



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE QUINTANA ROO



· Teoría y Praxis 33 · 2024 ·

· ISSN 1870 1582 · DOI 10.22403/UQROOMX/TyP33/08 ·



Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo
DESARROLLO SUSTENTABLE
DIVISIÓN ACADÉMICA

Caracterización espacial de la contaminación atmosférica en Tulum, Quintana Roo

Spatial characterization of air pollution in Tulum, Quintana Roo

Norma Angélica Oropeza García^{1*}

María Luisa Hernández Aguilar¹

Gerardo Daniel López Montejo¹

Bonnie Lucía Campos Cámara²

¹*División de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Chetumal, México*

²*División de Ciencias Políticas y Económicas, Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Chetumal, México*

*Autora de correspondencia: noropeza@uqroo.edu.mx

Editor encargado: Dr. Oscar Frausto Martínez

Editora invitada: Dra. Ana Cecilia Travieso Bello

Recibido: 19 de agosto de 2024 - Aceptado: 30 de septiembre de 2024

Resumen

Tulum, ubicado en el Caribe mexicano en el estado de Quintana Roo, es uno de los puntos turísticos con mayor auge económico en la actualidad y también un polo de desarrollo regional asociado a los proyectos impulsados por el gobierno mexicano, que incluyen el Tren Maya y el Aeropuerto Internacional de Tulum, así como la infraestructura asociada a los mismos. Sin embargo, en esta zona se presenta deforestación, incendios forestales, elevada generación de residuos sólidos, y su quema a cielo abierto, emisiones de vehículos propulsados por combustibles fósiles, entre otros, las cuales son causas del cambio climático y otras que son su consecuencia, como arribazones de sargazo a sus costas. La mayoría de estos impactos ambientales asociados al desarrollo regional son fácilmente perceptibles por los pobladores y turistas, pero la calidad del aire y el nivel de contaminación atmosférica no son tan evidentes. El presente trabajo tiene como objetivo mostrar los niveles de los contaminantes atmosféricos monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂), aerosoles y vapor de agua (H₂O) como gas de efecto invernadero, para el periodo 2018 a 2023 en el municipio de Tulum, obtenidos a partir de imágenes de satélite y herramientas de geoprocesamiento.

Palabras clave: Contaminación atmosférica, GYCEI, Cambio climático, Caribe mexicano

Abstract

Tulum, located in the Mexican Caribbean in the state of Quintana Roo, is one of the tourist spots with the greatest economic boom today and also a hub of regional development associated with projects promoted by the Mexican government that include the Mayan Train and the Tulum International Airport, as well as the infrastructure associated to them. However, this region presents deforestation, forest fires, high generation rates of solid wastes, and their open burning, emissions from vehicles powered by fossil fuels, among others, which are causes of climate change and others that are its consequence, like arrivals of sargassum on its shores. Most of these environmental impacts associated with regional development are easily perceptible by residents and tourists, but the quality of the air and the level of atmospheric pollution are not so evident. The objective of this work is to show the levels of atmospheric pollutants carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO₂), sulfur dioxide (SO₂), aerosols and water vapor (H₂O), for the period 2018-2023, in the municipality of Tulum, obtained from satellite images and geo-processing tools.

Keywords: Air pollution, GHG, Climate Change, Mexican Caribbean

Introducción

El turismo en México es uno de los pilares de crecimiento económico; a nivel nacional, Quintana Roo es el estado con mayor número de turistas recibidos y Tulum es uno de los atractivos turísticos más importantes del estado. En lengua maya, Tulum significa “muralla”. Fue nombrado pueblo mágico en 2015 y actualmente es uno de los cuatro pueblos mágicos de Quintana Roo. Un pueblo mágico tiene características propias del sitio que le dan una identidad nacional, entre las que se incluyen símbolos, leyendas o escenarios que fueron importantes para primeras culturas o a través del desarrollo histórico de México. En el caso de Tulum, el lugar es único pues cuenta con una zona arqueológica situada en la costa del Mar Caribe y para la cultura maya fue un puerto muy importante utilizado hace 1500 años; además, es la puerta de entrada a la Reserva de la Biosfera de Sian Ka’an declarado Patrimonio Mundial de la Humanidad por la UNESCO desde 1987 (SECTUR, 2020).

La ciudad de Tulum, ubicada en el Caribe Mexicano, es la de mayor crecimiento poblacional a nivel nacional debido a la gran cantidad de inmigrantes que son atraídos por el auge económico de la zona (INEGI, 2020). En Tulum, como en gran parte de América Latina y el Caribe, el cambio de uso de suelo y la deforestación, causados por los procesos de urbanización, son las principales causas de la fragmentación de los ecosistemas, así como de la degradación física y química del ambiente. De esta forma, la tala de selvas y humedales para la construcción de infraestructura turística, urbana y de transporte, libera el carbono almacenado, y por otro lado reduce la capacidad de estos ecosistemas para absorber las emisiones de la atmósfera al disminuir la cobertura vegetal. Aunado a esto, el incremento en la población y la demanda de servicios de una ciudad en crecimiento eleva la utilización de combustibles fósiles, y se emiten grandes cantidades de gases de efecto invernadero que actúan reteniendo el calor del sol en la tierra, contribuyendo al calentamiento global y al cambio climático (UN, 2022). Entre los principales gases y compuestos de efecto invernadero (GYCEI) se encuentran el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el ozono (O_3) troposférico, el óxido nitroso (N_2O) y los compuestos halogenados (CFC, HCFC, HFC, SF_6 y NF_3).

El presente artículo tiene como principal objetivo mostrar los niveles de los contaminantes atmosféricos monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2), aerosoles y vapor de agua (H_2O), por su potencial como gas de efecto invernadero, para el periodo 2018 a 2023 en el municipio de Tulum, obtenidos a partir de herramientas de geoprosesamiento mediante el uso de imágenes de satélite, la herramienta Google Earth y los programas SNAO, ArcMap y QGIS.

Marco teórico

La ciudad de Tulum cuenta con una población concentrada al interior; se observa claramente un crecimiento urbano expansivo como resultado de la migración atraída por las fuentes de trabajo generadas por el turismo en su modalidad de sol y playa, principal actividad económica en la ciudad; la densidad de población para la zona se estima en 27 hab/Ha. En la zona operan empresas transnacionales que detonan la expansión territorial y la competitividad con otros destinos llevando a un desarrollo inequitativo en términos de crecimiento económico al interior del municipio de Tulum.

El transporte de turistas, trabajadores y habitantes de la zona en Tulum se observa como parte del corredor que representa la carretera federal 307 y, como es bien sabido en la zona, la carretera es un detonador de crecimiento del corredor turístico de norte a sur partiendo del aeropuerto internacional de Cancún, punto de llegada de la mayor parte del turismo de la región. La autopista federal 307 es la única vía terrestre que conecta los distintos sitios turísticos con los poblados aledaños a Tulum.

Como consecuencia de este crecimiento económico y demográfico, la contaminación atmosférica en urbanizaciones costeras es un problema importante que afecta el ambiente y la salud humana. Por su localización y tipo de actividades económicas, estas zonas están expuestas a diversas fuentes de contaminación, como actividades turísticas, tráfico vehicular y actividades en puertos y marinas, entre otras. De forma general, los contaminantes atmosféricos pueden clasificarse en primarios y secundarios. Los contaminantes primarios son vertidos directamente a la atmósfera, mientras que los secundarios se forman como resultado de las reacciones químicas de los contaminantes primarios.

Entre las emisiones de gases contaminantes causadas por actividades humanas están las emisiones del tráfico vehicular, especialmente en ciudades con alta densidad de población y receptoras de turismo de masas, las cuales son una de las principales fuentes de NO_2 y CO (OMS, 2016). En el caso de las operaciones en puertos y la actividad industrial, se liberan grandes cantidades de SO_2 y material particulado ($\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10}) en el aire. En la literatura se ha documentado que los puertos contribuyen significativamente a la contaminación atmosférica en áreas urbanas costeras debido al uso de combustibles fósiles de baja calidad en los barcos (Eyring et al., 2010). En ciudades costeras, el turismo también contribuye a la contaminación del aire a través del aumento de la demanda de transporte y la generación de residuos (Gössling, 2013). Diferentes estudios en áreas urbanas costeras han demostrado una correlación directa entre la contaminación del aire y un incremento en las tasas de hospitalización por asma (Bell et al., 2014). Por otro lado, la deposición de contaminantes atmosféricos puede alterar los ecosistemas marinos afectando, por ejemplo, la salud de

los arrecifes de coral a través de la acidificación del agua y la introducción de nutrientes que provocan la eutrofización en ciudades costeras (Fabricius, 2011), ya que el aumento de las temperaturas favorece la formación de ozono troposférico, un contaminante que contribuye al calentamiento global y tiene efectos adversos sobre la salud (Jacob y Winner, 2009).

Contaminantes en la atmósfera: interacción e impactos al ambiente

Dióxido de nitrógeno (NO₂). El NO₂ es un gas contaminante que tiene varios efectos sobre el cambio climático, tanto directos como indirectos. El NO₂ juega un papel clave en la formación de ozono (O₃) a nivel del suelo (ozono troposférico), el O₃ es un gas de efecto invernadero. El ozono en la troposfera contribuye al calentamiento global al atrapar el calor en la atmósfera. Además, el NO₂ también contribuye a la formación de partículas finas (PM_{2.5}) en la atmósfera.

Dióxido de azufre (SO₂). Este contaminante es un gas que tiene efectos importantes en el cambio climático, aunque sus impactos son complejos y pueden ser tanto de

calentamiento como de enfriamiento. El SO₂ es un precursor de los aerosoles sulfatados, que son pequeñas partículas que reflejan la luz solar de vuelta al espacio. Esto tiene un efecto de enfriamiento en la atmósfera, ya que reduce la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre. Otro efecto del SO₂ es la modificación de las nubes, ya que los aerosoles sulfatados pueden actuar como núcleos de condensación de nubes, aumentando la reflectividad (albedo) de las nubes.

Monóxido de carbono (CO). Tiene efectos indirectos sobre el cambio climático, aunque no es un gas de efecto invernadero por sí mismo. El CO reacciona en la atmósfera con el radical hidroxilo (OH), que es el principal agente que oxida y elimina el metano (CH₄) de la atmósfera. El CO también juega un papel en la formación de ozono troposférico (a nivel del suelo), que es un gas de efecto invernadero. Al reaccionar con otros contaminantes en presencia de luz solar, el monóxido de carbono puede contribuir a la creación de ozono en la troposfera, aumentando así el efecto invernadero y el calentamiento global. La **Tabla 1** muestra los tipos de exposición para los contaminantes atmosféricos en apego a la normatividad mexicana.

Tabla 1. Contaminantes atmosféricos y normatividad aplicable

Contaminante	Dato base utilizado para la evaluación	Exposición	Frecuencia tolerada	Valor límite Indicador con el que se evalúa	Criterio de suficiencia anual	Norma Oficial Mexicana
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	Dato horario	Aguda	1 vez al año	0.210 ppm segundo máximo	----	NOM-023-SSA1-1993
Monóxido de carbono (CO)	Muestreo 24 h	Crónica	No se permite	1.5 µg/m ³ promedio trimestral	----	NOM-026-SSA-1993
Ozono (O ₃)	Dato horario	Aguda	No se permite	0.095 ppm máximo	Al menos 75 % de los datos horarios	NOM-020-SSA1-2014 (DOF, 2014)
	Promedios móviles de 8 h	Aguda	No se permite	0.070 ppm máximo	Al menos 75 % de los promedios móviles de 8 h	NOM-020-SSA1-2014
Dióxido de azufre (SO ₂)	Máximo diario	Aguda	1 % de veces al año	0.075 ppm promedio aritmético de 3 años consecutivos de los percentiles 99 anuales	Al menos 75 % de los datos diarios por trimestre de 3 años consecutivos	
	Promedio 24 h	Aguda	No se permite	0.04 ppm máximo de 3 años consecutivos	Al menos 75 % de los promedios de 24 h por trimestre o de los meses con concentraciones altas de 3 años consecutivos	NOM-022-SSA1-2019

Fuente: SINAICA, 2024

Metodología

Área de estudio

Tulum se localiza en el centro-norte de Quintana Roo (Figura 1), y forma parte de los 11 municipios del estado; al norte limita con el municipio de Solidaridad, al sur con el municipio de Felipe Carrillo Puerto, al este con los municipios de Solidaridad, Cozumel y Mar Caribe, y al oeste con el municipio de Felipe Carrillo Puerto y el estado de Yucatán. Cuenta con una población de 46 721 habitantes, de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2020 (INEGI, 2020). Su principal actividad económica es el turismo; entre sus principales atractivos turísticos están sus playas de arena blanca y sus ruinas arqueológicas; por número de turistas que recibe ocupa el tercer lugar a nivel nacional.

Figura 1. Área de estudio



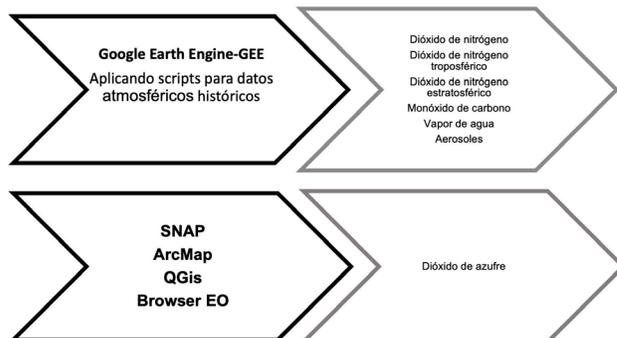
Geoprocesamiento

Se generaron mapas de contaminación del aire en Tulum usando imágenes del satélite Sentinel-5P

y su sensor TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) y Google Earth Engine a partir de la combinación de varias imágenes de satélite de su catálogo.

Se emplearon dos procesos metodológicos (Figura 2). El primer proceso se realizó en Google Earth Engine, donde, mediante scripts (códigos de programas), se accedió a datos atmosféricos históricos (2018-2023). Se descargaron secuencias temporales de CO, indicadores de aerosoles y NO₂ troposférico, estratosférico y total, con una resolución aproximada de 1 km (0.01 arc sec). Estos datos fueron adaptados al área de estudio, reproyectados a UTM Zona 16N y transformados a un tamaño de celda de 90 metros.

Figura 2. Secuencia metodológica de geoprocesamiento



Las unidades de medida para cada variable responden:

- Dióxido de nitrógeno (NO₂): mol/m²
- Dióxido de nitrógeno troposférico (NO₂): mol/m²
- Dióxido de nitrógeno estratosférico (NO₂): mol/m²
- Monóxido de carbono (CO): mol/m²
- Vapor de agua (H₂O): mol/m²
- Aerosol: media de prevalencia de aerosoles en la atmósfera

Adicionalmente, se aplicaron técnicas de geoprocesamiento utilizando los programas SNAP (Sentinel Application Platform), con el cual se realizó:

- 1) Corrección atmosférica: para eliminar interferencias causadas por partículas atmosféricas y mejorar la calidad de los datos.
- 2) Corrección geométrica: para garantizar que las imágenes coincidan con la geografía del área de estudio.
- 3) Extracción de bandas específicas: el sensor TROPOMI genera datos multiespectrales. Se extraen las bandas relacionadas con los contaminantes atmosféricos de interés.

Una vez procesados los datos satelitales en SNAP, estos se integran en herramientas de Sistemas de Información

Geográfica (SIG) como ArcMap y QGIS, complementadas con el uso del EO Browser (<https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>), que permite visualizar imágenes de la serie de satélites Sentinel. A través de este enfoque, se generó el último mapa de dióxido de azufre (SO₂).

Resultados y discusión

Con GEE y el sensor TROPOMI/Sentinel5p (ESA) se obtuvieron los mapas de gases contaminantes para el municipio de Tulum, cada uno para los elementos mencionados anteriormente y con una temporalidad de análisis de 5 años (2018 a 2023).

Presencia de NO₂

La **Figura 3** muestra los mapas correspondientes a las concentraciones de NO₂ troposférico (**3a**), estratosférico (**3b**) y total (**3c**) expresado en unidades de $\mu\text{mol}/\text{m}^2$. Como puede observarse en la troposfera, capa que abarca los primeros 15 km de la atmósfera más cercana a la tierra, los niveles de NO₂ van de 7.5 a 11.1 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$. En la estratósfera que es la siguiente capa y tiene un espesor de aproximadamente 30 km, los valores van de 40.14 a 40.43 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ y el intervalo de NO₂ promedio va de 48 a 52 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$.

El NO₂ troposférico es un contaminante que tiene efectos significativos en la salud humana y el medio ambiente, en donde, al reaccionar con otros contaminantes, afecta la calidad del aire. Desde el punto de vista ambiental, el NO₂ contribuye a la formación de ácido nítrico en la atmósfera,

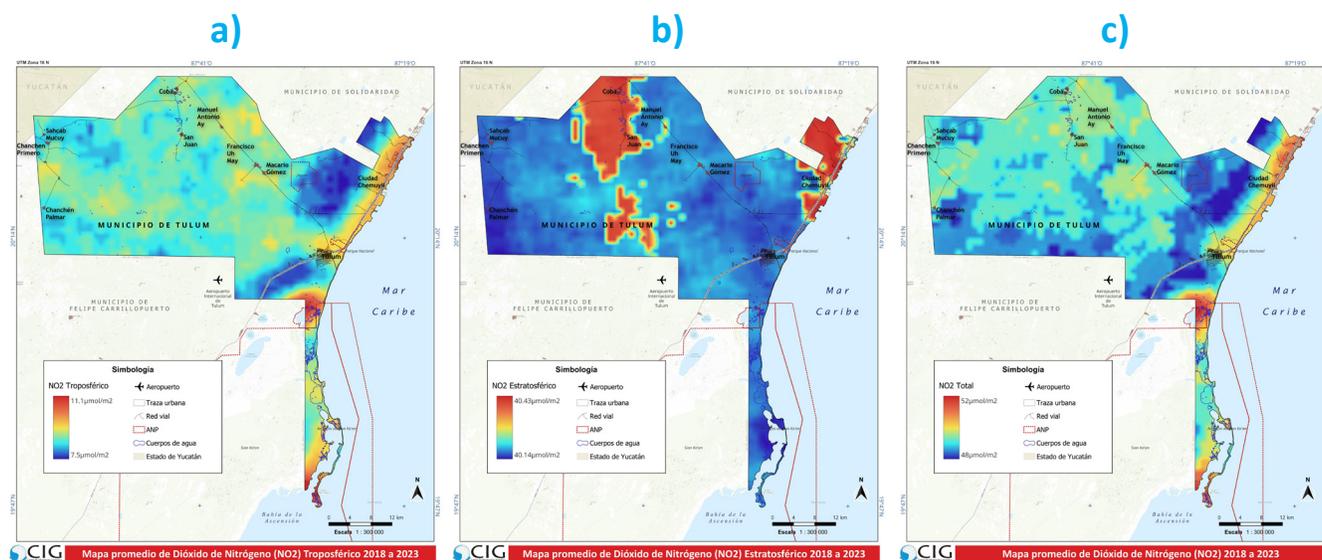
el cual es precursor de la lluvia ácida que afecta el suelo, los cuerpos de agua, la vegetación y los monumentos históricos.

Por lo que respecta a la salud humana, la exposición a NO₂ puede causar inflamación de vías respiratorias y las exposiciones por largos periodos de tiempo están asociadas con un mayor riesgo de enfermedades respiratorias crónicas (OMS, 2021). Las exposiciones a niveles elevados de NO₂ se han relacionado también con un mayor riesgo de enfermedades cardiovasculares, hipertensión y enfermedades coronarias (EPA, 2022).

A nivel de la troposfera el NO₂ reacciona con la luz solar y se descompone dando lugar al monóxido de nitrógeno (NO) y al oxígeno atómico (O) que participa en diferentes reacciones que dan lugar a la formación de ozono troposférico (O₃) (Seinfeld y Pandis, 2016). Además, el NO₂ reacciona con los hidrocarburos presentes en la atmósfera y forma el smog fotoquímico (Jacob, 1999). En la estratosfera, el NO₂ lleva a la destrucción del O₃, lo cual genera la destrucción de la capa de ozono, que permite la filtración de la radiación ultravioleta (UV), dañina para la vida en la tierra (OMS, 2022).

Por lo que respecta a los valores de contaminantes expresados en términos de $\mu\text{mol}/\text{m}^2$, en la literatura se reportan valores superiores a 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ como valores altos de concentración de NO_x (García y Lanfri, 2022). En este caso los valores más elevados se observan en la **Figura 3c**, que muestra datos para el NO₂ total promedio en un intervalo de 48 a 52 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ muy por debajo de lo considerado como elevado. Otro aspecto importante que señalar son los valores más altos cercanos a la costa y en la parte sur, en donde se conoce de la presencia de manglares que forman parte del

Figura 3. Distribución de NO₂: (a) Troposférica, (b) estratosférica y (c) promedio



Fuente: Atlas de Riesgo del Municipio de Tulum, 2023

área protegida Biosfera de Sian Ka'an, mientras que los valores más bajos se observan al interior del municipio.

Por otro lado, la presencia de dióxido de nitrógeno en humedales puede estar relacionada con varios procesos naturales y antropogénicos como son: la descomposición microbiana de materia orgánica y la elevada actividad microbiana, otra causa puede ser el uso de fertilizantes en tierras de cultivo aledañas a los humedales (Galloway et al., 2003). Este tipo de ecosistemas son ricos en materia orgánica y debido a sus condiciones anóxicas o de baja concentración de oxígeno, la descomposición microbiana produce óxidos de nitrógeno (NO_x) incluyendo NO₂, a través de los procesos de nitrificación y desnitrificación (Davidson y Seitzinger, 2006).

Presencia de CO y vapor de agua

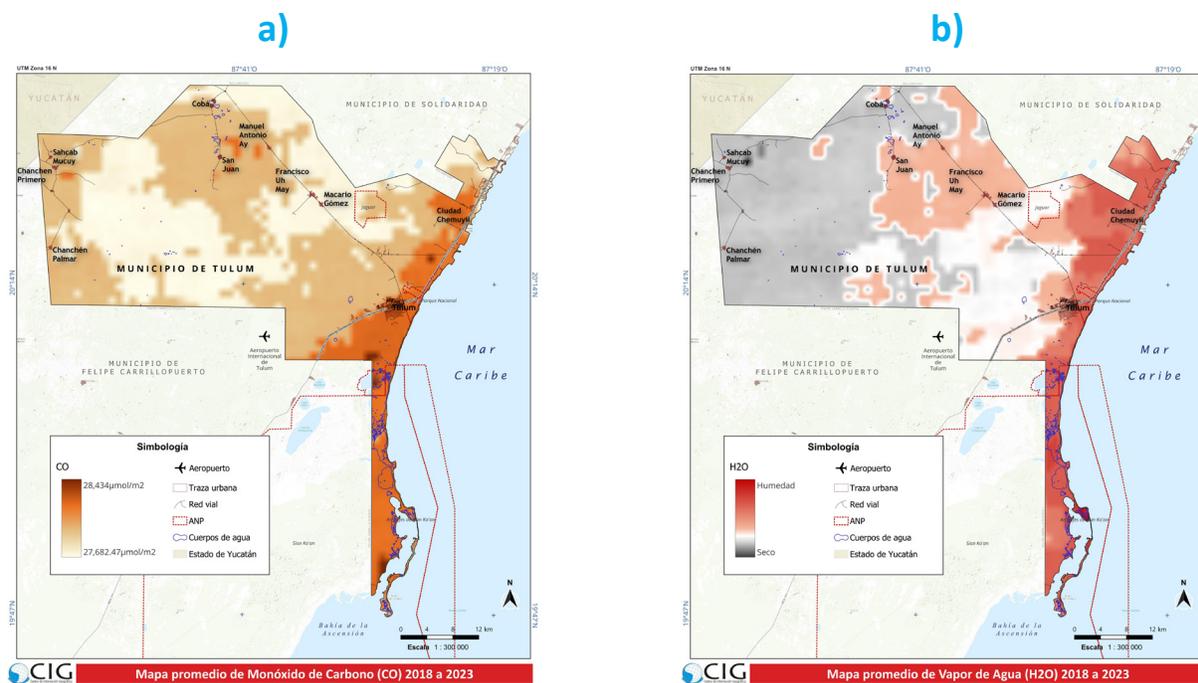
La distribución del monóxido de carbono y vapor de agua se muestran en las **Figuras 4a y 4b**, respectivamente. Si bien el CO no es considerado un gas de efecto invernadero su presencia en la atmósfera afecta los niveles de ozono y de metano, ambos considerados potentes GYCEI. El CO reacciona con los radicales hidroxilos (OH); este radical se forma al reaccionar la luz UV con el vapor de agua y el ozono en la atmósfera baja (Meteored, 2024), a nivel de la troposfera el OH es el oxidante natural más importante, conocido también como “detergente de la atmósfera”, ya

que permite la depuración de esta al reaccionar con muchos contaminantes y juega un papel muy importante en la eliminación de CO₂ y CH₄ (Airtècnics, 2024). Debido a la alta incidencia de radiación solar y los elevados niveles de vapor de agua presentes en los trópicos se ha sugerido que estas zonas son importantes generadoras de iones OH. Las emisiones de CO provienen principalmente de la quema de combustibles fósiles y biomasa, y a nivel atmosférico de la oxidación del metano y otros hidrocarburos.

De lo observado en la **Figura 4a**, el CO se distribuye a lo largo de la línea de costa de la localidad de Tulum y sobre la carretera 307, posiblemente como resultado de la combustión incompleta de hidrocarburos emitidos por vehículos automotores; otra fuente importante son los aparatos domésticos, como estufas, hornos y calentadores presentes en el sector hotelero y la quema de la biomasa por incendios forestales. Los niveles más elevados de CO, 28 434 µm/m², se observan al este del municipio, en donde la concentración de actividades humanas se concentra también.

El vapor de agua (H₂O), mostrado en la **Figura 4b**, es el más abundante en la tierra y no es considerado un contaminante; sin embargo, el vapor de agua es un gas de efecto invernadero que se encuentra principalmente en la troposfera. Las concentraciones más elevadas de vapor de agua se producen por procesos naturales, como la

Figura 4. Distribución de: (a) CO y (b) vapor de agua



Fuente: Atlas de Riesgo del Municipio de Tulum, 2023

fotosíntesis, y principalmente por evaporación de mares y océanos, particularmente en la zona intertropical (entre el trópico de Cáncer y el de Capricornio, quedando a la mitad el ecuador), zona geográfica en donde se localiza Tulum. La **Figura 4b** muestra que los niveles elevados de vapor de agua se encuentran cercanos a la costa, como consecuencia de la evaporación del agua de mar.

Presencia de aerosoles y SO₂

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2022), los aerosoles son partículas sólidas o líquidas que se encuentran suspendidas en el medio gaseoso y pueden permanecer así por al menos una hora, el tamaño de estas partículas oscila entre los 0.002 y 1000 µm. Los aerosoles presentes en la atmósfera pueden ser de origen primario o secundario y derivados de actividades humanas o de origen natural. Los de origen natural pueden ser marinos, minerales, volcánicos, biogénicos o cósmicos, mientras que los de origen antropogénico pueden provenir de fuentes como polvo vehicular, pulverización de carbón o roca, transporte y disposición de residuos, combustión, pinturas, imprentas, incineradores, superficies calientes, entre otras.

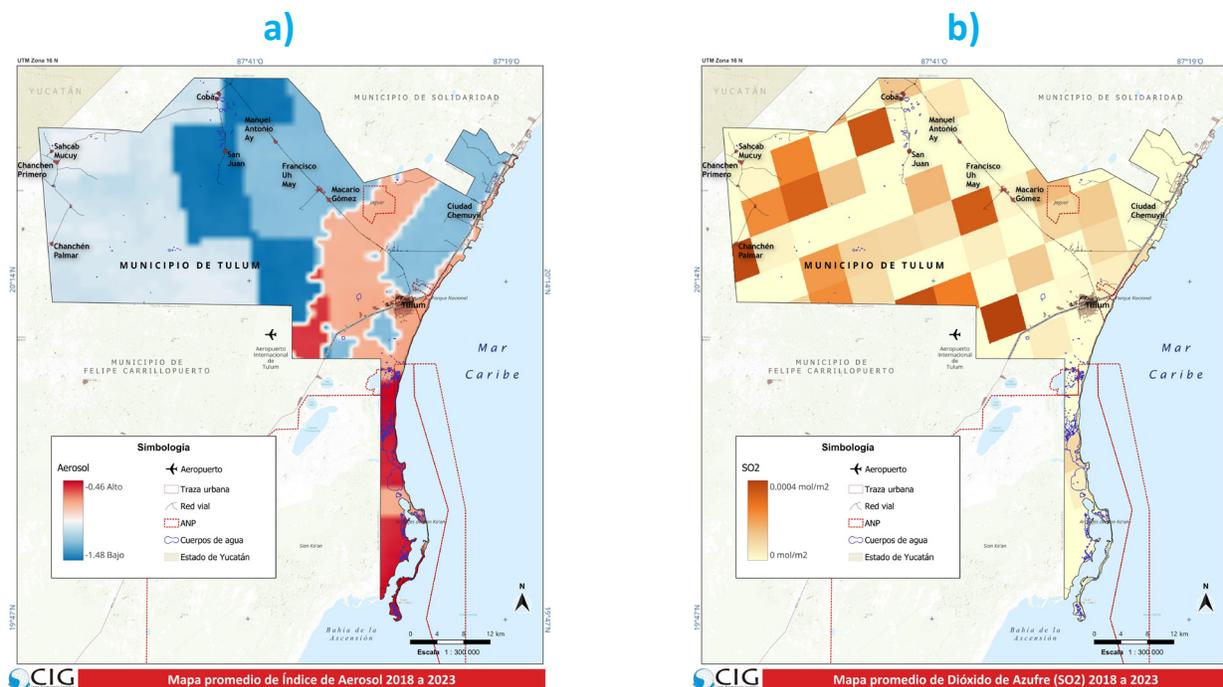
Los valores de aerosoles observados en el municipio de Tulum (**Figura 5a**) para este tipo de partículas fueron negativos; en términos de índice de aerosol, los niveles más

altos de aerosoles se observan al sur del municipio hacia Punta Allen, en la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an, zona con grandes áreas cubiertas de humedales, por lo que la presencia de aerosoles en esta parte del municipio podría atribuirse a la generación de aerosoles de tipo biológico que pueden incluir: granos de polen, esporas de hongos, algas, quistes de dinoflagelados producidos por algas unicelulares, así como bacterias y virus; estas gotitas de aerosol pueden ser transportadas por las corrientes de aire a grandes distancias, y en su trayecto pueden actuar como núcleos de condensación o glaciológicos, modificando el ciclo hidrológico y el clima (Pérez et al., 2020).

Otra región en la que se observa presencia de aerosoles es la indicada en color rosa pálido, localizada en la ciudad de Tulum y a lo largo de la carretera 307, lo que puede estar asociado a la presencia de aerosoles de tipo antropogénico emitidos durante el desarrollo de las actividades humanas presentes en la zona con áreas no pavimentadas, quema de combustibles fósiles, quema de residuos sólidos, entre otros.

El SO₂ es emitido principalmente durante la quema de combustibles fósiles, como gasolina, carbón y gas natural; en la atmósfera el SO₂ se combina con el vapor de agua, formando la lluvia ácida por la presencia de ácido sulfúrico (H₂SO₄), lo cual puede tener repercusiones en los ecosistemas acuáticos, en los suelos y en los monumentos históricos.

Figura 5. Distribución de: (a) aerosoles y (b) dióxido de azufre (SO₂)



Fuente: Elaboración propia con base en el Atlas de Riesgo del Municipio de Tulum, 2023

Los valores observados para el dióxido de azufre en el municipio de Tulum son muy bajos: 0.004 mol/m³. La zona no cuenta con plantas generadoras de energía a partir de la quema de carbón o petróleo, ni tampoco con refinerías de petróleo, actividades que generan grandes cantidades de SO₂, por lo que la distribución observada al sur del territorio, en zonas con poca actividad humana, pueden deberse a degradación anaerobia de materia orgánica que contiene azufre, como el sargazo, y su integración en el ciclo biogeoquímico del mismo elemento.

Conclusiones

Derivado de la urbanización del municipio de Tulum, se observó la presencia de contaminantes atmosféricos con diferentes niveles de distribución. Por su nivel de abundancia, de mayor a menor, se encontró el monóxido de carbono, 28 434 μmol/m³; el dióxido de nitrógeno promedio, 40.14 a 40.43 μmol/m³, y el dióxido de azufre, 0.004 mol/m³. En cuanto a las concentraciones de CO y NO₂, los niveles más altos se encontraron en la línea de costa, al este del municipio, y prácticamente sobre la carretera 307. En esta zona es en donde se presenta el mayor crecimiento de la actividad turística, transporte y asentamientos humanos derivados del crecimiento y urbanización de la región.

Respecto de la presencia de agua en forma de vapor, las distribuciones más elevadas se observaron a lo largo de la línea de costa, como es de esperarse, debido a la evaporación del agua de mar. Un comportamiento similar se observó para la presencia de aerosoles sobre la carretera, la cual corre de forma paralela a la línea de costa, y hasta donde los aerosoles oceánicos, junto con los aerosoles formados por actividades humanas, pueden sumarse. Un punto que llama la atención es la presencia de aerosoles al sur del municipio, hacia Punta Allen, en la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an, lo cual puede atribuirse a la formación de aerosoles biogénicos de la zona de humedales dentro de la reserva.

Al ser de Tulum, un municipio en pleno crecimiento y urbanización, es importante la implementación de medidas de mitigación y adaptación al cambio climático. Entre estas medidas, las más importantes a considerar son el uso de tecnología con mayor eficiencia energética, la utilización de energías renovables en las actividades turísticas y la implementación de transporte con menores emisiones, como podría ser vehículos eléctricos (comenzando por el transporte público). Otra alternativa que podría revisarse es la participación en mercados de emisiones por captura de carbono para las zonas del municipio que aún conservan cobertura vegetal o bien que se encuentran dentro de la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an.

La exploración de nuevas tecnologías, como los procesos de oxidación avanzada, por ejemplo, la fotocatalisis,

debe ser tomada en cuenta dentro de las políticas ambientales. Una de las características de la zona intertropical en la que se encuentra Tulum es la alta incidencia de radiación solar, por lo que la aplicación de películas fotocatalíticas en azoteas, aeropuertos, edificios y carreteras permitiría reducir los niveles de NO_x, SO_x y compuestos orgánicos volátiles. Sin embargo, además de los altos niveles de radiación UV, es importante tomar en cuenta la velocidad del viento, la temperatura y la humedad en el ambiente, estos dos últimos factores son favorables en la región de Tulum.

Referencias

- Airtécnicos. (2024). *Air Desinfection*. Recuperado de <https://www.airtecnicos.com/es/tecnologia/tecnologia-de-radicales-hidroxilos#:~:text=E1%20radical%20hidroxilo%20OH:%20es,proceso%20de%20depuraci%C3%B3n%20de%20%C3%A9stos> (Consultado en agosto de 2024).
- Davidson, E. A., & Seitzinger, S. (2006). The enigma of progress in denitrification research. *Ecological Applications*, 16(6), 2057-2063. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[2057:TEOPID\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[2057:TEOPID]2.0.CO;2)
- Environmental Protection Agency (EPA). (2022). *Health and environmental effects of nitrogen dioxide*. <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2#effects>
- Galloway, J. N., Aber, J. D., Erisman, J. W., Seitzinger, S. P., Howarth, R. W., Cowling, E. B., et al. (2003). The nitrogen cascade. *BioScience*, 53(4), 341-356. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0341:TNC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0341:TNC]2.0.CO;2)
- García, M. & Lanfri, M. (2020). *Promedio mensual de la columna troposférica de NO₂ TROPOMI/Sentinel5p*. Gerencia de Vinculación Tecnológica. Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE). Versión: 2.0. Argentina. Recuperado de: https://documentoside.conae.gov.ar/public/docs/prd/sen5p/tropomi/no2m/20200326_GVT_S5U_UEAT_GE_v02_002_CONAE_TROPOMI_NO2.pdf
- H. Ayuntamiento de Tulum. (2023). *Atlas de riesgo del Municipio de Tulum*. <https://tulum.gob.mx/inciso-p/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). *Climate change 2013: The physical science basis*. Cambridge University Press.
- Jacob, D. J. (1999). *Introduction to atmospheric chemistry*. Princeton University Press.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html#Datos_abiertos
- Magrin, G. (2015). *Adaptación al cambio climático en América Latina y el Caribe* (Documentos de Proyectos 39842). Naciones Unidas. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Meteored. (2024). *El tiempo*. Recuperado de: <https://www.tiempo.com/ram/486041/el-radical-hidroxilo-oh-se-recicla-en-la-atmosfera/> (Consultado en agosto de 2024).
- Organization Mundial de la Salud (OMS). (2022). *Radiación ultravioleta*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ultraviolet-radiation>

- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2021). *Ambient (outdoor) air pollution*. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2016). *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241511353>
- Primagas. (2024). *Gases de efecto invernadero (GEI)*. Recuperado de: <https://www.primagas.es/blog/gases-de-efecto-invernadero-gei#:~:text=Los%20Gases%20de%20Efecto%20Invernadero%2C%20comúnmente%20abreviados%20como%20GEI%2C%20son,el%20calor%20en%20la%20atmósfera.>
- Reddy, K. R., & DeLaune, R. D. (2008). *Biogeochemistry of wetlands: Science and applications*. CRC Press.
- Secretaría de Turismo (SECTUR). (2020). Recuperado de: <https://www.gob.mx/sectur/articulos/pueblos-magicos-206528>
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA). (2024). Recuperado de: <https://sinaica.inecc.gob.mx/pags/noms.php>
- Smith, V. H. (2003). Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems: A global problem. *Environmental Science and Pollution Research*, 10(2), 126-139.
- United Nations (UN). (2022). *Naciones Unidas por el Clima*. Recuperado de: <https://www.un.org/es/climatechange/science/key-findings#physical-science>

