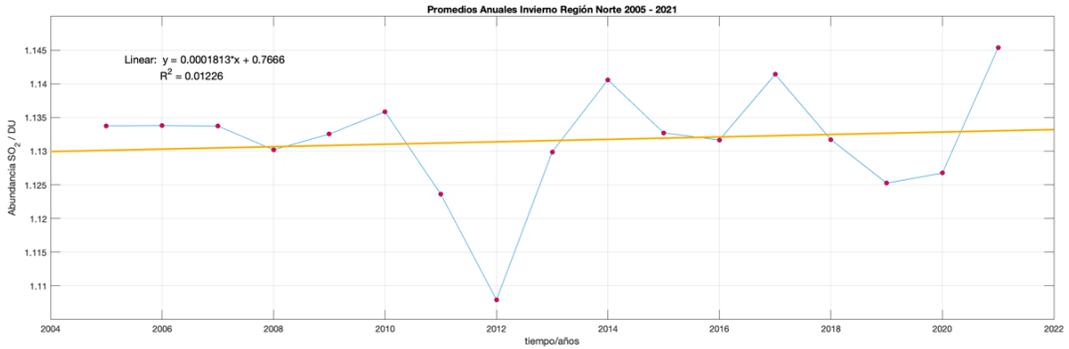


Figura 5: Promedios período invierno, para la región Norte 2005 -2021. Gráfica elaborada con Matlab 2022a (MathWorks, 2022)

de SO₂ es la menor de todo el período, no se encuentran a nivel mundial un comportamiento que pueda justificar este descenso, sin embargo, se observa al comparar las figuras 4 y 5, 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.

De la figura 6, 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 4, en donde la abundancia de menor SO₂ se aprecia en el año 2009.

En la figura No. 7 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 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.

3 | Series temporales de promedios anuales

Se realizaron series temporales de promedios anuales considerando todo el territorio guatemalteco. La región sur, Figura No. 8, presenta un comportamiento similar al que muestran las estaciones climáticas

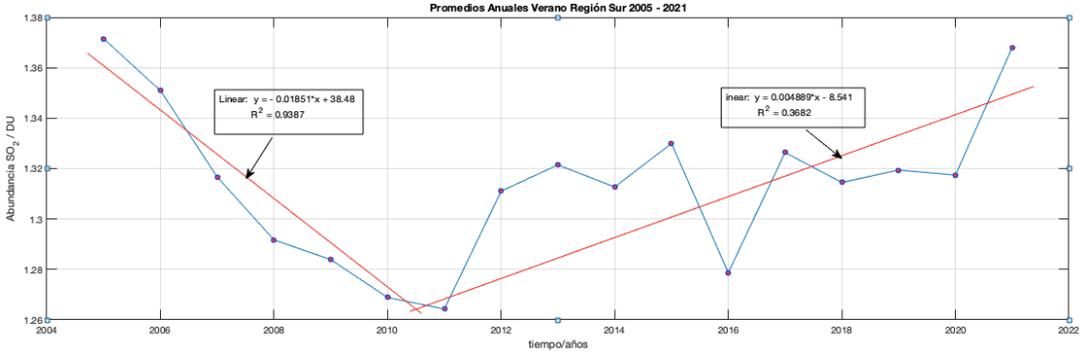


Figura 6: Promedios anuales verano, para la región Sur 2005 -2021. Gráfica elaborada con Matlab 2022a (MathWorks, 2022)

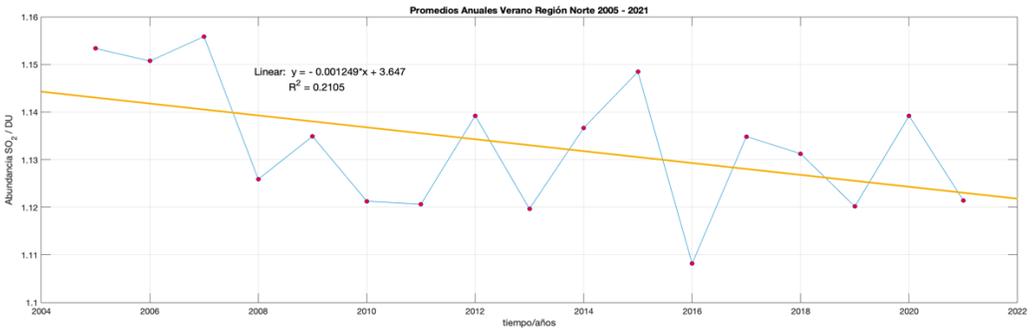


Figura 7: Promedios anuales verano, para la región Norte 2005 -2021. Gráfica elaborada con Matlab 2022a (MathWorks, 2022)

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.

La serie temporal de los promedios anuales para la región norte, 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.

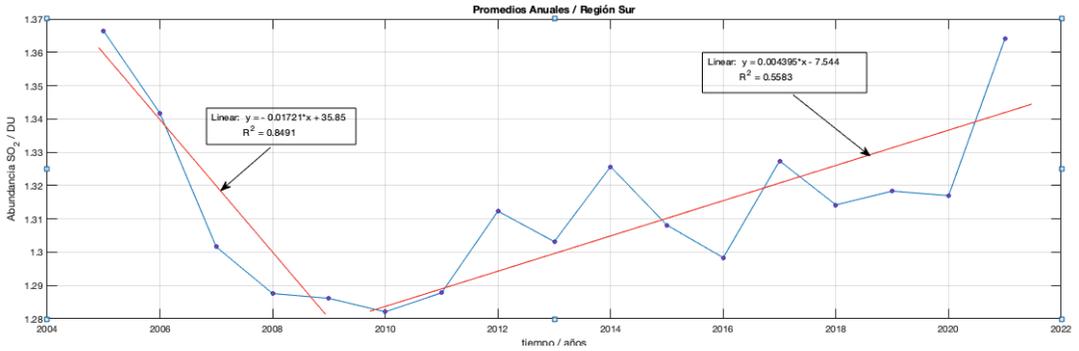


Figura 8: Promedios anuales totales, para la región Sur 2005 -2021. Gráfica elaborada con Matlab 2022a (MathWorks, 2022)

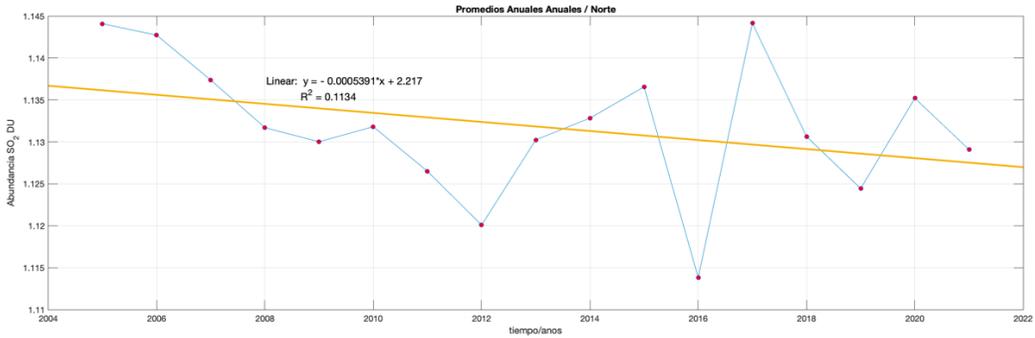


Figura 9: Promedios anuales totales, para la región Norte 2005 -2021. Gráfica elaborada con Matlab 2022a (MathWorks, 2022)

4 | Periodicidad

Para obtener si existe una periodicidad se empleó el método de la transformada rápida de Fourier aplicado a las contribuciones naturales, no presentó ciclicidad, esto se esperaba, ya que las principales contribuciones naturales (los volcanes) no tienen ciclos definidos, 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 No. 2.

Los períodos 1 y 2 de la Tabla No. 2, 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 8 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

Período (días)	
1	6003
2	3015
3	182
4	8

Tabla 2: períodos principales por medio de transformada rápida de Fourier, FFT, Elaboración propia con datos generados de Matlab 2020a (MathWorks, 2022)

demanda y generación de energía por diferentes tecnologías, (INCYT y URL, 2018), (IAEA, 2019).

El período de 8 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.

El período encontrado es de 8 días aproximadamente y no de 7 días, esto se debe probablemente a la incertidumbre en la trayectoria del satélite sobre Guatemala, ya que este satélite no presenta una órbita geostacionaria y a los errores en la medición satelital con respecto a nubosidad y clima.

5 | Distribución Espacial

En el mapa No. 2 se observan la abundancia de SO_2 para el territorio de Guatemala en el período 2005–2021 que corresponde con todo el tiempo de estudio, se aprecia que la contaminación principal se orienta hacia el sur del país, en la región que se ha separado como región sur, en esta parte encuentra la mayor actividad industrial del país, generadoras eléctricas (INCYT y URL, 2018) y producción azucarera (de Bancos, 2016), así como los tres volcanes activos del país.

Resaltan también las abundancias que se propagan hacia el océano pacífico y que proceden de El Salvador, esto es producido por la contaminación de SO_2 , que proviene del volcán Santa Ana, del mencionado país.

De la Figura No. 10 también se observa que las contribuciones a la atmósfera de las abundancias del SO_2 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 SO_2 provenientes de México y Honduras, sin embargo, es necesario realizar más estudios con modelos de dispersión para verificar esta afirmación.

Los mapas 11a, 11b, 11c y 11d, muestran la distribución espacial en el territorio de Guatemala del SO_2 , 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 SO_2 , 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 No. 8, 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.

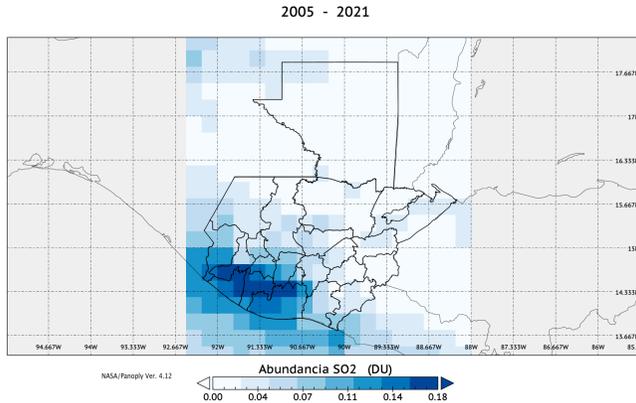


Figura 10: Columna de abundancia de SO₂, sobre Guatemala, período 2005 -2021. Mapa generado con Panoply NASA, Ver 4.12. (NASA, 2020b)

Se han seleccionado para su análisis los mapas 12a, 12b, y 12c, 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 0.43DU 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.

IV | DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos del detector OMI para el SO₂ se obtienen mediante el programa Giovanni versión 4.38 de la NASA (NASA, 2022), que se encuentra disponible en la página Giovanni, esta herramienta es muy útil para los científicos, ya que permite analizar y visualizar grandes conjuntos de datos de manera práctica e intuitiva.

V | SOFTWARE MATLAB

Como el formato de los datos es ‘****data.nc’, el análisis se realizó por medio de varios ‘scripts’ programados con el software Matlab (MathWorks, 2022). Estos scripts se dividieron en varias etapas, cada una de las cuales involucra cientos de variables y subrutinas.

Las etapas desarrolladas se pueden separar así: lectura y extracción de datos, ordenamiento por fechas, ajuste de ceros, separación de región norte - sur, análisis y separación de los outliers, estudio de series temporales, análisis de FFT (transformada rápida de Fourier), entre otros. Debido a la complejidad y extensión de los scripts desarrollados en esta investigación, no se detallan en este artículo. Sin embargo, se invita al lector interesado a ponerse en contacto con el autor principal de esta investigación a través de su correo electrónico rcontrerasfisica@gmail.com, quien gustosamente colaborará en el desarrollo

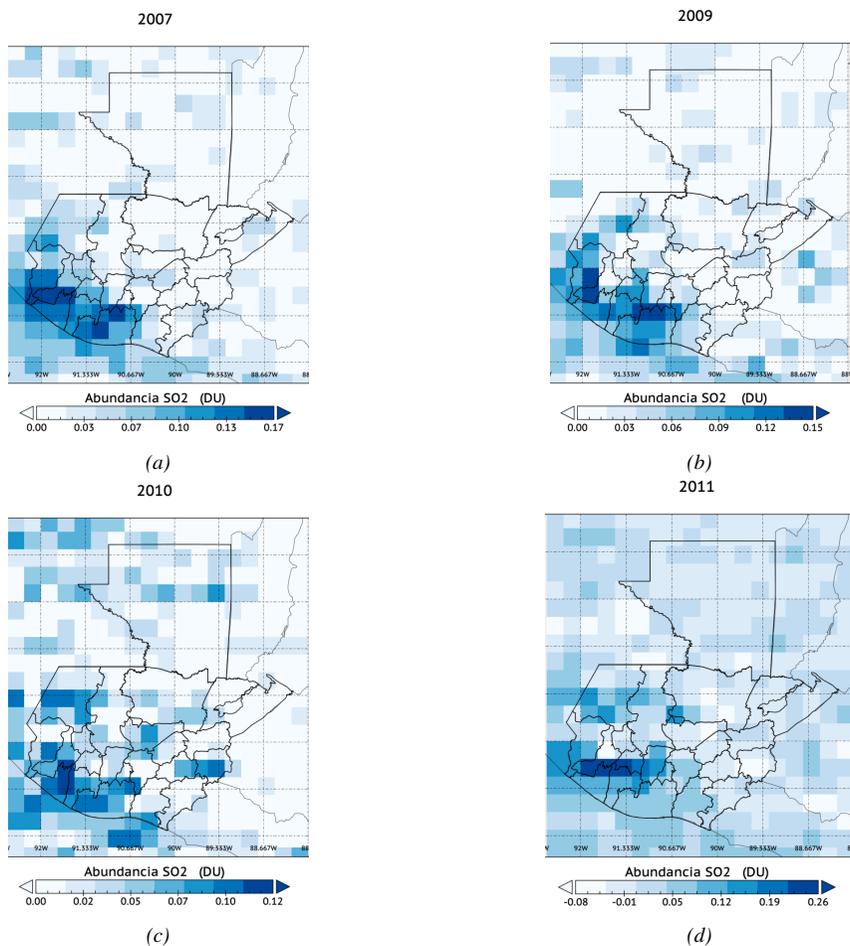


Figura 11: Mapas de Columna de abundancia de SO₂, sobre Guatemala 11a. 2007, 11b. 2009, 11c. 2010, 11d. 2011. Mapas generados con Panoply NASA, Ver 4.12. (NASA, 2020b)

de programas en Matlab para el investigador interesado.

VI | CONCLUSIONES

- 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; 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.
- 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

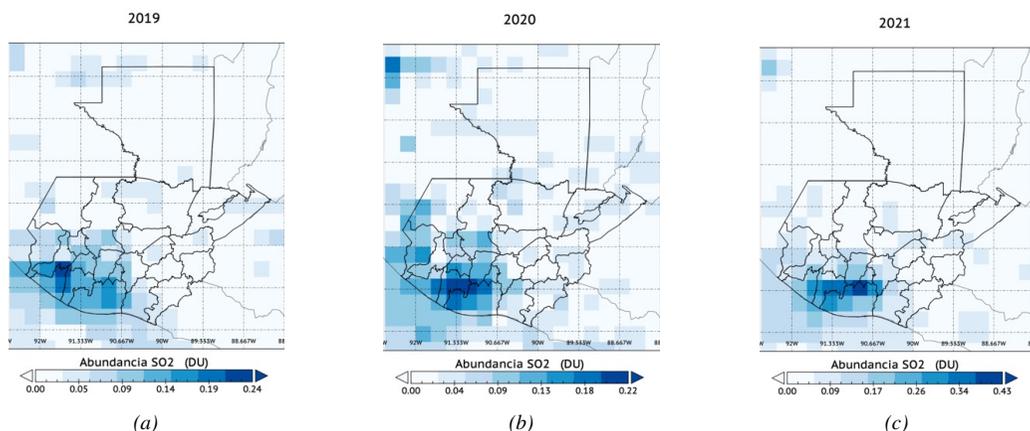


Figura 12: Mapas de Columna de abundancia de SO_2 , sobre Guatemala 12a. 2019, 12b. 2020, 12c. 2021. Mapas generados con Panoply NASA, Ver 4.12. (NASA, 2020b)

diferente, se aprecia un aumento para el invierno y un descenso constante en el verano.

- Se encuentran ciclos definidos de 8 y 182 días respectivamente en las abundancias de SO_2 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.
- 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 SO_2 .

VII | RECOMENDACIONES

- Realizar más estudios de las abundancias de SO_2 en tierra y en aire a diferentes alturas, para desarrollar modelos que puedan correlacionar los datos satelitales con las mediciones terrestres.
- Realizar un análisis de trayectorias con modelos de dispersión para identificar el origen de las abundancias detectadas de SO_2 , así como la localización de fuentes no reportadas.
- Hacer un estudio de series temporales de actividades volcánicas para relacionarlo directamente con la separación antropogénica – natural realizada en este trabajo.

I | REFERENCIAS

- Alfaro, G., y Gómez. (2019). Primer reporte de evaluación del conocimiento sobre cambio climático en Guatemala. *Universidad del Valle de Guatemala*, 2–19.
- Andres, R., Rose, W., Stoiber, R., Williams, S., Matías, O., y Morales, R. (1993). A summary of sulfur dioxide emission rate measurements from Guatemalan volcanoes. *Bulletin of Volcanology*, 55(5), 379–388. Descargado de <https://doi.org/10.1007/BF00301150> doi:
- Banco de Guatemala. (s.f.). *Serie histórica de importaciones clasificadas por grupo cuode*. <https://banguat.gob.gt/es/page/serie-historica-de-importaciones-clasificadas-por-grupo-cuode>.

- Carn, S. A., Fioletov, V. E., McLinden, C. A., Li, C., y Krotkov, N. A. (2017). A decade of global volcanic SO₂ emissions measured from space. *Scientific Reports*, 7(1), 44095. Descargado de <https://doi.org/10.1038/srep44095> doi:
- Chen, R., Huang, W., Wong, C.-M., Wang, Z., Quoc Thach, T., Chen, B., y Kan, H. (2012). 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, 101–106. Descargado de <https://doi.org/10.1016/j.envres.2012.07.003> doi:
- Chen, T.-M., Kuschner, W. G., Gokhale, J., y Shofer, S. (2007). Outdoor air pollution: Nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and carbon monoxide health effects. *The American Journal of the Medical Sciences*, 333(4), 249–256. Descargado de <https://doi.org/10.1097/MAJ.0b013e31803b900f> doi:
- Chong, H., Lee, S., Kim, J., Jeong, U., Li, C., Krotkov, N. A., ... Koo, J.-H. (2020). 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. Descargado de <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111725> doi:
- Clerbaux, C., Coheur, P.-F., Clarisse, L., Hadji-Lazaro, J., Hurtmans, D., Turquety, S., ... Carn, S. A. (2008). Measurements of SO₂ profiles in volcanic plumes from the NASA tropospheric emission spectrometer (TES). *Geophysical Research Letters*, 35(22), L22807. Descargado de <https://doi.org/10.1029/2008GL035566> doi:
- CNEE. (2020). *Gerencia de planificación y vigilancia de mercados eléctricos 2015–2019* (Inf. Téc. n.ºs 2015–2019). CNEE.
- Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., ... Forouzanfar, M. H. (2017). 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(10082), 1907–1918. Descargado de [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6) doi:
- de Bancos, S. (2016). *SECTOR AZUCARERO (p. 19) [análisis sector azucarero]*. (Super Intendencia de Bancos, Sección Hidrocarburos)
- Ehhalt, D. H. (1999). Photooxidation of trace gases in the troposphere plenary lecture. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 1(24), 5401–5408. Descargado de <https://doi.org/10.1039/a905097c> doi:
- Federación de Cámaras y Asociaciones Industriales de Centroamérica y República Dominicana (FECAICA). (2020, September). *Federación de cámaras y asociaciones industriales de centroamérica y república dominicana*. <https://fecaica.com/industria-centroamericana/>.
- Fioletov, V. E., McLinden, C. A., Krotkov, N., Moran, M. D., y Yang, K. (2011). Estimation of SO₂ emissions using OMI retrievals: SO₂ emissions and OMI retrievals. *Geophysical Research Letters*, 38(21), n/a–n/a. Descargado de <https://doi.org/10.1029/2011GL049402> doi:
- Globay Energy Observatory. (2020, September). *Globay energy observatory*. <http://globalenergyobservatory.org/geoid/43653>.
- Google. (2022). *Google earth pro (7.3.4.8642) [mac os x (10.16.0)]*. Google.
- IAEA. (2019). *Climate change and nuclear power 2018* (Inf. Téc.). Printed by the IAEA in Austria. Descargado de <https://www.iaea.org/publications/search?keywords=Climate+Change+and+Nuclear+power&Search=Search>
- INCYT, y URL. (2018). *Perfil energético de guatemala: Bases para el entendimiento del estado actual y tendencias de la energía*.
- INSIVUMEH. (2019). *Programa de calidad del aire de insivumeh para la república de guatemala*. <http://hidromet.insivumeh.gob.gt/calidadaire/redestaciones.htm#Guatemala>.
- Krotkov, N. A., Carn, S. A., Krueger, A. J., Bhartia, P. K., y Yang, K. (2006). Band residual difference algorithm for retrieval of SO₂ from the aura ozone monitoring instrument (OMI). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(5), 1259–1266. Descargado de <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.861932> doi:
- Levelt, P. F., van den Oord, G. H. J., Dobber, M. R., Malkki, A., Visser, H., de Vries, J., ... Saari, H. (2006). The ozone monitoring instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(5), 1093–1101. Descargado de <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872333> doi:
- Li, C., Krotkov, N. A., Carn, S., Zhang, Y., Spurr, R. J. D., y Joiner, J. (2017). 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). *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(2), 445–458. Descargado de <https://doi.org/10.5194/amt-10-445-2017> doi:
- Li, C., Krotkov, N. A., Leonard, P. J. T., Carn, S., Joiner, J., Spurr, R. J. D., y Vasilkov, A. (2020). Version 2 ozone monitoring instrument SO₂ product (OMSO₂ V2): New anthropogenic SO₂ vertical column density dataset. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(11), 6175–6191. Descargado de <https://doi.org/10.5194/amt-13-6175-2020> doi:
- Luke, W. T. (1997). Evaluation of a commercial pulsed fluorescence detector for the measurement of low-level SO₂ concentrations during the gas-phase sulfur intercomparison experiment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D13), 16255–16265. Descargado de <https://doi.org/10.1029/96JD03347> doi:
- MathWorks. (2022). *MATLAB (version 2022a)*. MathWorks.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales Gobierno de Guatemala. (s.f.). *MARN [Gobierno]*. MARN. Descargado de <https://www.marn.gob.gt>
- NASA. (2020a, October). *Multi-decadal sulfur dioxide climatology from satellite instruments* (Inf. Téc.). Earth Data. Descargado de <https://earthdata.nasa.gov/esds/competitive-programs/measurements/multi-decadal-sulfur-dioxide>
- NASA. (2020b). Panoply (4.11.6) [Manual de software informático].
- NASA. (2022). *Giovanni - the bridge between data and science*. NASA EarthDATA. Descargado de <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
- Oliva, P. (2018). *Informe anual de la calidad del aire ciudad de guatemala 2017* (Inf. Téc.). Laboratorio de Monitoreo del Aire.
- OMI Team. (2005). Ozone monitoring instrument (OMI) data user's guide [Manual de software informático]. Descargado de <https://disc.gsfc.nasa.gov/education-and-outreach/additional/scientific-data/omi/omi-data-user-guide>
- Prandi, C. (2015). *Multi-instrumental investigation of volcanic outgassing at pacaya volcano, guatemala* (Tesis Doctoral no publicada). Michigan Technological University.
- Qu, Z., Henze, D. K., Li, C., Theys, N., Wang, Y., Wang, J., ... Ren, X. (2019). SO₂ emission estimates using omi so₂ retrievals for 2005–2017. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(14), 8336–8359. Descargado de <https://doi.org/10.1029/2019JD030243> doi:
- Redford, K. (2007). Protected areas and human displacement: A conservation perspective. , 29.
- Rodríguez, L. A., Watson, I. M., Rose, W. I., Branan, Y. K., Bluth, G. J. S., Chigna, G., ... Fischer, T. P. (2004). SO₂ emissions to the atmosphere from active volcanoes in guatemala and el salvador, 1999–2002. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 138(3–4), 325–344. Descargado de <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.07.008> doi:
- Scott, J. A. J. (2012). *Origin and evolution of the santiaguito lava dome complex, guatemala* (Tesis Doctoral no publicada). Department of Earth Sciences, University of Oxford.
- Sears, T. M., Thomas, G. E., Carboni, E., Smith, A. J. A., y Grainger, R. G. (2013). SO₂ as a possible proxy for volcanic ash in aviation hazard avoidance: SO₂ as a possible proxy for volcanic ash. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(11), 5698–5709. Descargado de <https://doi.org/10.1002/jgrd.50505> doi:
- Steinberg, M., y Taylor, M. (2008). Guatemala's altos de chiantla: Changes on the high frontier. *Mountain Research and Development*, 28(3/4), 255–262. Descargado de <https://doi.org/10.1659/mrd.0891> doi:
- Super Intendencia de Bancos, Sección Hidrocarburos. (2010). *Análisis cuatrimestral de sectores económicos (análisis agosto 2010)*. Super Intendencia de Bancos. Descargado de URL (p. 15)
- UNESCO. (2022). *Natural sciences*. Unesco.Org. Descargado de http://portal.unesco.org/science/en/ev.php-URL_ID%3D5756&URL_DO%3DDO_TOPIC&URL_SECTION%3D201.html
- Vásquez-Almazán, C. R., y Rovito, S. M. (2014). A new species of black *Bolitoglossa* (caudata: Plethodontidae) from guatemala. *Journal of Herpetology*, 48(4), 518–524. doi:
- Wallace, J. M., y Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: An introductory survey* (2nd ed.). Elsevier Academic Press.
- Ward, P. L. (2009). Sulfur dioxide initiates global climate change in four ways. *Thin Solid Films*, 517(11), 3188–3203. Descargado de <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.01.005> doi:
- Yang, K., Krotkov, N. A., Krueger, A. J., Carn, S. A., Bhartia, P. K., y Levelt, P. F. (2007). Retrieval of large volcanic so₂ columns from the aura ozone monitoring instrument: Comparison and limitations. *Journal of*

Geophysical Research, 112(D24), D24S43. Descargado de <https://doi.org/10.1029/2007JD008825>
doi: