AvaCient ISSN 2992-8567
Año 3, Vol. V, Núm. 1, Enero Junio 2025 pp. 33-42

Uso de imágenes de satélite para la representación cartográfica de contaminantes en Tulum, Quintana Roo

Norma Angélica Oropeza-García[1], María Luisa Hernández-Aguilar [2], Gerardo Daniel López-Montejo [3], Bonnie Lucía Campos-Cámara [4]

Artículo de investigación científica
Recibido: 01/12/2024 Aceptado: 06/02/2025
https://doi.org/10.69823/avacient.v5n1a4

Resumen.- Debido a su éxito económico, la ciudad de Tulum presenta la de mayor tasa de crecimiento demográfico en México, y en consecuencia una expansión urbana desordenada. Como resultado de la rápida ocupación del suelo por el desarrollo de infraestructura turística, urbana y de transporte, se observa en la zona la eliminación de selvas y humedales y un incremento en la demanda de servicios para habitantes y turistas, que se refleja en un mayor consumo de combustibles fósiles y, a su vez, en la emisión de gases y compuestos de efecto invernadero (GyCEI). En este contexto, el objetivo del presente trabajo es evidenciar los niveles de los contaminantes atmosféricos Metano (CH_4), Ozono (O_3) y Formaldehído (CH_2O), entre 2018 y 2023 en el municipio de Tulum, mediante el geo-procesamiento de imágenes de satélite con la herramienta *Google Earth* y los programas *SNAP*, *ArcMap* y *QGIS*. El contaminante observado en mayor cantidad es el metano, seguido del ozono y finalmente el formaldehído. Al respecto es importante considerar que, compuestos como el metano, y otros hidrocarburos reaccionan con radicales hidroxilos (^{-}OH) generados por la elevada radiación solar característica de la zona. Estas reacciones dan lugar a la formación de compuestos intermedios como formaldehído.

Palabras Clave: GyCEI, atmósfera, metano, ozono, zona costera.

USE OF SATELLITE IMAGES FOR THE CARTOGRAPHIC REPRESENTATION OF POLLUTANTS IN TULUM, QUINTANA ROO

Abstract.- Due to its economic success, the city of Tulum has the highest population growth rate in Mexico, which has led to uncontrolled urban expansion. As a result of the rapid occupation of land by the development of tourist, urban and transportation infrastructure, the elimination of jungles and wetlands is observed in the area and an increase in the demand for services for inhabitants and tourists, which is reflected in a greater consumption of fossil fuels, and in turn a greater release of greenhouse gases (GHG). In this context, the objective of this work is to make evident the levels of atmospheric pollutants methane (CH_4), ozone (O_3) and formaldehyde (CH_2O) between 2018-2023 in the municipality of Tulum through the geo-processing of satellite images with the Google Earth tool and the SNAP, ArcMap and QGIS programs. The pollutant observed in greatest quantity is methane, followed by ozone and finally formaldehyde. In this regard, it is important to consider that compounds such as methane, and other hydrocarbons react with hydroxyl radicals (-OH) generated by the high solar radiation characteristic of the area. These reactions lead to the formation of intermediate compounds such as formaldehyde.

Keywords*:* GHG, atmosphere, methane, ozone, coastal zone.

Introducción

Tulum, una ciudad situada en el Caribe Mexicano, se destaca por ser la de mayor tasa de crecimiento demográfico en el país; la expansión desordenada en esta ciudad es impulsada en gran medida por la llegada de numerosos inmigrantes atraídos por el auge económico de la región (SECTUR, 2020; INEGI, 2020). Al igual que en muchas zonas costeras de América Latina y el Caribe, el cambio de uso del suelo y la deforestación asociados a la urbanización representan las principales amenazas para los ecosistemas, generando la fragmentación de los mismos, y la degradación ambiental. En este contexto, la eliminación de selvas y humedales para ocupar el suelo con infraestructura turística, urbana y de

[1] División de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Chetumal, México. https://orcid.org/0000-0003-2667-3302 noropeza@uqroo.edu.mx (**Autor corresponsal**).
[2] División de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Chetumal, México. https://orcid.org/0000-0002-7699-9418 malu@uqroo.edu.mx
[3] División de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Chetumal, México. https://orcid.org/0000-0001-8841-7289 lmontejo@uqroo.edu.mx
[4] División de Ciencias Políticas y Económicas, Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Chetumal, México. https://orcid.org/0000-0003-0863-1774 bonnie@uqroo.edu.mx

AvaCient ISSN 2992-8567
Año 3, Vol. V, Núm. 1, Enero Junio 2025 pp. 33-42

transporte, no sólo libera el carbono almacenado en estos ecosistemas (Reddy y DeLaune, 2008), sino que también reduce su capacidad para absorber las emisiones atmosféricas al disminuir la vegetación. Como resultado de esta rápida urbanización, se observa también la creciente demanda de servicios requeridos por habitantes y turistas, así como un incremento en el consumo de combustibles fósiles, lo que eleva significativamente las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero entre los que se encuentran (SINAICA, 2024; UN, s. f.): dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), ozono (O_3), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), compuestos orgánicos volátiles (COVs), etc.

Por otro lado, la ciudad de Tulum está ubicada en la zona intertropical, al igual que muchas otras ciudades en el mundo está, por tanto, expuesta a los efectos asociados al cambio climático (IPCC, 2014; Magrin, 2015), derivado en gran parte por la contaminación atmosférica. Entre las afectaciones a este tipo de ciudades se encuentran el aumento del nivel del mar, la erosión costera, y la intensificación de fenómenos extremos que afectan tanto a los ecosistemas como a las comunidades humanas. A continuación, se explican brevemente los principales impactos a ciudades costeras situadas en la zona intertropical:

- Aumento del nivel del mar: En escenarios de altas emisiones, se proyecta que grandes extensiones de tierra costera quedarán sumergidas para finales de siglo, afectando ciudades como Guayaquil, Barranquilla y Santos. Esto amenaza a millones de personas con desplazamiento y pérdida de infraestructuras esenciales (Estrada-Porrúa *et al.*, 2023).
- Erosión costera: La pérdida de playas y ecosistemas costeros debido a la erosión genera impactos ecológicos y económicos, exacerbados por tormentas más intensas y frecuentes (CEPAL, 2018).
- Biodiversidad en riesgo: Ecosistemas cruciales como manglares y arrecifes coralinos, que actúan como barreras naturales, están desapareciendo debido a la combinación de contaminación atmosférica y aumento de temperaturas (Estrada-Porrúa *et al.*, 2023).
- Impactos socioeconómicos: Las comunidades costeras intertropicales, que dependen de la pesca y el turismo, enfrentan pérdidas económicas significativas. Además, la inseguridad hídrica y alimentaria se intensifica en estas regiones densamente pobladas (Moreno-Díaz, 2020).

La contaminación atmosférica en las zonas costeras del Caribe es un problema ambiental que afecta tanto la calidad de vida de las comunidades locales como los ecosistemas costeros. Este problema se relaciona con factores como el turismo masivo, la urbanización acelerada y la falta de políticas ambientales efectivas. Entre las principales causas de la contaminación atmosférica se encuentran:

Emisiones por transporte marítimo y aéreo**:** El Caribe es un destino turístico de alta demanda y gran parte de su economía depende de cruceros, vuelos internacionales y embarcaciones de recreo. Estas actividades generan emisiones de dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas finas, que contribuyen al calentamiento global y al deterioro de la calidad del aire. Según el informe de la *International Council on Clean Transportation* (ICCT), los cruceros que operan en el Caribe representan el 47% de las emisiones de SO_2 a nivel mundial provenientes de este sector (ICCT, 2017).

Desarrollo urbano y turismo: El desarrollo acelerado de infraestructura turística en lugares como Cancún y Tulum, México, ha llevado al aumento de emisiones de gases de efecto invernadero (MCC, 2021). Para el caso de Tulum, se tienen estimadas 8.25 toneladas de CO_{2e} per cápita, la más alta en comparación con otras ciudades de Latinoamérica, estas emisiones se derivan principalmente del sector de agricultura, silvicultura y otros usos de suelo, y se atribuye a la gran cantidad de población flotante que la zona recibe a causa del turismo (Municipio de Tulum, 2024).

Quema de residuos y deforestación: En muchas comunidades costeras, los métodos de disposición de residuos incluyen la quema al aire libre, que libera metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Además, la deforestación de manglares y selvas para la construcción de infraestructura reduce la capacidad de los ecosistemas para absorber carbono y genera emisiones adicionales al liberar carbono almacenado en el suelo (PNUMA y CCAC, 2017).

Como resultado de la contaminación atmosférica, se ha documentado la afectación a los seres humanos, causando problemas respiratorios y cardiovasculares, así como el daño a los ecosistemas costeros. Los arrecifes de coral, vitales para la biodiversidad marina y la protección costera, están en riesgo debido al aumento de la temperatura del agua y la acidificación, procesos exacerbados por las emisiones de gases contaminantes (Maldonado y Moreno-Sánchez, 2023).

AvaCient ISSN 2992-8567
Año 3, Vol. V, Núm. 1, Enero Junio 2025 pp. 33-42

A grandes rasgos, los contaminantes presentes en la atmósfera se clasifican en primarios y secundarios, según su origen y formación. En el caso de los contaminantes primarios están aquellos emitidos directamente a la atmósfera desde fuentes naturales o antropogénicas. Entre ellos destacan:

- Dióxido de azufre (SO_2): Emitido por procesos industriales, plantas de energía y la quema de combustibles fósiles. Este gas causa problemas respiratorios y contribuye a la formación de lluvia ácida (Seinfeld y Pandis, 2016).
- Óxidos de nitrógeno (NO_x): Liberados por vehículos motorizados, procesos industriales y agricultura. Estos contaminantes afectan la calidad del aire y participan en la formación de ozono troposférico (Gurjar *et al.*, 2010).
- Material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$): Originado por la quema de biomasa, emisiones vehiculares y actividades industriales. Estas partículas son responsables de graves efectos en la salud (OMS, 2016; OMS, 2024), como enfermedades respiratorias y cardiovasculares (WHO, 2021).
- Metano (CH_4): Este gas es el más abundante de los hidrocarburos presentes en la atmósfera, es emitido de forma natural y es producto de diversas reacciones anaeróbicas del metabolismo como, es el caso de la fermentación entérica en el ganado vacuno (ONGMN, 2024).

En el caso de los contaminantes secundarios, estos se forman cuando los contaminantes primarios reaccionan químicamente en la atmósfera bajo ciertas condiciones, como la presencia de luz solar o humedad. Ejemplos destacados incluyen:

- Ozono troposférico (O_3): Producto de la reacción de NO_x y compuestos orgánicos volátiles (COVs) bajo la luz solar. Este contaminante es un componente clave del smog fotoquímico y afecta tanto la salud humana como las especies vegetales (Seinfeld y Pandis, 2016).
- Lluvia ácida: Formada cuando el SO_2 y los NO_x reaccionan con el agua en la atmósfera para producir ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3). Este fenómeno daña ecosistemas acuáticos, suelos y estructuras hechas por el ser humano (Gurjar *et al.*, 2010).
- Partículas secundarias: Producidas por la condensación de gases como el amoníaco (NH_3) y el SO_2, estas partículas agravan los efectos de las partículas primarias en la salud (WHO, 2021).
- Formaldehído (CH_2O): El formaldehído se emite al ambiente como producto metabólico en las plantas y animales en bajas concentraciones (ATSDR, 2016), y también se genera por la combustión incompleta de material orgánico de combustibles líquidos o gaseosos derivados del petróleo (MTESSA, 2021).

A este respecto, es importante mencionar que algunos contaminantes, como es el caso del formaldehído, pueden ser tanto primarios como secundarios, es decir pueden ser emitidos al ambiente por una fuente directa o bien pueden formarse como resultado de reacciones entre contaminantes primarios (AAH, 2024).

En este contexto, el presente artículo tiene como principal objetivo evidenciar los niveles de los contaminantes atmosféricos Metano (CH_4), Ozono (O_3) y Formaldehído (CH_2O), para el periodo 2018-2023, en el municipio de Tulum generados a partir de herramientas de geo-procesamiento mediante el uso de imágenes de satélite, la herramienta *Google Earth* y los programas SNAP (*Sentinel Application Platform*), *ArcMap* y *QGis*.

Materiales y métodos

Área de estudio: Tulum se ubica en la región centro-norte del estado de Quintana Roo, siendo uno de los 11 municipios que lo conforman, limita al norte con el municipio de Solidaridad, al sur con Felipe Carrillo Puerto, al este con Solidaridad, Cozumel y el Mar Caribe, y al oeste con Felipe Carrillo Puerto y el estado de Yucatán (ver Figura 1). Según el censo de población y vivienda realizado en 2020 por el INEGI, la población de Tulum asciende a 46,721 habitantes. Su economía está basada principalmente en el turismo, destacando como atractivos sus playas de arena blanca y las ruinas arqueológicas. Gracias al volumen de visitantes que recibe, se posiciona como el tercer destino turístico más importante a nivel nacional.

AvaCient ISSN 2992-8567
Año 3, Vol. V, Núm. 1, Enero Junio 2025 pp. 33-42

Figura 1. Área de estudio.

Fuente: Elaboración propia (2024).

Geoprocesamiento: Se generaron mapas de contaminantes atmosféricos para el municipio de Tulum usando imágenes del satélite Sentinel-5P y su sensor TROPOMI (*TROPOspheric Monitoring Instrument*). A través del uso del EO Browser (https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser), que permite visualizar imágenes de la serie de satélites Sentinel 5P. Fueron adaptados al área de estudio, proyectados a coordenadas UTM Zona 16N y transformados a un tamaño de celda de 90 metros.

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

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

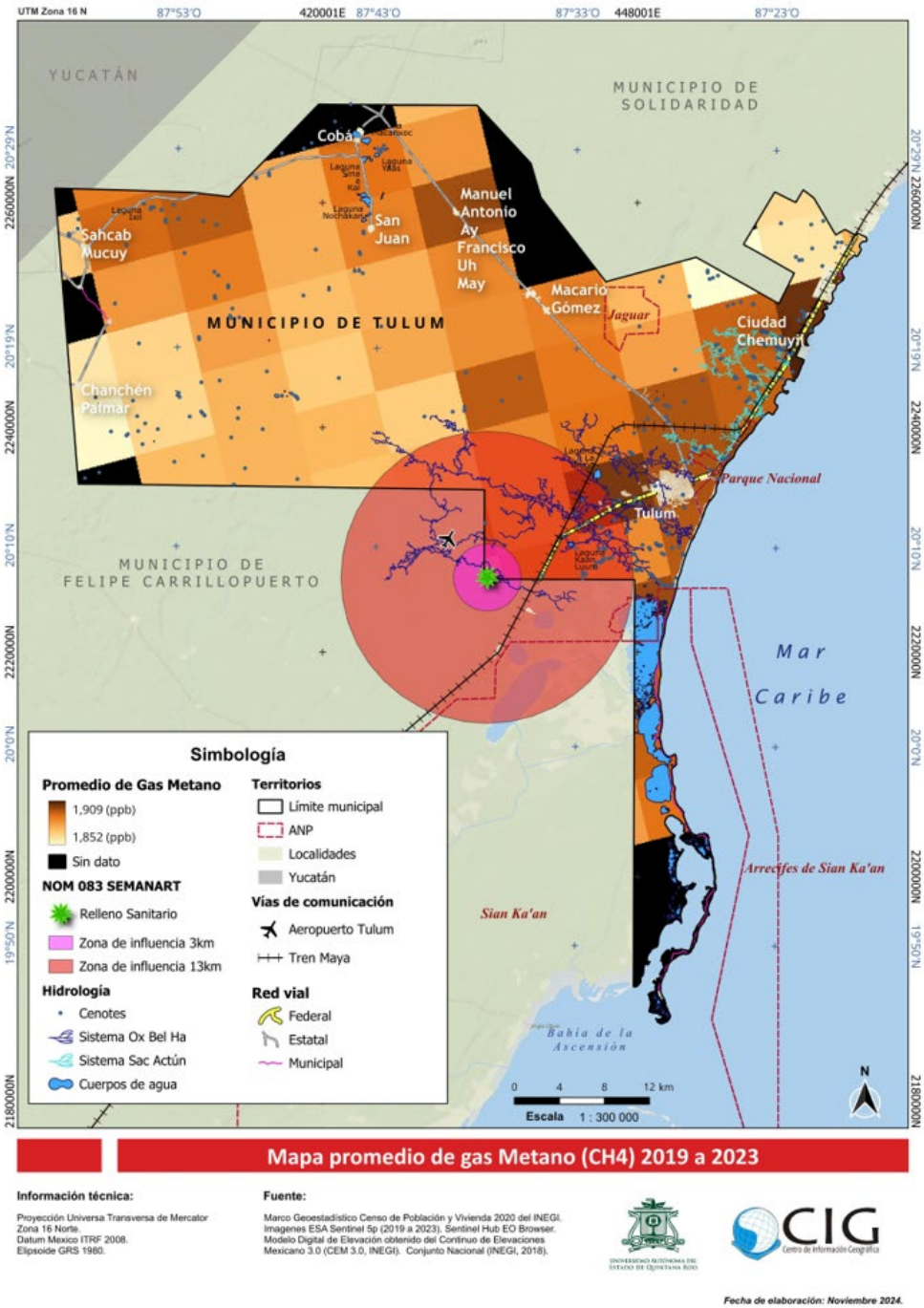
AvaCient ISSN 2992-8567
Año 3, Vol. V, Núm. 1, Enero Junio 2025 pp. 33-42

Una vez procesados los datos satelitales en SNAP, estos se integran en herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) como *ArcMap* y *QGIS*.

Resultados y discusión

Tanto el metano (CH_4) como el ozono (O_3) son considerados contaminantes climáticos de vida corta de aproximadamente 12 años (INECC, 2021), a nivel troposférico, el metano es el principal contribuyente de formación de ozono en la atmósfera y se estima que su contribución al calentamiento global es de un 30% (UNEP, 2021). La Figura 2 presenta la distribución espacial del metano.

Figura 2. Distribución de metano en el municipio de Tulum.



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

AvaCient ISSN 2992-8567
Año 3, Vol. V, Núm. 1, Enero Junio 2025 pp. 33-42

El metano es emitido por humedales y por rumiantes durante su proceso digestivo (INECC, 2021). La Figura 2, muestra valores de metano que van de 1852 a 1909 ppb, observándose cierta tendencia de los valores más altos sobre la línea de costa en donde, de forma paralela, en la zona continental se aprecia la presencia de los sistemas de acuíferos costeros kársticos Ox Bel Ha y Sac Actún, ambos sistemas están formados por redes de cenotes y cuevas inundadas e interconectadas entre sí, en estos sistemas el metano se forma de manera natural por la degradación de materia orgánica en condiciones anóxicas, si bien se considera que pueden funcionar como sumideros (Brankovits *et al.*, 2017).

Por otra parte, la literatura también establece que el metano es emitido principalmente ecosistemas de humedales, mismos que se encuentran presentes sobre estos sistemas de acuíferos. Así mismo, en la Figura 2 se observa que la zona cuenta con una gran cantidad de cenotes distribuidos en el territorio en donde se forma de manera natural el metano, y hasta ahora, se conoce sólo una parte de la red de sistemas de acuíferos y su interconexión. De acuerdo con la literatura revisada relacionada con la presencia de metano en pozos de agua (MDH, 2024), el metano presente en el aire forma una mezcla explosiva cuando alcanza concentraciones que oscilan del 5 al 15% en volumen. La disolución de metano en agua, así como el intercambio entre el agua y la atmósfera en lugares cerrados como los sistemas de acuíferos costeros kársticos, dependería entonces de la temperatura y ventilación del lugar. Concentraciones de metano inferiores a 10 mg/L se consideran seguras, sin embargo, el documento también sugiere que cualquier pozo de agua con concentraciones detectables de metano, sea constantemente revisada.

Se estima que los flujos más importantes en orden decreciente de las emisiones de metano son la agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra, seguido de los humedales naturales la quema de biomasa y finalmente de la quema de combustibles fósiles y residuos (Murray *et al.*, 2023). Por lo que la presencia de valores de este gas al interior del municipio puede estar relacionada con actividades de quema de biomasa y actividades agropecuarias o de silvicultura. Otro aspecto importante de señalar, es la presencia de la celda de residuos sólidos en el municipio de Tulum, dado que la descomposición de residuos orgánicos presentes en la basura, la presencia de coliformes y nitrógeno nítrico pueden dar lugar a la formación de metano (MDH, 2024).

Además de ser un potente gas de efecto invernadero, el metano también juega un papel importante en la formación de ozono troposférico (O_3) representado en la Figura 3 y presenta valores que van de 0.129 a 0.134 mol/m^2 en el municipio de Tulum.

Cuando el metano se libera a la atmósfera, se descompone a través de una serie de reacciones fotoquímicas. En presencia de radiación ultravioleta (UV) (OMS, 2022) y con la ayuda de radicales hidroxilos (OH), el metano se oxida parcialmente, formando compuestos intermedios como el formaldehído (CH_2O) (Atkinson, 2000), representado en la Figura 4 con valores muy bajos que van de 0 a 0.0003 mol/m^2, y que posteriormente se descompone en formil ($R\text{-}COH^-$) para finalmente dar lugar a la formación de dióxido de carbono e hidrógeno.

El ozono troposférico se forma a partir de reacciones fotoquímicas en las que están involucrados varios precursores, incluidos los compuestos orgánicos volátiles (COVs) como el metano y el formaldehído (Zhang, 2023). La presencia de radiación solar es fundamental para estas reacciones, ya que los fotones UV descomponen los precursores y permiten la formación de ozono. Este ozono es un contaminante secundario, ya que no se emite directamente, sino que se forma a partir de otras sustancias en presencia de luz solar.

Los COVs, como el metano (CH_4), etileno (C_2H_4), y otros hidrocarburos, reaccionan con radicales hidroxilo (OH) generados por la radiación solar. Estas reacciones dan lugar a la formación de compuestos intermedios como formaldehído (CH_2O) y otros productos, que, a su vez, participan en la formación de ozono a través de reacciones con los óxidos de nitrógeno (NO_x) (Jacob, 1999).

El formaldehído es uno de los productos secundarios de la oxidación del metano. Este compuesto, a su vez, se descompone en la atmósfera y participa en la formación de ozono a través de reacciones complejas (NTP, 2010). El formaldehído se puede convertir en peróxidos que, al interactuar con otros radicales en la atmósfera, contribuyen a la formación de ozono troposférico (Zhang, 2023).

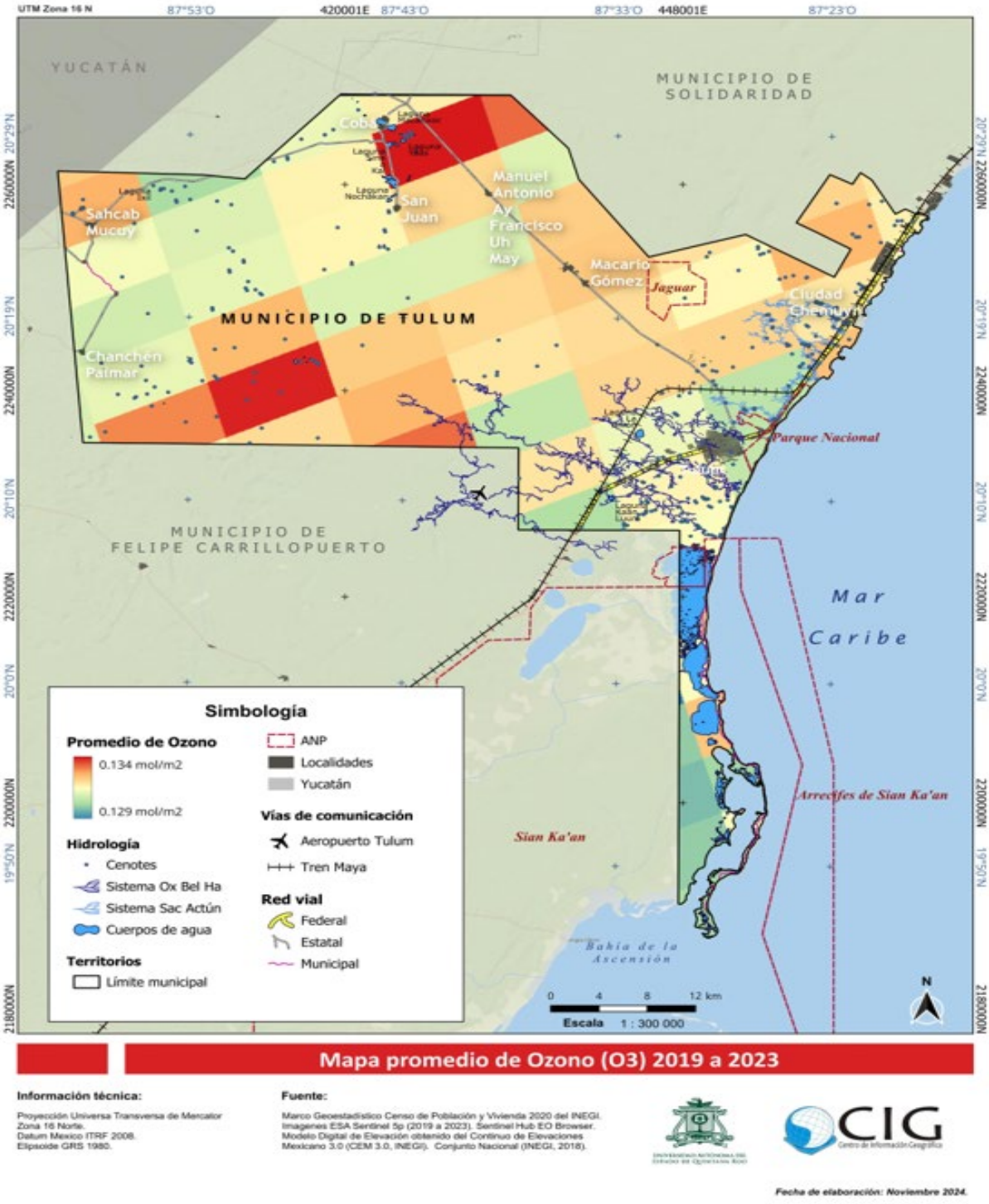
En resumen, de esta relación de contaminantes se puede decir que:

- El metano (CH_4) se oxida en la atmósfera bajo la acción de la radiación UV y el radical OH, lo que produce compuestos como formaldehído (CH_2O).

AvaCient ISSN 2992-8567
Año 3, Vol. V, Núm. 1, Enero Junio 2025 pp. 33-42

- El formaldehído participa en reacciones fotoquímicas que contribuyen a la formación de ozono (O_3) en la troposfera, un componente clave en la contaminación del aire.
- El ozono troposférico se forma de manera indirecta debido a la presencia de compuestos intermedios, como el formaldehído, que resultan de la oxidación de metano.

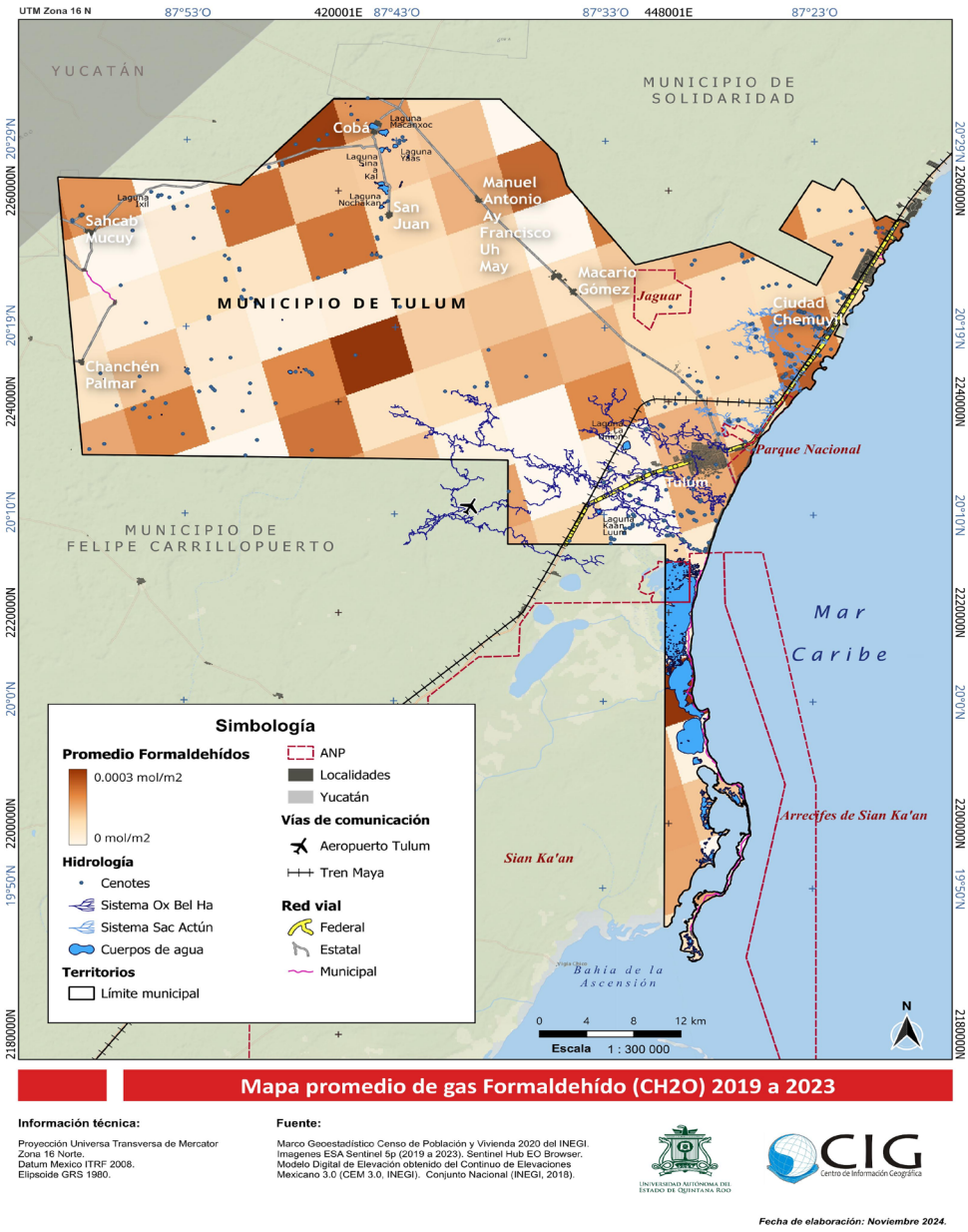
Figura 3. Distribución de ozono en el municipio de Tulum.



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

AvaCient ISSN 2992-8567
Año 3, Vol. V, Núm. 1, Enero Junio 2025 pp. 33-42

Figura 4. Distribución de formaldehído en el municipio de Tulum.



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

Conclusiones

El contaminante observado en mayor cantidad es el metano, seguido del ozono y con menor presencia se encuentra el formaldehído. De acuerdo con la literatura, el metano es producido en zonas que presentan condiciones anóxicas como son los humedales y los sistemas de acuíferos costeros kársticos, por lo que podrían considerarse estos sistemas naturales como principales fuentes del metano observado, a esto se suman las condiciones de radiación solar que dan lugar a la formación de iones (^{-}OH) y que mediante fotodisociación del oxígeno molecular (O_2) y su interacción con los NOx, COVs, entre los que se encuentra el metano, dan lugar a la formación de ozono troposférico. Por lo que respecta al formaldehído que se encuentra en menor cantidad en el área de estudio, se forma como producto intermedio de estas mismas reacciones y por la quema incompleta de materia orgánica, y tiene un tiempo de vida corta en la atmósfera. Aunque el ozono tiene un papel protector en la estratosfera, en la troposfera es un contaminante secundario que se forma en las zonas urbanas y suburbanas, especialmente en presencia de radiación solar intensa, condiciones existentes en el municipio de Tulum. Además, su formación está vinculada con problemas de calidad del aire y salud

pública, ya que el ozono troposférico puede irritar los pulmones y contribuir al cambio climático. Lo examinado en el presente trabajo pone de manifiesto la necesidad de contar con medidas de mitigación y adaptación al cambio climático en el municipio de mayor tasa de crecimiento y urbanización en México. Entre las medidas a considerar se encuentran: el uso de tecnología con mayor eficiencia energética, un mejor sistema de transporte colectivo, la participación en mercados de carbono a nivel internacional, la aplicación de tecnologías basadas en oxidación avanzada orientados a reducir la contaminación atmosférica y la vigilancia de emisiones en los sistemas de acuíferos kársticos, en su comportamiento como fuente y sumidero de CH_4. Es importante resaltar que los nieles de metano podrían incrementarse a niveles de riesgo, al recibir escurrimientos ricos en materia orgánica derivados de aguas residuales, percolación de lixiviados y modificación de corrientes subterráneas.

Referencias bibliográficas

Air Alliance Houston [AAH]. (2024, 15 noviembre). Contaminación atmosférica 101. https://airalliancehouston.org/es/contaminacion-atmosferica-101/#:~:text=¿Qué%20es%20la%20Contaminación%20Atmosférica,reacciones%20secundarias%20de%20ciertos%20hidrocarburos.

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, Gobierno de EUA [ATSDR]. (2016, 6 mayo). Resúmenes de salud pública – Formaldehído. https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs111.html

Atkinson, R. (2000). Atmospheric chemistry of VOCs and NOx. Atmospheric Environment, 34(12), 2063-2101. https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00460-4

Brankovits, D., Pohlman, J.W., Niemann, H. Leigh, M.B, Leewis, MC, Becker, K.W., Iliffe, T.M., Alvarez, F., Lehmann, M.F., Phillips, B. (2017). Methane and dissolved organic carbon-fueled microbial loop supports a tropical subterranean estuary ecosystem. Nature Communications 8 (2017). https://doi.org/10.1038/s41467-017-01776-x

Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2018, 24 septiembre). Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe: Metodologías y herramientas para la evaluación de impactos de la inundación y la erosión. https://hdl.handle.net/11362/44096.

Estrada-Porrúa, F., Zavala-Hidalgo, J., Martínez-Arroyo, A., Raga, G. y Gay-García, G. (eds) (2023, 1 octubre). Estado y Perspectivas del Cambio Climático en México: Un Punto de Partida. https://www.caacs.unam.mx/wp-content/files/estado-y-perspectivas-del-cambio-climatico-en-mexico-un-punto-de-partida-unam.pdf

Filippi, F. (2016). Cambio climático y desarrollo. Implicaciones del cambio climático en la cooperación para el desarrollo (3ª ed.). Consultado el 22 de noviembre de 2024. https://musol.org/wp-content/uploads/2024/11/Manual-Cambio-Climatico-Implicaciones-del-Cambio-Climatico-en-la-Cooperacion-para-el-Desarrollo.pdf

Gurjar, B. R., Molina, L. T., y Ojha, C. S. P. (eds) (2010). Air pollution: Health and environmental impacts (1ª ed.). CRC Press. ISBN 9781439809624.

Jacob, D. J. (1999). Introduction to Atmospheric Chemistry (1ª ed.). Princeton University Press. ISBN 9780691001852

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC]. (2021). Gases y compuestos de efecto invernadero. Consultado el 22 de noviembre de 2024. https://cambioclimatico.gob.mx/estadosymunicipios/Emisiones.html

International Council on Clean Transportation [ICCT]. (2017, 17 octubre). Greenhouse gas emissions from global shipping: 2013-2015. https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Global-shipping-GHG-emissions-2013-2015_ICCT-Report_17102017_vF.pdf.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. Consultado el 15 de noviembre de 2024. https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/

Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2014). Climate change 2013: The physical science basis. Cambridge University Press. Online ISBN 9781107415324. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324

Maldonado, J. H. y Moreno-Sánchez, R. del P. (2023, 15 junio). Servicios ecosistémicos y biodiversidad en América Latina y el Caribe. Políticas para la respuesta al cambio climático y la preservación de la biodiversidad. CAF-Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe. https://scioteca.caf.com/handle/123456789/2051

Magrin, G. O. (2015, 1 diciembre). Adaptación al cambio climático en América Latina y el Caribe. Naciones Unidas Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/618b144d-e069-4e38-8e12-1da1a0bdb817/content

México ante el Cambio Climático [MCC] (2021). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos. Consultado el 22 de noviembre de 2024. https://cambioclimatico.gob.mx/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos/

Minnesota Department of Health [MDH]. (2024). Metano en el agua de pozo [Methane in well water]. Consultado el 15 de noviembre de 2024. https://www-health-state-mn-

us.translate.goog/communities/environment/water/wells/waterquality/methane.html?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=rq

Ministerio de Trabajo Empleo y Seguridad Social Argentina [MTESSA]. (2021, 21 julio). Formaldehído. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/guia_formaldehido_julio_2021.pdf

Moreno-Díaz, M. L. (2020). Impacto socioeconómico de la variabilidad climática en pesca y turismo: antecedentes y propuesta metodológica. Revista de Biología Tropical, 68, 18-32. https://dx.doi.org/10.15517/rbt.v68is1.41127

Municipio de Tulum. (2023, 9 julio). Atlas de Riesgo del Municipio de Tulum. https://tulum.gob.mx/inciso-p/

Municipio de Tulum. (2024). Propuesta de Plan de Acción Climática. Consultado el 22 de noviembre de 2024. https://tulum.gob.mx/wp-content/uploads/2024/01/PAC-Tulum-Propuesta-Final.pdf

Murray, G. N., Perea, K., Mendoza, A., Jaramillo, V. J., Murguía-Flores, F., Martínez, A., García, G. M. A., Vargas, R. (2023). Flujos de gases y compuestos de efecto invernadero en México en décadas recientes (2000-2019). Consultado el 29 de noviembre. https://cambioclimatico.unam.mx/wp-content/uploads/2023/10/cambio-climatico-en-mexico-emisiones-flujos-gycei.pdf

National Toxicology Program [NTP] (2010, 22 enero). Final report on carcinogens background document for formaldehyde. https://www.researchgate.net/publication/273439236_Final_Report_on_Carcinogens_Background_Document_for_Formaldehyde

Organization Mundial de la Salud [OMS]. (2022, 21 junio). Radiación ultravioleta. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ultraviolet-radiation

OMS (2024, 24 octubre) Organización Mundial de la Salud. Ambient (outdoor) air pollution. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health

Organization Mundial de la Salud [OMS] (2016, 13 mayo). Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. https://www.who.int/publications/i/item/9789241511353

Organización No Gubernamental Manos Unidas [ONGMU]. (2024). Principales contaminantes atmosféricos. Consultado el 29 de noviembre de 2024. https://www.manosunidas.org/sites/default/files/principales_contaminantes_atmosfericos.pdf.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA] y Climate Clean Air Coalition [CCAC] (2017). Avances y oportunidades en la reducción de contaminantes climáticos de vida corta en América Latina y el Caribe. https://www.ccacoalition.org/sites/default/files/resources/LAC%20SLCP%20Technical%20Report%20ESPANOL%202019%202%20web.pdf.

Reddy, K. R. y DeLaune, R. D. (2008). Biogeochemistry of wetlands: Science and applications (1ª ed.). CRC Press. ISBN 9780429095764. https://doi.org/10.1201/9780203491454

Secretaria de Turismo [SECTUR] (2020, 1 diciembre). Pueblos Mágicos de México. https://www.gob.mx/sectur/articulos/pueblos-magicos-206528.

Seinfeld, J. H. y Pandis, S. N. (2016). Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change (3ª ed.). Wiley. ISBN 978-1-118-94740-1.

Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire [SINAICA]. (2024). Normas Oficiales Mexicanas en materia de salud ambiental. Consultado el 22 de noviembre de 2024. https://sinaica.inecc.gob.mx/pags/noms.php

United Nations [UN]. (s. f.). Datos básicos sobre la acción climática. Consultado el 29 de noviembre de 2024. https://www.un.org/es/climatechange/science/key-findings#physical-science

United Nation Environment Program [UNEP]. (2021, 20 agosto). Las emisiones de metano están acelerando el cambio climático. ¿Cómo Podemos reducirlas? https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/las-emisiones-de-metano-estan-acelerando-el-cambio-climatico-como

World Health Organization Ambient (outdoor) air pollution [PNUMA]. (2020). https://www.who.int.

Zhang, H., Xu, Y. Jia, L. (2023). Evaluation of ozone formation potential of formaldehyde using smog chamber data. Aerosol and Air Quality Research 23 (5). https://doi.org/10.4209/aaqr.220323

http://avacient.chetumal.tecnm.mx/index.php/revista
https://www.facebook.com/avacient
https://doi.org/10.69823/avacient.v5n1a4