



# NO<sub>2</sub> distribución espacial y tendencias sobre el territorio guatemalteco, entre 2005 y 2021, empleando datos de OMI

NO<sub>2</sub> spatial distribution, and trends over the guatemalan territory, between 2005 and 2021, using OMI data

K. AGUILAR<sup>1</sup>, R. CONTRERAS<sup>1</sup>, A. GARCÍA<sup>2</sup>, C. RIVERA<sup>2</sup>

Recibido: 16 de enero de 2023 / Aceptado: 21 de febrero de 2023

## RESUMEN

El dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) genera efectos adversos a la salud y al ambiente, por lo cual se requiere realizar el monitoreo de sus concentraciones ambientales. En el caso de Guatemala, la red de monitoreo es exigua, por lo anterior no se conoce su tendencia y distribución espacial. Se analiza la estacionalidad y tendencias de la concentración de NO<sub>2</sub> troposférico en el territorio guatemalteco entre 2005 y 2021 mediante el empleo de observaciones satelitales provenientes del Ozone Monitoring Instrument (OMI), a partir del análisis preliminar se identificaron tres regiones. Para cada región se identificó si existía periodicidad y tendencia en las observaciones. Aunque en general la tendencia es al descenso en la abundancia de NO<sub>2</sub> sobre todo el territorio, se observa que existen zonas del país donde la presencia del gas se incrementa a lo largo del período de estudio. Los niveles más elevados de NO<sub>2</sub> fueron observados sobre la región en la cual se desarrollan las industrias de generación eléctrica (a partir de combustibles fósiles y biomasa), y azucarera. Los incendios forestales, a pesar de ser abundantes en una gran parte del territorio guatemalteco a finales de la época seca, no tienen influencia significativa sobre la abundancia de NO<sub>2</sub> en el país.

## ABSTRACT

Nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) generates adverse effects on health and the environment, which is why monitoring of its environmental concentrations is required. NO<sub>2</sub> is produced during the electricity generation process. In the case of Guatemala, the monitoring network is limited, which makes it difficult to determine its trend and spatial distribution. The seasonality and trends of tropospheric NO<sub>2</sub> concentrations in the Guatemalan territory between 2005 and 2021 are analyzed using satellite observations from the Ozone Monitoring Instrument (OMI). From the preliminary analysis, three regions were identified. For each region, the presence of periodicity and trend in the observations was determined. Although there is a general decreasing trend in NO<sub>2</sub> abundance throughout the territory, there are areas in the country where the gas concentration increases over the study period. The highest levels of NO<sub>2</sub> were observed in the region where electricity generation industries (from fossil fuels and biomass)

<sup>1</sup>Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas,  
Universidad de San Carlos de Guatemala.  
kristaivonne@gmail.com

<sup>2</sup>Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio  
Climático, Universidad Nacional Autónoma de  
México. agustin@atmosfera.unam.mx

\* Esta obra está bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento - NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC)

\* This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License. (CC BY-NC)

and the sugar industry are located. Forest fires, despite being abundant in a large part of the Guatemalan territory during the late dry season, do not have a significant influence on the abundance of NO<sub>2</sub> in the country.

#### PALABRAS CLAVES

Atmósfera, contaminación, dióxido de nitrógeno

#### KEYWORDS

Atmosphere, pollution, nitrogen dioxide

## I | INTRODUCCIÓN

### 1 | Dióxido de Nitrogeno

El dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) es uno de los principales gases que conforman la familia de los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). En conjunto con el óxido nítrico (NO), juega un papel importante dentro de la química atmosférica, los ciclos biogeoquímicos y la eutrofización de los ecosistemas (Lelieveld, Beirle, Hörmann, Stenchikov, y Wagner, 2015). Afecta de forma indirecta el forzamiento radiativo por su participación en la formación de ozono troposférico (O<sub>3</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y partículas (PM<sub>2.5</sub>) (Suddick y Davidson, 2012). Esto lo convierte en un gas de efecto invernadero (GEI) secundario, con contribución al cambio climático. Bajo determinadas condiciones puede formar ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) (Suddick y Davidson, 2012) (Lefohn y cols., 2018) (Holzinger y cols., 1999) (Sillman, 1999), al unirse al vapor de agua que se encuentra en la atmósfera. El ácido nítrico puede precipitar en forma de lluvia ácida, destruyendo la vegetación, principal sumidero de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), e incrementando la eutrofización de lagos y océanos (Galán Madruga y Fernández Patier, 2006).

El dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) es altamente nocivo para la salud humana (Suddick y Davidson, 2012). Forma parte del conjunto de gases de contaminación atmosférica, debido a su capacidad para formar aerosoles, que componen las partículas (PM<sub>2.5</sub>), y que junto con el ozono troposférico componen el smog fotoquímico (Peel, Haeuber, Garcia, Russell, y Neas, 2013). Es uno de los componentes de la contaminación del aire en interiores, incrementando la morbilidad y mortalidad en los seres humanos (Peel y cols., 2013). La Organización Mundial de la Salud (OMS) indica que la contaminación atmosférica es la responsable de cerca de dos millones de muertes prematuras en todo el mundo (Cohen y cols., 2017).

A nivel global, se generan aproximadamente 50 Tg ( $1 \times 10^{12}$  g) de óxido de nitrógeno por año, de los cuales el 23% es de origen natural, siendo el 58% originado por la quema de combustibles fósiles (principalmente para transporte y generación de electricidad), el restante 19% proviene de la quema de biomasa y cambio de uso del suelo, la agricultura (en pesticidas y fertilizantes) y los biocombustibles (Lelieveld y cols., 2015) (Krotkov y cols., 2016) (Hilboll, Richter, y Burrows, 2013). Estos valores de emisiones de origen antrópico se incrementan cada año en algunas regiones del mundo, mientras que en otras se mantienen estables gracias a las regulaciones sobre emisiones de NO<sub>2</sub> y contaminantes atmosféricos que estos países manejan (David y Nair, 2013) (ul Haq, Tariq, y Ali, 2015) ((van der A y cols., 2006) (Boersma y cols., 2009).

Existen procesos naturales de deposición del dióxido de nitrógeno, que dependen de los procesos naturales de la zona (factores meteorológicos, capacidad de la vegetación, suelo y agua para fijar

sustancias, entre otros) (Kramm y cols., 1995). Sin embargo, estos procesos de deposición resultan actualmente insuficientes para evitar la elevación de la concentración atmosférica global del NO<sub>2</sub>, la cual se ha incrementado de forma significativa durante los últimos 100 años ((Galán Madruga y Fernández Patier, 2006)

## 2 | Monitoreo y regulación de NO<sub>2</sub> en Guatemala

Muchos países tienen sus propias regulaciones en cuanto a concentraciones máximas permitidas, otros, como Guatemala, emplean regulaciones internacionales. El Sistema de Calidad del Aire del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) de Guatemala utiliza como referencia los Límites de Calidad del Aire establecidos en la legislación de Estados Unidos a través de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) (INSIVUMEH, 2020b). Sin embargo, a pesar de que Guatemala se guía por la regulación estadounidense, no existen en el país sistemas de monitoreo continuo de concentraciones de NO<sub>2</sub> (Alfaro y Gómez, 2019). Se han realizado algunas mediciones puntuales dentro de la ciudad capital de Guatemala y cabeceras municipales, sin embargo, la mayor parte del territorio no ha sido estudiada nunca (INSIVUMEH, 2020a).

Esta deficiencia en cuanto al monitoreo ambiental de NO<sub>2</sub> en Guatemala, obedece a que el país carece de equipo que pueda llevar a cabo las mediciones de los principales gases contaminantes de manera continua, debido a la falta de presupuesto para compra de equipo y mantenimiento del mismo. (INSIVUMEH, 2020b)

La Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC), a través del Laboratorio de Monitoreo del Aire (LMA), de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, también realiza mediciones sobre calidad del aire, aunque lo hace únicamente para la Ciudad de Guatemala. Para llevar a cabo las mediciones utilizan un muestreo por difusión pasiva y análisis espectrofotométrico. De acuerdo con Oliva, el promedio anual de concentración de NO<sub>2</sub> en los puntos de medición, rebasa el límite sugerido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Oliva y Taracena, 2019). Esta medición no puede generalizarse a toda la región guatemalteca, debido al método de muestreo empleado.

La generación de NO<sub>2</sub> en Guatemala no se limita exclusivamente al parque vehicular de las ciudades. La generación eléctrica en Guatemala emplea carbón y combustibles fósiles. De acuerdo con la Universidad Rafael Landívar, cerca del 30% de la generación eléctrica se realiza con combustibles fósiles. (Incyt, 2018). Así mismo, presenta una alta tasa de incendios forestales durante la época seca, además de quema de biomasa por actividades agronómicas entre las que se encuentra la zafra. Todas estas actividades pueden influenciar la distribución espacial del NO<sub>2</sub>, a nivel de la tropósfera sobre el territorio guatemalteco, por lo que resulta importante evaluar cual es la distribución espacial actual, cual ha sido la tendencia de los últimos años y cuál es el comportamiento estacional.

Es posible llevar a cabo estimaciones sobre el comportamiento del NO<sub>2</sub> sobre todo el territorio de Guatemala empleando datos satelitales (Lelieveld y cols., 2015). El NO<sub>2</sub> presenta una fuerte absorción en el espectro visible, que facilita el uso de la espectroscopia óptica de absorción para medir su abundancia en la atmósfera (Hilboll y cols., 2013). Así mismo, el tiempo de vida de los óxidos de nitrógeno es relativamente corto a nivel atmosférico (desde unas pocas horas hasta unos pocos días), por lo que las concentraciones del gas se encuentran generalmente alrededor de la fuente de emisión, permitiendo estimar emisiones (Hilboll y cols., 2013).

Países de la Comunidad Europea, India, China, Rusia, Estados Unidos han realizado exitosamente estudios de monitoreo y análisis de la abundancia de NO<sub>2</sub> en su territorio, por medio de OMI. (David y Nair, 2013) (van der A y cols., 2006) (Boersma y cols., 2009) (ul Haq y cols., 2015).

### 3 | OMI y NO<sub>2</sub>

Actualmente existen cuatro instrumentos que pueden hacer mediciones de NO<sub>2</sub> atmosférico, estos son: OMI y TROPOMI (pertenecientes a la NASA), y GOME y SCIAMACHY, pertenecientes a la Agencia Espacial Europea (Levelt y cols., 2006).

El Instrumento de Monitoreo de Ozono (Ozone Monitoring Instrument, OMI por sus siglas en inglés) forma parte de los instrumentos de medición instalados en el satélite Aura, satélite dedicado a la observación de O<sub>3</sub>, calidad del aire y clima, del programa de la NASA (Levelt y cols., 2006) (Wang, Zheng, Zhang, y Wang, 2018).

Este instrumento es una colaboración alemana-finlandesa que registra la radiación solar reflejada por la superficie terrestre en el rango del espectro visible y ultravioleta (UV). Tiene una resolución espacial de 13 × 24 km<sup>2</sup> aproximadamente, en el centro del barrido, siendo uno de los instrumentos con mayor resolución existentes (Krotkov y cols., 2016) (Levelt y cols., 2006).

OMI fue puesto en órbita el 15 julio de 2004, sigue una órbita polar, con un período de aproximadamente 100 minutos y 705 km de altura. Orbita la Tierra en conjunto con otros satélites como parte del Tren Vespertino (A-Train). Durante el año 2021 cumplió 17 años de registrar datos (el mayor tiempo de registro de datos por satélite hasta ahora) (Levelt y cols., 2006). Emplea mediciones en 3 canales (UV1, UV2 y VIS) abarcando el rango de 270-500nm (Levelt y cols., 2006).

Para este estudio se trabajó con el producto de OMI de Nivel 3, para abundancia de NO<sub>2</sub> troposférico, con una resolución de 0.25° latitud × 0.25° longitud, cuyos datos se encuentran geo localizados (Krotkov y cols., 2016) (NASA, GES, 2022). Los datos son obtenidos en el espectro visible dentro de los 405-465 nano metros. El producto OMI NO<sub>2</sub> se identifica con el nombre OMNO<sub>2</sub>d v003 (Krotkov y cols., 2016). La información obtenida corresponde a la abundancia de NO<sub>2</sub> en columna troposférica (entre 10 y 12 km de altura de columna sobre la superficie terrestre) (Majid, Val Martin, Lamsal, y Duncan, 2017) (Hilboll y cols., 2013).

### 4 | Guatemala, contexto regional y nacional

Guatemala se encuentra ubicada en la región centroamericana, limitando al norte y occidente con México, al este con Belice y al sur con Honduras y El Salvador. Tiene una extensión de 108,889 km<sup>2</sup> (aproximadamente) y su relieve es montañoso, con excepción de la costa sur y las tierras del norte, que son principalmente planas.

Centroamérica es una región principalmente tropical, con temperaturas elevadas y una amplia diversidad climática. Guatemala, en particular, posee múltiples micro climas y amplia variabilidad climática (Castellanos, Paiz-Estevez, Bámaca, Rosales-Alconero, y Santizo, 2019).

Alrededor de la meseta central el promedio de temperatura es de alrededor de 15° C, mientras que hacia las costas tiende a ser tropical, cálido y húmedo. La región montañosa posee clima principalmente frío, con mayor frecuencia y abundancia de precipitaciones (Alfaro y Gómez, 2019).

El clima de Guatemala se encuentra altamente influenciado por los regímenes de vientos del norte, con aportes de humedad provenientes del mar Caribe y del Golfo de México, así como los vientos del suroeste, con aportes de humedad del océano Pacífico (Alfaro y Gómez, 2019).

El país presenta dos estaciones: La época seca, que va de noviembre a abril, comenzando con temperaturas bajas, debidas a las masas de aire frío provenientes de la zona polar, y terminando con temperaturas altas hacia finales de la estación; y la época lluviosa, que va de mayo a octubre. Durante el mes de julio y parte de agosto (ambos dentro de la época lluviosa) suele tener lugar un corto período seco denominado canícula (Alfaro y Gómez, 2019).

Guatemala presenta algunas características que podrían hacer que sus emisiones de gases, entre ellos el NO<sub>2</sub>, vayan en aumento de manera constante, entre ellas el rápido crecimiento poblacional, la explotación masiva de los recursos naturales, cuyas causas principales son el cambio de uso de suelo para agricultura y ganadería (el 24% del PIB responde a la agricultura), la pérdida masiva de bosques y la expansión urbana e industrialización (generación de energía eléctrica, cultivo de azúcar, aceite de palma), entre otros (Incyt, 2018) (Castellanos y cols., 2019) (Alfaro y Gómez, 2019).

## II | METODOLOGÍA

### 1 | Determinación de variables espacio y tiempo

#### 1.1 | Período de estudio

Se estableció un período de estudio de 17 años, comprendidos entre 2005 y 2021, teniendo en cuenta las características y disponibilidad de los datos provenientes de OMI.

#### 1.2 | Área de estudio

El estudio se realizó sobre la totalidad del territorio guatemalteco, empleando únicamente los datos correspondientes al área comprendida dentro de sus límites geográficos (figura 1). Guatemala posee una extensión territorial de 108,889 km<sup>2</sup>, con 400 km de costa aproximadamente.

Para un mejor análisis del comportamiento de las abundancias de NO<sub>2</sub> sobre el territorio guatemalteco, se dividió la región de estudio en tres regiones, de acuerdo a sus características climáticas, geográficas, urbanas y de industrialización, entre otros, de la forma siguiente:

**Región Sur:** Zona baja y costera que comprende la parte sur del país y parte de la región oriental. Es una región principalmente plana, con temperaturas altas y clima tropical (Castellanos y cols., 2019). En esta zona se concentra la mayor parte de la industria de generación de energía eléctrica por medio de biomasa y combustibles fósiles (Incyt, 2018). La vegetación se encuentra fuertemente modificada por el cultivo de caña de azúcar, que también se encuentra concentrado exclusivamente en esta sub región del país (SIB, 2011) (Cengicaña, 2022).

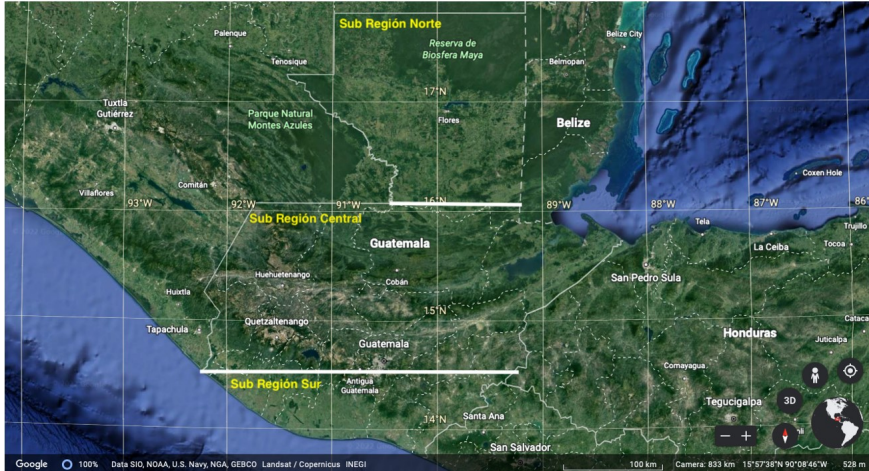


Figura 1: Mapa del territorio guatemalteco, incluye la separación en las tres regiones (sur, centro y norte), empleada en este estudio. Fuente: Google Earth (Google Earth, s.f.).

**Región Centro:** Constituye la franja media del país, desde la frontera occidental (frontera con México) hasta la frontera oriental (frontera con Honduras y El Salvador). Esta región contiene las principales ciudades del país, así como las principales cadenas montañosas y bosques nubosos del territorio. Presenta una amplia variedad de micro climas, que van desde la Región de Valles de Oriente, con altas temperaturas, hasta la Franja Transversal del Norte, con climas mas bien fríos, pasando por el Altiplano Central y la región Caribe (Castellanos y cols., 2019).

**Región Norte:** Abarca exclusivamente el departamento de Petén. Es una región mayormente plana, poco poblada y poco industrializada, con grandes extensiones de vegetación que corresponde a selva tropical y grandes extensiones dedicadas a la agricultura y la agronomía. El clima es principalmente tropical, con abundantes precipitaciones (Castellanos y cols., 2019).

## 2 | Tratamiento de datos

### 2.1 | Origen de los datos

Los datos utilizados en este estudio se obtuvieron de la plataforma Giovanni (NASA, 2022) y corresponden a las mediciones diarias en columna troposférica para el  $\text{NO}_2$ , con un filtro de nubosidad del 30 %, provenientes del detector OMI, a bordo del satélite AURA. Las abundancias de  $\text{NO}_2$  se encuentran medidas en moléculas/ $\text{cm}^2$ . Se trabajó únicamente con los datos correspondientes al período y región delimitados.

Las series de datos fueron descargadas y trabajadas de manera individual para cada una de las regiones de trabajo propuestas (descritas previamente), así como para el territorio guatemalteco completo.

Durante el procesamiento de los datos se eliminaron los valores negativos, llevando a cabo una normalización de los mismos. Posteriormente se procedió a completar los datos para aquellas fechas en las cuales, por defecto de medición, no se tiene un valor de dato válido disponible. Este proceso se llevó a

cabo por medio de interpolación lineal.

Para llevar a cabo el análisis de las series temporales obtenidas a partir de OMI, los datos fueron descompuestos de manera que se generara información sobre sus componentes de periodicidad, tendencia, y estacionalidad.

Habiendo obtenido la duración de los ciclos principales, se procedió a establecer las tendencias y distribuciones en la abundancia de  $\text{NO}_2$ , para estos períodos.

El análisis de frecuencias de las series temporales se realizó por medio de la transformada rápida de Fourier.

Se obtuvo promedios anuales de la abundancia de  $\text{NO}_2$  sobre todo el territorio guatemalteco y para las tres regiones de estudio de forma individual, con el fin de analizar las tendencias, tanto para la época seca como para la época lluviosa.

Se elaboraron mapas con la distribución espacial de  $\text{NO}_2$  sobre todo el territorio guatemalteco, para determinar los puntos de generación/acumulación del gas.

Todo el tratamiento de datos se llevó a cabo empleando MATLAB 2022a (MathWorks, 2022).

### **III | RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

#### **1 | Periodicidad**

El primer aspecto analizado durante esta investigación fue la frecuencia con la cual se repiten los patrones de abundancia de  $\text{NO}_2$  dentro del área y período de estudio. Para esto se emplearon los 17 años de datos provenientes de OMI, se centró el análisis en aquellas periodicidades inferiores a un año. Se obtuvo dos períodos principales para la serie temporal estudiada, el primario de 364 días, correspondiendo con la periodicidad anual analizada; y el secundario de 182 días, que coincide con la duración de las épocas seca y lluviosa (estacionalidad) en Guatemala.

#### **2 | Tendencia temporal general de $\text{NO}_2$**

La figura 2a ilustra la tendencia en la serie temporal de promedios anuales de abundancia de  $\text{NO}_2$  a lo largo del período estudiado. La abundancia promedio de  $\text{NO}_2$  se ha reducido a lo largo del período de estudio, se advierte también una variabilidad significativa entre los promedios anuales.

Puede observarse una mayor claridad en la tendencia a la baja, hacia el final del período de estudio, a partir del año 2016 aproximadamente. Esta reducción puede estar relacionada con la variación en la matriz de generación eléctrica de Guatemala debido al incremento en la generación a partir de fuentes renovables (hidroeléctrica principalmente), y la incorporación al parque de generación eléctrica de nuevas tecnologías (solar-foto voltaica y eólica) que tiene lugar durante 2015 y que ha mantenido un crecimiento constante desde esa fecha, así como la reducción del uso de bunker para generación eléctrica (un 69% para el año 2019 en comparación con lo consumido durante 2016), debido al alza de los precios en el mercado internacional (CNEE, 2020).

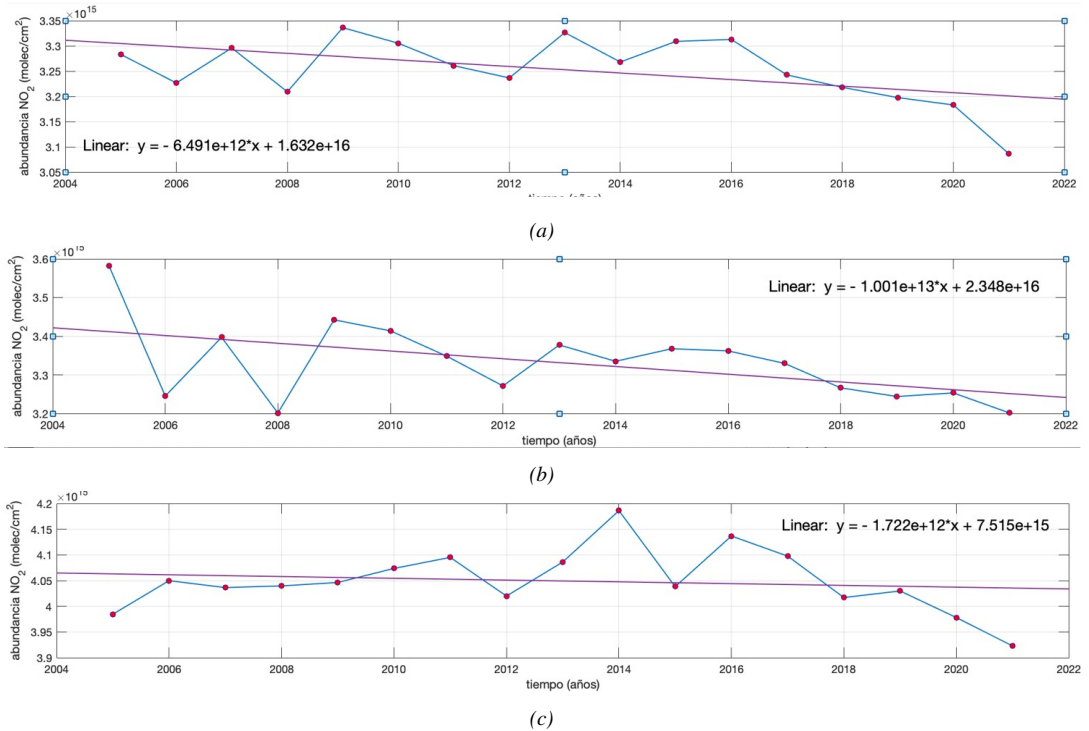


Figura 2: a. Abundancia media anual de  $\text{NO}_2$  y tendencia, para el territorio de Guatemala, entre 2005 y 2021; b. Abundancia media anual de  $\text{NO}_2$  y tendencia, para la época seca, para el territorio de Guatemala, entre 2005 y 2021; c. Abundancia media anual de  $\text{NO}_2$  y tendencia, para la época lluviosa, para el territorio de Guatemala, entre 2005 y 2021. **Fuente:** elaboración propia con Matlab.

El marcado decremento observable entre 2019 y 2021 podría estar relacionado con la reducción en la actividad industrial a nivel mundial, como consecuencia del COVID, ya que se sabe que hubo una reducción significativa, aunque temporal, en la abundancia de  $\text{NO}_2$  en la atmósfera a nivel global. (Rasmussen, 2021).

Al observar las tendencias en las series temporales correspondientes a la época seca (figura 2b) y la época lluviosa (figura 2c), se aprecia que, aunque la tendencia a la baja es muy similar, existe una mayor variabilidad en el promedio anual de abundancia de  $\text{NO}_2$  durante la época lluviosa, probablemente debido a la amplia variabilidad climática del país, que da lugar a épocas lluviosas con diferente duración y precipitación.

Esta variabilidad en el promedio anual de abundancia de  $\text{NO}_2$  no es significativa dentro de la tendencia general de la región de estudio, si se toma en cuenta que el rango de abundancia dentro de las cuales se mueven los promedios anuales durante el período estudiado es muy pequeño.

Cuando se realiza la separación del territorio guatemalteco en las tres regiones de estudio pueden observarse algunos comportamientos muy particulares de cada región.



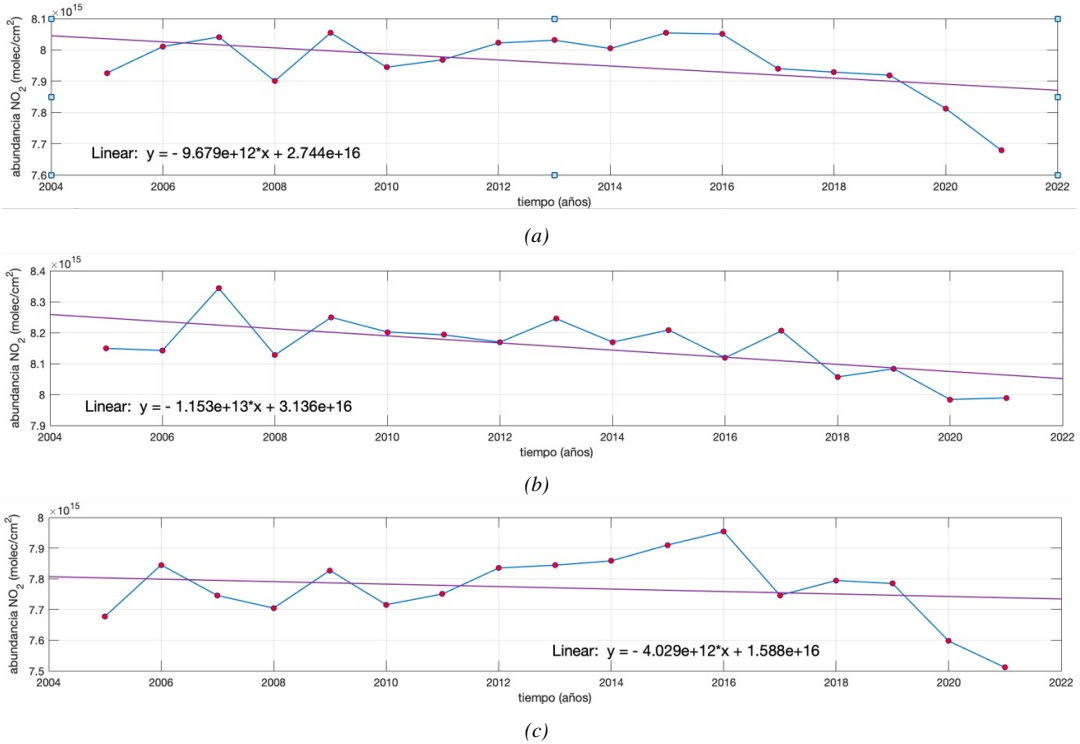


Figura 3: a. Abundancia media anual de  $\text{NO}_2$  y tendencia, para la región sur de Guatemala, entre 2005 y 2021; b. Abundancia media anual de  $\text{NO}_2$  y tendencia, para la región sur de Guatemala, durante la época seca, entre 2005 y 2021; c. Abundancia media anual de  $\text{NO}_2$  y tendencia, para la región sur de Guatemala, durante la época lluviosa, entre 2005 y 2021. **Fuente:** elaboración propia con Matlab.

### 3 | Región sur, tendencia temporal de $\text{NO}_2$

La figura 3a presenta la tendencia en la serie temporal de promedios anuales de abundancia de  $\text{NO}_2$  a lo largo del período estudiado, para la región sur, que corresponde a las tierras bajas y de costa, al sur de Guatemala.

Es destacable que, mientras las abundancias de  $\text{NO}_2$  para todo el territorio de Guatemala se encuentran, en promedio, alrededor de los  $3.0 \times 10^{15}$ - $3.35 \times 10^{15}$  moléculas/ $\text{cm}^2$  (figura 3a), en el caso de la región sur se encuentran entre  $7.65 \times 10^{15}$  y  $8.10 \times 10^{15}$  moléculas/ $\text{cm}^2$ . Esto indica claramente que existe mayor abundancia de  $\text{NO}_2$  sobre toda la región sur, que en el resto de país.

Esta diferencia en la cantidad de dióxido de nitrógeno disponible en la tropósfera se debe, en buena medida, a la concentración de actividades antropogénicas con emisiones de este gas, que tiene lugar en esta región (generación de energía eléctrica con combustibles fósiles e industria azucarera).

Puede observarse, una mayor abundancia de  $\text{NO}_2$  sobre la región, durante la temporada seca (figura 3b), al comparar contra la temporada lluviosa (figura 3c). Durante la temporada seca, se incrementa la generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles, al reducirse la capacidad de generación de las hidroeléctricas (Incyt, 2018) (CNEE, 2020). Es también en temporada seca que se lleva a cabo la

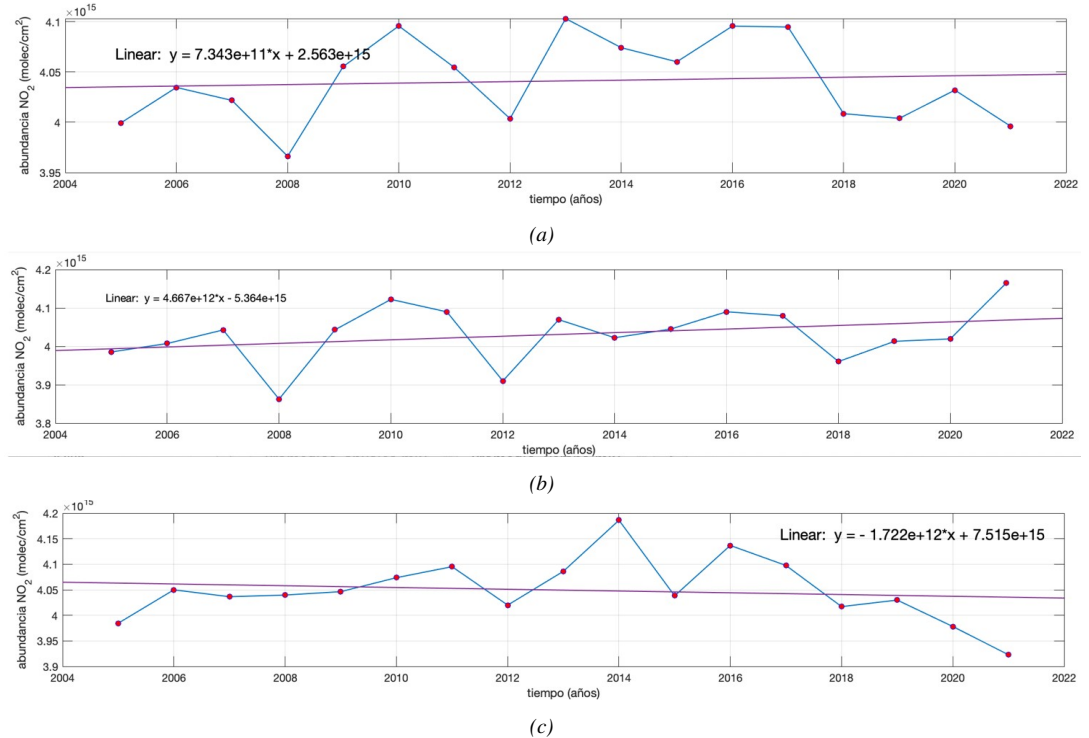


Figura 4: a. Abundancia media anual de  $\text{NO}_2$  y tendencia, para la región central de Guatemala, entre 2005 y 2021; b. Abundancia media anual de  $\text{NO}_2$  y tendencia, para la región central de Guatemala, durante la época seca, entre 2005 y 2021; c. Abundancia media anual de  $\text{NO}_2$  y tendencia, para la región central de Guatemala, durante la época lluviosa, entre 2005 y 2021. **Fuente:** elaboración propia con Matlab.

zafra y el empleo del bagazo de caña para cogeneración (CNEE, 2020) (Cengicaña, 2022) (SIB, 2011).

#### 4 | Región central, tendencia temporal de $\text{NO}_2$

La figura 4a presenta la tendencia en la serie temporal de promedios anuales de abundancia de  $\text{NO}_2$  a lo largo del período estudiado, para la región central. Como puede verse, la abundancia de  $\text{NO}_2$  se está incrementando, aunque muy lentamente. Al analizar por separado la temporada seca y la lluviosa, se observa que el incremento se mantiene durante la temporada seca, sin embargo, durante la temporada lluviosa la tendencia es a reducir la abundancia de  $\text{NO}_2$ .

Es posible que este incremento observado durante la temporada seca (que influencia el comportamiento anual general de la región) sea producto del desplazamiento de parte del  $\text{NO}_2$  generado en la región sur, provocado por la circulación natural de la atmósfera, sin embargo, es necesario realizar estudios mas completos sobre las emisiones y acumulaciones en esta zona, para determinar cual es el origen de este comportamiento.

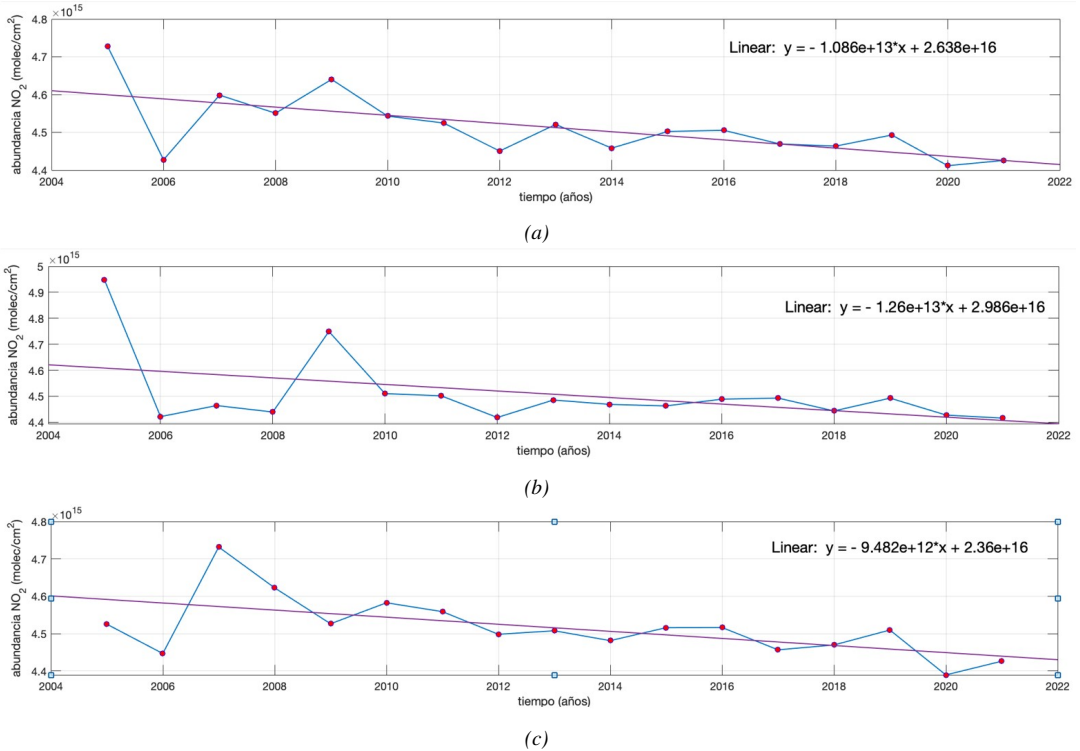


Figura 5: a. Abundancia media anual de  $\text{NO}_2$  y tendencia, para la región norte de Guatemala, entre 2005 y 2021; b. Abundancia media anual de  $\text{NO}_2$  y tendencia, para la región norte de Guatemala, durante la época seca, entre 2005 y 2021; c. Abundancia media anual de  $\text{NO}_2$  y tendencia, para la región norte de Guatemala, durante la época lluviosa, entre 2005 y 2021. **Fuente:** elaboración propia con Matlab.

## 5 | Región norte, tendencia temporal de $\text{NO}_2$

La figura 5a presenta la tendencia en la serie temporal de promedios anuales de abundancia de  $\text{NO}_2$  a lo largo del período estudiado, para la región norte, que corresponde a la región de Petén. Puede observarse que los rangos de abundancia de  $\text{NO}_2$  en esta región son muy similares a los existentes en la región central y muy similares también a los que se presentan al analizar el comportamiento del territorio guatemalteco completo, por lo que puede asumirse que estas dos regiones son representativas de las concentraciones de  $\text{NO}_2$  en el país, contrastando las elevadas emisiones de  $\text{NO}_2$  que tienen lugar en la región sur.

También se observa que los rangos entre los cuales se encuentran las abundancias de  $\text{NO}_2$  para la época seca (figura 5b) y la época lluviosa (figura 5c) son muy similares, por lo que, a pesar de ser una zona con alta incidencia de incendios durante la temporada seca (un aproximado de 251,569 hectáreas afectadas por el fuego entre 2001 y 2019) (NASA, 2022) (INAB, Instituto Nacional de Bosques, 2019) estos incendios no influyen de forma significativa en el promedio anual de la región.

Es posible que esto se deba a que la mayor parte de incendios se concentran principalmente en los

meses de marzo y abril (los meses más cálidos del año) y resultan casi inexistentes durante la época lluviosa y la porción fría de la época seca (NASA, 2022).

## 6 | Distribución espacial de NO<sub>2</sub>

La figura 6 muestra un mapa de la distribución espacial de NO<sub>2</sub> a lo largo de todo el período de estudio. Claramente puede apreciarse que existen dos zonas de generación/acumulación (hot spots en inglés) de NO<sub>2</sub> dentro del territorio guatemalteco.

La primera y más grande de estas regiones de generación/acumulación se encuentra al sur del país, (ubicándose la mayor abundancia de NO<sub>2</sub> entre los departamentos de Escuintla y Santa Rosa), extendiéndose por toda la costa del Pacífico desde la frontera con México hasta la frontera con El Salvador. Es en esta región donde se encuentran las principales fuentes de generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles (carbón y bunker), así como las principales cogeneradoras de energía eléctrica (a partir de biomasa). Esta región es también el área de cultivo de caña de azúcar. Ambas actividades económicas son fuente principal de emisiones de dióxido de nitrógeno (Incyt, 2018), permitiendo asumir entonces que la abundancia de NO<sub>2</sub> en la atmósfera, en esta región, está fuertemente influenciada por la actividad humana.

La segunda área de generación/acumulación de NO<sub>2</sub> corresponde la Chilascó, ubicada a 156.5 kilómetros de la capital, en dirección noreste, en el departamento de Baja Verapaz. Forma parte de la zona de amortiguamiento y zona núcleo de la Reserva de la Biósfera Sierra de las Minas. Es considerada una reserva Natural comunitaria (Fajardo, 2007) (SIC, 2022). Además de ser preservada como reserva de bosque nuboso, dedica aproximadamente un 2% de su superficie al cultivo de brócoli para exportación (Fajardo, 2007). Dado que en esta zona no existe mayor desarrollo urbano e industrialización, y que el uso que se da al suelo no presenta cantidades importantes de emisiones de NO<sub>2</sub>, se desconoce el origen de esta acumulación del gas sobre su tropósfera. Se requieren más estudios para determinar el origen del NO<sub>2</sub> y el motivo de su permanencia a lo largo de todo el año.

El resto del país no presenta más puntos de acumulación significativa de NO<sub>2</sub>, observándose una abundancia más bien baja del gas a lo largo de todo el año, independientemente de si es época lluviosa o seca (figura 7). Esto es consistente con el tipo de actividad antropogénica, el tipo de urbanización y la actividad industrial que se desarrollan en el resto del país, donde los suelos se utilizan principalmente para cultivos vegetales, cultivos de café, cardamomo, macadamia y ganadería, se encuentran sin uso específico o son conservados en forma de parques nacionales y biotopos protegidos (como sucede en la sub región norte, el departamento de Petén) (Fajardo, 2007). La urbanización en estas áreas, a excepción de la ciudad capital y sus alrededores, (donde el crecimiento urbano es constante y se centra la mayor parte de industria y transporte del país) se encuentra en lenta expansión, pues es más bien de tipo rural (Incyt, 2018) (CNEE, 2020).

La figura 7 muestra como es la distribución del NO<sub>2</sub> sobre el territorio guatemalteco durante la época seca y la época lluviosa, para los años 2005, 2013 y 2020 (como ejemplos de comportamiento típico).

Al analizar las distribuciones espaciales del NO<sub>2</sub> durante la época seca y la época lluviosa, se observa que los puntos de emisión/acumulación, son los mismos durante todo el año (la costa del Pacífico y

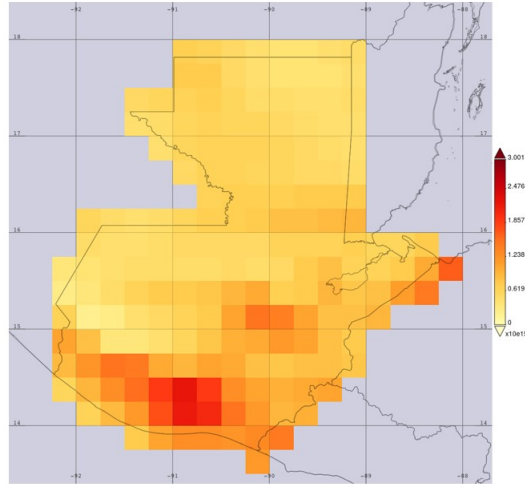


Figura 6: Distribución espacial de  $\text{NO}_2$ , en moléculas/ $\text{cm}^2$ , (2005-2021) para el territorio guatemalteco. Fuente: elaboración propia por medio de Giovanni (NASA, 2022b).

la reserva comunitaria de Chilascó), independientemente de la época. En estos puntos existe mayor abundancia de  $\text{NO}_2$  durante la época seca, coincidiendo con lo antes mencionado (los períodos de mayor funcionamiento de las industrias de generación eléctrica a partir de combustibles fósiles y azucarera).

Al analizar toda la información obtenida puede establecerse que, dentro del territorio guatemalteco, hasta el momento la abundancia de  $\text{NO}_2$  se encuentra principalmente influenciada por la variación climática estacional de la región. A pesar de que, de forma local, en la región de la costa del Pacífico, el  $\text{NO}_2$  se incrementa de forma importante para el país, debido a la actividad industrial de la zona.

Es importante notar que la quema estacional de biomasa que tiene lugar de forma regular, hacia fines de la época seca del país, aunque es intensa y extendida por toda la región Norte, no tiene impacto significativo en los promedios anuales de abundancia de  $\text{NO}_2$  sobre el territorio o incluso sobre la sub región, así como tampoco tiene impacto significativo en la distribución general del gas.

La importancia de este tipo de estudios es fundamental, dada la falta de información existente y la falta de recursos para llevar a cabo mediciones en superficie. Siendo indispensable contar con información para la toma de decisiones y el eventual desarrollo de políticas de regulación de emisiones por parte de la industria, siendo Guatemala un país en vías de desarrollo y con una creciente industria energética y azucarera que, eventualmente, puede llevar a la elevación significativa de la presencia del  $\text{NO}_2$  en la tropósfera de forma que altere la distribución espacial de toda la región.

#### IV | CONCLUSIONES

La abundancia del  $\text{NO}_2$  sobre todo el territorio guatemalteco se encuentra principalmente influenciada por la variación climática estacional de la región. Sin embargo, de forma general, la tendencia general

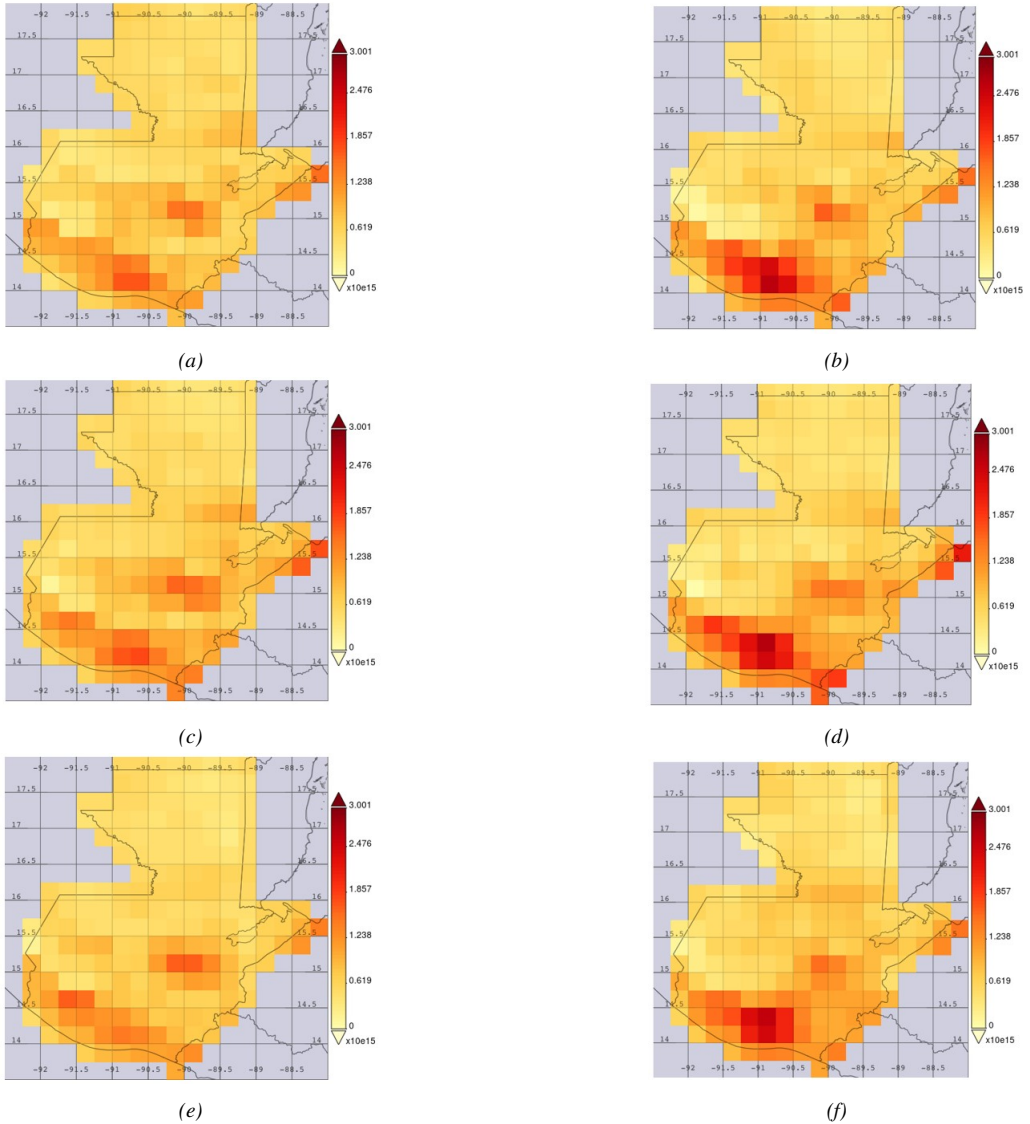


Figura 7: a. Distribución espacial de NO<sub>2</sub> sobre el territorio guatemalteco, durante la época lluviosa, para 2005; b. distribución espacial de NO<sub>2</sub> sobre el territorio guatemalteco, durante la época seca, para 2005; c. distribución espacial de NO<sub>2</sub> sobre el territorio guatemalteco, durante la época lluviosa, para 2013; d. distribución espacial de NO<sub>2</sub> sobre el territorio guatemalteco, durante la época seca, para 2013; e. distribución espacial de NO<sub>2</sub> sobre el territorio guatemalteco, durante la época lluviosa, para 2021; b. distribución espacial de NO<sub>2</sub> sobre el territorio guatemalteco, durante la época seca, para 2021. Fuente: elaboración propia con Giovanni (NASA, GES, 2022)

en la abundancia anual del gas sobre todo el territorio guatemalteco es a la reducción.

La mayor abundancia de NO<sub>2</sub> se presenta en la región sur del país y se encuentra altamente relacionada con la actividad industrial que se concentra en dicha zona. La distribución del dióxido de nitrógeno tiene un comportamiento estacional, incrementándose su abundancia durante la temporada seca y disminuyendo en la época lluviosa. Esta presencia elevada del gas no tiene influencia significativa en la distribución general de toda la región.

Existen dos puntos de generación/acumulación importante del país: la región de la costa del Pacífico y la Reserva de Chilascó. El resto del país presenta poca variación en la distribución de NO<sub>2</sub>.

No existe evidencia que indique que el NO<sub>2</sub> encontrado sobre la región de la Reserva de Chilascó es generado en ese punto o de origen antropogénico. Se requieren más estudios para establecer la fuente.

Los incendios forestales que tienen lugar en grandes cantidades durante el final de la temporada seca en la región norte del país, no tienen efecto significativo en la distribución anual o estacional del NO<sub>2</sub>.

## V | RECOMENDACIONES

1. Se sugiere llevar a cabo estudios mas profundos sobre el territorio de la Reserva de Chilascó, para determinar el origen de la abundancia de NO<sub>2</sub> en dicha zona.
2. Se sugiere llevar a cabo un estudio sobre la periodicidad de los datos en tiempos superiores al año, para determinar como influyen en la abundancia de NO<sub>2</sub> fenómenos climáticos como El Niño y La Niña, que tienen efecto sobre el territorio guatemalteco con periodicidades superiores a un año.
3. Se sugiere elaborar un estudio para determinar las emisiones de NO<sub>2</sub> provenientes de los numerosos incendios forestales que tienen lugar en a región de Petén para establecer el comportamiento específico (se sugiere un análisis mensual en lugar de anual) y el mecanismo de eliminación del gas en esa zona.

## I | REFERENCIAS

- Alfaro, G., y Gómez, R. (2019). *Antecedentes y contexto del cambio climático en Guatemala*. Editorial Universitaria UVG.
- Boersma, K. F., Jacob, D. J., Trainic, M., Rudich, Y., DeSmedt, I., Dirksen, R., y Eskes, H. J. (2009). Validation of urban no<sub>2</sub> concentrations and their diurnal and seasonal variations observed from the sciamachy and omi sensors using in situ surface measurements in israeli cities. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(12), 3867–3879. Descargado de <https://doi.org/10.5194/acp-9-3867-2009> doi:
- Castellanos, E. J., Paiz-Estevez, A., Bámaca, E., Rosales-Alconero, M., y Santizo, A. (2019). *Primer reporte de evaluación del conocimiento sobre cambio climático en Guatemala: Resumen para tomadores de decisión (n.o 1)*. Sistema Guatemalteco de Ciencias del Cambio Climático (SGCCC).
- Cengicaña. (2022). *Informe anual 2020-2021*.
- CNEE, C. N. d. E. E. (2020). *Gerencia de planificación y vigilancia de mercados eléctricos 2015-2019 [informe estadístico]*.
- 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. doi:
- David, L. M., y Nair, P. R. (2013). Tropospheric column o<sub>3</sub> and no<sub>2</sub> over the indian region observed by ozone monitoring instrument (omi): Seasonal changes and long-term trends. *Atmospheric Environment*, 65, 25–39. doi:

- Fajardo, J. A. (2007, febrero). *Centro ecoturístico las pozas de chilascó*. <https://aprende.guatemala.com/historia/geografia/salto-de-chilasco-baja-verapaz/>.
- Galán Madruga, D., y Fernández Patier, R. (2006). Implicación de los nox en la química atmosférica. *Revista Electrónica de Medioambiente UCM*.
- Google earth. (s.f.). [https://earth.google.com/web/search/Guatemala/@15.88458089,-89.95477676,343.28039165a,848226.47852764d,35y,0h,0t,0r/data=CigiJgokCZ9s7j69IUDNAEc5w032CTilAGW1D0xQ-zFTAic\\_u-ZfdC1jA](https://earth.google.com/web/search/Guatemala/@15.88458089,-89.95477676,343.28039165a,848226.47852764d,35y,0h,0t,0r/data=CigiJgokCZ9s7j69IUDNAEc5w032CTilAGW1D0xQ-zFTAic_u-ZfdC1jA). (Accedido en septiembre de 2022)
- Hilboll, A., Richter, A., y Burrows, J. P. (2013). Long-term changes of tropospheric NO<sub>2</sub> over megacities derived from multiple satellite instruments. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(8), 4145–4169. doi:
- Holzinger, R., Warneke, C., Hansel, A., Jordan, A., Lindinger, W., Scharffe, D. H., ... Crutzen, P. J. (1999). Biomass burning as a source of formaldehyde, acetaldehyde, methanol, acetone, acetonitrile, and hydrogen cyanide. *Geophysical Research Letters*, 26(8), 1161–1164. doi:
- INAB, Instituto Nacional de Bosques. (2019). *Anuario de estadísticas forestales de Guatemala 2019*.
- Incyt. (2018). *Perfil energético de Guatemala: Bases para el entendimiento del estado actual y tendencias de la energía*. Universidad Rafael Landívar; I.
- INSIVUMEH. (2020a, septiembre). *Calidad del aire [institucional]*. INSIVUMEH. Descargado de <http://hidromet.insivumeh.gob.gt/calidadaire/documentos.htm>
- INSIVUMEH. (2020b, septiembre). *Legislación [institucional]*. INSIVUMEH. Descargado de <http://hidromet.insivumeh.gob.gt/calidadaire/regulaciones.htm>
- Kramm, G., Dlugi, R., Dollard, G. J., Foken, T., Mölders, N., Müller, H., ... Sievering, H. (1995). On the dry deposition of ozone and reactive nitrogen species. *Atmospheric Environment*, 29(21), 3209–3231. doi:
- Krotkov, N., McLinden, C., Li, C., Lamsal, L., Celarier, E., Marchenko, S., ... Streets, D. (2016). Aura omi observations of regional SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> pollution changes from 2005 to 2015. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 4605–4629. doi:
- Lefohn, A. S., Malley, C. S., Smith, L., Wells, B., Hazucha, M., Simon, H., ... Gerosa, G. (2018). Tropospheric ozone assessment report: Global ozone metrics for climate change, human health, and crop/ecosystem research. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 6, 27. doi:
- Lelieveld, J., Beirle, S., Hörmann, C., Stenchikov, G., y Wagner, T. (2015). Abrupt recent trend changes in atmospheric nitrogen dioxide over the middle east. *Science Advances*, 1(7), e1500498. doi:
- Levelt, P., Oord, G. H. J., Dobber, M., Mälikki, A., Visser, H., Vries, J. d., ... Saari, H. (2006). The ozone monitoring instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(5), 1093–1101. doi:
- Majid, A., Val Martin, M., Lamsal, L. N., y Duncan, B. N. (2017). A decade of changes in nitrogen oxides over regions of oil and natural gas activity in the united states. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 5, 76. doi:
- MathWorks. (2022). MATLAB (versión 2022a) [Manual de software informático].
- NASA. (2022, febrero). *Fire Information for Resource Management System - FIRMS*. <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>.
- NASA, GES. (2022, septiembre). *NO<sub>2</sub> Tropospheric Column (30% Cloud Sreened) OMNO2d v003*. <https://giovanni.gsfc.nasa.gov>.
- Oliva, P., y Taracena, E. (2019). *Informe anual de la calidad del aire ciudad de Guatemala 2018*. Laboratorio de Monitoreo de la Calidad del Aire, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Peel, J. L., Haeuber, R., Garcia, V., Russell, A. G., y Neas, L. (2013). Impact of nitrogen and climate change interactions on ambient air pollution and human health. *Biogeochemistry*, 114(1-3), 121-134. doi:
- Rasmussen, C. (2021, 11). Las reducciones de emisiones por la pandemia tuvieron efectos esperados en la atmósfera. *Ciencia*. Descargado de <https://ciencia.nasa.gov/las-reducciones-de-emisiones-por-la-pandemia-tuvieron-efectos-inesperados-en-la-atmosfera> (Divulgación NASA)
- SIB, S. d. I. d. B. (2011). *Sector azucarero: Análisis de sectores económicos*.
- SIC, S. d. I. C. (2022, 20 de agosto). *Salto de chilascó*. [https://www.sicultura.gob.gt/directory-directorio\\_c/listing/salto-de-chilasco/](https://www.sicultura.gob.gt/directory-directorio_c/listing/salto-de-chilasco/).
- Sillman, S. (1999). The relation between ozone, nox and hydrocarbons in urban and polluted rural environments. *Atmospheric Environment*, 33(12), 1821–1845. doi:
- Suddick, E., y Davidson, E. (2012). *The role of nitrogen in climate change and impactos of nitrogen-climate*



*interactions on terrestria and aquatic ecosystems, agriculture and human health in the united states* (Inf. Téc.). North American Nitrogen Center of the International Nitrogen Initiative (NANC-INI), Woods Hole Research Center.

- ul Haq, Z., Tariq, S., y Ali, M. (2015). Tropospheric no<sub>2</sub> trends over south asia during the last decade (2004–2014) using omi data. *Advances in Meteorology*, 2015, 1–18. doi:
- van der A, R. J., Peters, D. H. M. U., Eskes, H., Boersma, K. F., Van Roozendaal, M., De Smedt, I., y Kelder, H. M. (2006). Detection of the trend and seasonal variation in tropospheric no<sub>2</sub> over china. *Journal of Geophysical Research*, 111(D12), D12317. doi:
- Wang, Z., Zheng, F., Zhang, W., y Wang, S. (2018). Analysis of so<sub>2</sub> pollution changes of beijing-tianjin-hebei region over china based on omi observations from 2006 to 2017. *Advances in Meteorology*, 2018, 1-15. doi: