



Metodología para el desarrollo de los Índices de Impacto y Riesgo Ambiental para la Zona Metropolitana de Tulancingo, Hidalgo

Methodology for the development of Environmental Impact and Risk Index for the Metropolitan Area of Tulancingo, Hidalgo

Jaqueline Pérez-Islas ^{a*}, Luis A. Oliver Hernández ^b

^a Licenciatura en Geología Ambiental, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.
^b Instituto de Ciencias Sociales y Humanidades, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

El cambio climático es uno de los desafíos más relevantes y complejos a nivel global, con impactos que abarcan desde la economía hasta los ecosistemas. El presente documento ofrece un análisis contextual del cambio climático y aplica una metodología para evaluar el impacto y riesgo ambiental en la Zona Metropolitana de Tulancingo, ubicada en el estado de Hidalgo y caracterizada por un acelerado crecimiento urbano en los últimos años. El estudio permite identificar las principales fuentes de emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI), así como el grado de vulnerabilidad económica, social y sectorial. Los resultados reflejan un nivel de impacto ambiental moderado y un riesgo ambiental entre bajo y moderado, siendo el municipio de Tulancingo de Bravo el que presenta los valores más elevados. Esta evaluación busca servir como referencia para la toma de decisiones enfocadas en diseñar e implementar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático.

Palabras Clave: cambio climático, mitigación, adaptación, vulnerabilidad.

Abstract

Climate change is one of the most significant and complex global challenges, with impacts ranging from the economy to ecosystems. The present document provides a contextual analysis of climate change and applies a methodology to assess environmental impact and risk in the Metropolitan Area of Tulancingo, located in the state of Hidalgo and characterized by rapid urban growth in recent years. The study identifies the main sources of greenhouse gas emissions, as well as the degree of economic, social, and sectoral vulnerability. The results indicate a moderate level of environmental impact and an environmental risk ranging from low to moderate, with the municipality of Tulancingo de Bravo showing the highest values. This assessment aims to serve as a reference for decision-making focused on designing and implementing climate change mitigation and adaptation strategies.

Keywords: Climate change, mitigation, adaptation, vulnerability.

1. Introducción

El cambio climático se refiere a una serie de alteraciones climatológicas relacionadas al aumento de temperatura y lluvias, es una problemática a nivel mundial muy compleja que está afectando a todos los países en diferentes perspectivas que van desde su economía, ecosistemas y sistemas meteorológicos. El cambio climático se debe a variaciones en el clima que han aumentado por el efecto invernadero; este es un proceso natural de calentamiento de la tierra donde los Gases de Efecto Invernadero (GEI) retienen parte del calor del sol

en la atmósfera (López et al., 2021). Estas variaciones forman parte de un ciclo natural en la historia geológica del planeta, sin embargo, la mayor parte del tiempo permitieron a los organismos adaptarse a las nuevas condiciones climatológicas.

Cuando la energía solar atraviesa la atmósfera una parte de esta radiación es absorbida por la superficie y otra es reflejada, manteniéndose así una temperatura apta para el desarrollo de la vida en el planeta (IPCC, 1992). Sin embargo, con la incorporación de actividades antropogénicas debido a la revolución industrial la

*Autor para la correspondencia: jaquelinehca@gmail.com
Correo electrónico: jaquelinehca@gmail.com (Jaqueline Pérez Islas), luis_oliver9924@uaeh.edu.mx (Luis Alberto Oliver Hernández).

generación de los GEI incrementó y así mismo se intensificó el efecto invernadero (IPCC, 2021). Dentro de las actividades humanas que generan una mayor de GEI se encuentra la industria, el transporte, el comercio, la ganadería y la agricultura; siendo los principales responsables del incremento de las temperaturas y del aceleramiento del cambio climático, que a su vez afecta de manera directa e indirecta a los sistemas naturales, económicos y sociales.

Diversos estudios que se han realizado a nivel mundial mencionan que el incremento de los GEI está modificando la composición natural de la atmósfera, parte de esta problemática es que la mayor parte de los gases se procesan de manera natural por océanos y organismos como plantas, árboles y plancton, pero debido al aumento de emisiones de GEI ya no se están absorbiendo de manera eficiente, aunado a los problemas de deforestación, contaminación y pérdida de biodiversidad que hacen menos capaces a estos sistemas, causando que los GEI se acumulen lo que atrapa más calor elevando la temperatura de la atmósfera, este fenómeno se denomina Calentamiento Global (López et al., 2024).

De acuerdo al informe del Panel Intergubernamental de Expertos ante el Cambio Climático (IPCC, 2022) el aumento de la temperatura dentro de los próximos 10 a 20 años oscilará entre 1.5 y 2°C. Las problemáticas que se generarían a base del aumento de temperatura de 1.5°C sería el aumento de las olas de calor, el alargamiento de las estaciones cálidas y acortamiento de las frías, incremento de las precipitaciones, aumento de las sequías y pérdida de hielo marino; y en el caso de que el aumento sea de 2°C los episodios de calor alcanzarían umbrales de tolerancia críticos para la agricultura y la salud.

Una Zona Metropolitana (ZM) se define como un conjunto de municipios que presentan un alto grado de interconexión física o funcional, ya sea a nivel intermunicipal o interestatal (Metrópolis de México, 2020). En este artículo se analiza la Zona Metropolitana de Tulancingo (Figura 1) que está conformada por los municipios de Tulancingo de Bravo, Cuautepec de Hinojosa y Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, se encuentra en la al sureste del estado de Hidalgo entre 19°50'33" y 20°12'10" de latitud norte; y los 98°09'15" y 98°30'16" de longitud oeste (POEH, 2015).

Estos municipios mantienen una estrecha relación derivada del intenso proceso de urbanización que han experimentado en los últimos años. Este fenómeno ha provocado una notable expansión de la mancha urbana, así como un incremento en la demanda de servicios, infraestructura, equipamiento y en la ocupación del suelo. Como consecuencia, se ha generado una creciente presión sobre las áreas naturales ubicadas dentro de su territorio (POEH, 2015).

De acuerdo al documento más reciente de Metrópolis de México 2020, desarrollado por SEDATU, CONAPO e INEGI, la población de los tres municipios que conforman la ZM de Tulancingo ha crecido de manera significativa en las últimas décadas. En 1990, la ZM contaba con

147,137 habitantes, y para el año 2020 la cifra aumentó a 268,351 habitantes. El periodo de mayor crecimiento se registró entre 1990 y 2000 con una tasa de crecimiento del 2.8%, destacando el municipio de Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero como el de mayor tasa de crecimiento poblacional. Asimismo, se señala que la densidad media urbana (DMU), expresada en habitantes por hectárea (hab/ha), es de 60.6 para toda la zona. Santiago Tulantepec presenta la mayor DMU entre los municipios que integran la ZM, debido a que es el que cuenta con la menor superficie territorial.

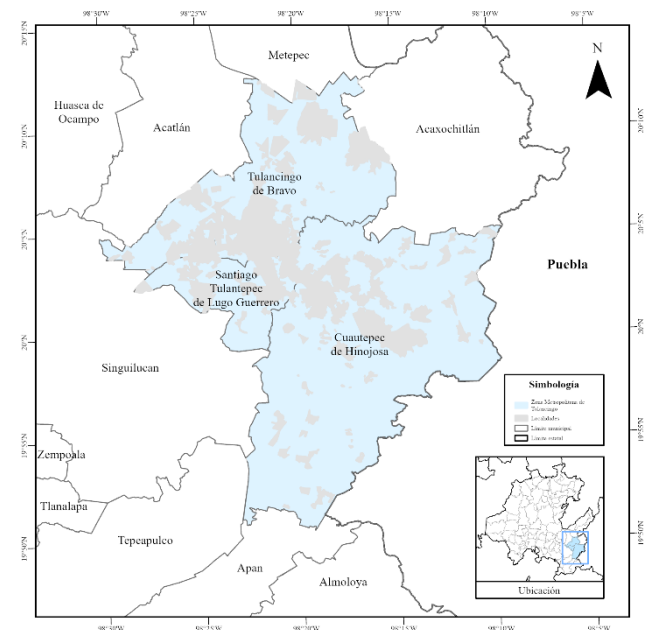


Figura 1: Zona Metropolitana de Tulancingo.

Fuente: Elaboración propia.

Partiendo de los elementos antes señalados, en el presente documento se realiza un análisis sobre las principales emisiones de los GEI y el grado de vulnerabilidad económica, social, por sectores económicos y ante eventos climáticos que se presentan en la Zona Metropolitana de Tulancingo. Para lo anterior se parte de la propuesta metodológica que investigadores de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) desarrollaron en la Estrategia Estatal de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático de Hidalgo (EEMACCH, 2018), logrando así definir un índice de impacto ambiental y un índice de riesgo ambiental para la Zona Metropolitana de Tulancingo.

2. Metodología

Para el desarrollo de los indicadores de impacto y riesgo ambiental en la Zona Metropolitana de Tulancingo, se tomó como base la metodología usada en la elaboración de la Estrategia Estatal de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático del Estado de Hidalgo (EEMACCH, 2018).

2.1. Índice de Impacto Ambiental

El Índice de Impacto Ambiental hace referencia al nivel de degradación que el medio ambiente puede sufrir como consecuencia de acciones humanas o eventos naturales. El objetivo de este apartado es estimar el nivel de impacto ambiental en la Zona Metropolitana de Tulancingo, a partir del análisis de las emisiones de GEI (EEMACCH, 2018):

- **Dióxido de Carbono (CO₂):** generado por la producción industrial, el transporte (automóviles, camiones, taxis, servicio público etc.) y los servicios públicos (petróleo, electricidad, gas, etc.).
- **Metano (CH₄):** generado por las aguas residuales y la ganadería (bovino, porcino, caprino y ovino, entre otros).

- **Óxido nitroso (N₂O):** generado por el uso de fertilizantes y quema de biomasa.
- **Óxido de nitrógeno (NO_x):** este puede ser tanto monóxido de nitrógeno (NO) o dióxido de nitrógeno (NO₂); se genera principalmente por combustibles fósiles, quema de biomasa, la agricultura intensiva, uso de fertilizantes nitrogenados y la deforestación.
- **Partículas por millón (ppm):** se refiere a las partículas generadas por el gas por cada millón de partes de aire contaminado.

Paso 1. Con base en el Inventario de Emisiones de la región Tula-Tepeji (2002), presentado en el informe de la Estrategia Estatal y que sirvió como base para los 84 municipios del estado de Hidalgo, se identifican las principales fuentes de emisiones.

Tabla 1: Clasificación de fuentes de emisiones y sus sectores.

Fuentes de emisiones	Sectores
Puntuales	Energía eléctrica, industria química, cemento y cal, automotriz, petróleo y petroquímica, textiles, bienes de base de minerales no metálicos, alimentos y sustancias químicas y artículos de plástico o hules.
Móviles	Autos particulares, taxis, combis, microbuses, pick up, camiones ligeros a gasolina, camiones pesados a gasolina, particulares a diésel, vehículos menores de 3 t diésel, vehículos mayores de 3 t diésel, vehículos a gas LP y Motocicletas.
Área	Consumo de solventes, limpieza de superficies industriales, recubrimiento de superficies arquitectónicas e industriales, lavado en seco, artes gráficas, panaderías, pinturas (automotriz y tránsito), fugas de gas LP en uso doméstico, hidrocarburos no quemados HCNQ en la combustión, distribución y venta de gasolina, tiraderos a cielo abierto, aplicación de asfalto, combustión habitacional, incendios forestales y ladrilleras.
Naturales	Biogénicas (número de balnearios de aguas termales).
Agricultura	Fuentes por actividad productiva en el campo, mediante la utilización de fertilizantes, herbicidas e insecticidas químicos, aguas negras y uso de maquinaria agrícola.
Ganadería	Fuentes por actividad productiva en la ganadería (bovinos, porcinos, caprinos y aves de corral, entre otros).

Fuente: EEMACCH, 2018.

Con base en lo anterior el impacto ambiental se determinará de la siguiente manera:

Tabla 2: Índice de Impacto ambiental.

Índice de Impacto Ambiental (IIA)	Índice de Carbono (ICO ₂)	0.0<IIA < 25.0	Bajo impacto ambiental		
	Índice de Metano (ICH ₄)				
	Índice de Óxido Nitroso (IN ₂ O)			25.1<IIA<50.0	Moderado Impacto Ambiental
	Índice de Hidrofluorocarbonos (IHFC)			50.1<IIA<75.0	Alto Impacto Ambiental
	Índice de Perfluorocarbonos			75.1<IIA<100	Muy Alto Impacto Ambiental
Índice de Hexafluoruro de Azufre (ISF ₆)					

Fuente: López et al., 2020.

Paso 2: se determina el valor total de las emisiones de gases por sector, es decir, se calcula cuánto emite cada sector en total, conforme a lo siguiente

$$\hat{X}_T = \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

Se aplica el valor esperado:

$$E[X_T] = E \left[\sum_{i=1}^n x_i \right] = nx \quad (2)$$

Donde:

- $E[X_T]$ es el valor esperado de emisiones del i-esimo gas del j-esimo municipio.
- n es el total de unidades económicas en el j-esimo municipio.
- \bar{x} es el promedio de emisiones de gases por unidad económica.

Paso 3: después de calcular el valor esperado por sector, se calcula la cantidad emitida en cada fuente:

$$\hat{X}_T = \sum_{i=1}^n x_i = E[X_{Ti}]_1 + E[X_{Ti}]_2 + E[X_{Ti}]_3 + \dots + E[X_{Ti}]_n \quad (3)$$

donde:

- \hat{X}_T es la cantidad total de emisiones del i-esimo gas en la Zona Metropolitana.
- $E[X_{Ti}]$ es el valor esperado de emisiones del i-esimo gas del j-esimo municipio.

Estos procesos se ejecutan en cada fuente de emisión.

Paso 4: hecho esto, se debe fijar la proporción de emisión del i-esimo gas en la j-esima fuente, para la cual se utiliza la siguiente expresión algebraica:

$$\hat{P}_T = \left[\frac{\log(\hat{X}_{Tj} + 1)}{\log(\hat{X}_T + 1)} \right] * 100 \quad (4)$$

donde:

- \hat{P}_T es la proporción de emisiones del i-ésimo gas en la j-esima fuente del j-esimo municipio.

Al aplicar la expresión algebraica (4) con los datos del municipio de Tulancingo de Bravo, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 3. En esta se destaca que los gases con mayores niveles de emisión son el CO₂, el CH₄ y el N₂O:

Tabla 3: Emisiones de gases para el municipio de Tulancingo de Bravo.

Municipio/ GEI (cuantiles1)	PM	SO ₂	CO ₂	NO _x	CH ₄	N ₂ O
Tulancingo de Bravo	44.96	25.27	76.09	71.72	74.86	72.79
Emisión de gases	Moderada emisión	Moderada emisión	Muy alta emisión	Alta emisión	Alta emisión	Alta emisión

1. Los cuantiles son una medida estadística descriptiva de la información analizada, donde cada cuantil, representa el 25% hasta sumar cien

Fuente: Elaboración propia.

Paso 5: una vez determinada la proporción de cada gas, se calcula el Impacto Ambiental en el j-esimo municipio:

$$IA_j = \sqrt[N]{\prod_{i=1}^N \hat{P}_{Ti}} ; \text{ tal que } \hat{P}_{Ti} \neq 0 \quad (5)$$

Donde:

- IA_i es el Impacto Ambiental en el j-esimo municipio.
- N es el total de gases a contabilizarse en el j-esimo municipio en la i-esima fuente.

Continuando con el ejemplo de Tulancingo de Bravo, aplicando la expresión algebraica (5) se obtiene que para el municipio de Tulancingo de Bravo existe un alto impacto ambiental al contar con 56.81 unidades:

$$\sqrt[6]{(44.96)(25.27)(76.09)(71.72)(74.86)(72.79)}$$

$$IA_j = 56.81$$

Después de determinar el Impacto Ambiental (IA) en el j-esimo municipio, se determinan las fuentes influyentes, para lo cual se siguen las siguientes fases:

- **Fase I:** se calcula el grado de contaminación de cada una de las fuentes:

$$\hat{G}_C = \left[\frac{\log(\hat{X}_{Tj} + 1)}{\log(\hat{X}_T + 1)} \right] * 100 \quad (6)$$

Donde:

- \hat{G}_C es el grado de contaminación del i – esimo gas en el j – esimo municipio.
- $E[X_{Ti}]$ es el valor esperado de emisiones del i-esimo gas del j-esimo municipio.

- **Fase II:** se obtiene el promedio de contaminación de cada fuente:

$$\underline{G}_C = \sqrt[N]{\prod_{i=1}^N \hat{G}_C} ; \text{ tal que } \hat{G}_C \neq 0 \quad (7)$$

Donde:

- \underline{G}_C es el grado de contaminación del i – esimo gas en el j – esimo municipio.
- \hat{G}_C es el grado de contaminación del i – esimo gas en el j – esimo municipio.

$$IA_E = 47.95$$

Mediante la expresión algebraica (7):

$$IA_E = \sqrt[7]{\prod_{i=1}^7 IA_j}; \text{ tal que } IA_j \neq 0$$

Podemos identificar el impacto ambiental en la Zona Metropolitana de Tulancingo:

$$IA_E = \sqrt[3]{(46.69)(41.57)(56.81)}$$

Con base en este resultado, se puede decir que el promedio de impacto ambiental en la Zona Metropolitana de Tulancingo es moderado ya que se encuentra en el segundo cuartil.

Índice de Riesgo Ambiental

Este parte de la Política Nacional de Adaptación, por lo que el Riesgo Ambiental se enfocará en medir el grado de vulnerabilidad de los municipios de la ZM de Tulancingo. El impacto ambiental se guiará bajo las siguientes hipótesis (tabla 5):

Tabla 5: Hipótesis para la determinación del impacto ambiental.

A mayor Vulnerabilidad Social y Económica (VSE), mayor Riesgo Ambiental	A mayor Vulnerabilidad por Sectores (VS), mayor Riesgo Ambiental	A mayor Vulnerabilidad Climáticos (VC), mayor Riesgo Ambiental
<ul style="list-style-type: none"> ● A mayor Tasa de Pobreza, mayor VSE ● A mayor Tasa de vulnerabilidad del ingreso familiar, mayor VSE ● A mayor Tasa de vulnerabilidad de los años de educación, mayor VSE ● A mayor Tasa de vulnerabilidad de vivienda en servicios básicos, mayor VSE ● A mayor Tasa de vulnerabilidad en migración, mayor VSE ● A mayor Tasa de carencia en acceso a servicios de salud, mayor VSE ● A mayor Tasa de vulnerabilidad en los hijos de familia, mayor VSE 	<ul style="list-style-type: none"> ● A mayor vulnerabilidad en energía, mayor VS ● A mayor vulnerabilidad en agricultura, mayor VS ● A mayor vulnerabilidad en ganadería, mayor VS ● A mayor vulnerabilidad en turismo, mayor VS ● A mayor vulnerabilidad en salud, mayor VS ● A mayor vulnerabilidad en transporte, mayor VS ● A mayor vulnerabilidad en industria/transporte, mayor VS ● A mayor vulnerabilidad en agua, mayor VS ● A mayor vulnerabilidad en ciudades, mayor VS 	<ul style="list-style-type: none"> ● A mayor Tasa de meteorología (MT), mayor índice eventos climáticos. <ul style="list-style-type: none"> - A mayor temperatura, mayor MT - A menor temperatura, mayor MT - A mayor precipitación, mayor MT - A mayor neblina, mayor MT ● A mayor tasa de desastres naturales (NT), mayor índice de eventos climáticos. <ul style="list-style-type: none"> - A mayores huracanes, mayor NT - A mayores heladas, mayor NT - A mayores ciclones, mayor NT - A mayor granizo, mayor NT - A mayores tormentas eléctricas, mayor NT

Fuente: López et al., 2020.

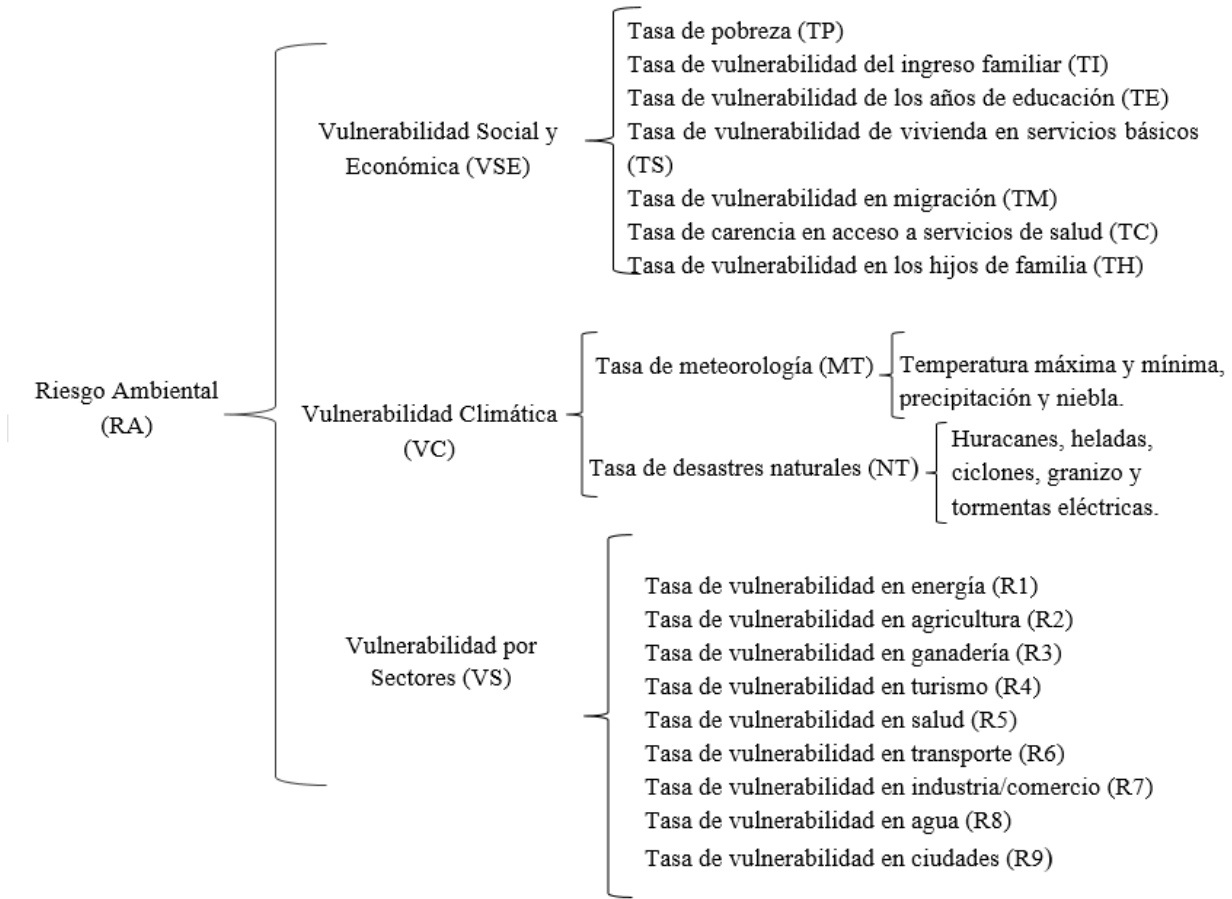


Figura 3: Indicadores para la determinación del Riesgo Ambiental.

Fuente: López et al., 2020.

Paso 1. Selección del modelo estadístico¹

Para el modelo del Riesgo Ambiental se sustenta en los valores esperados de estadística descriptiva:

- Media aritmética: si existen $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ números positivos su valor esperado se expresa de la siguiente forma:

$$E(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i ; \quad 1, 2, \dots, n$$

- Media geométrica: si existen $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ números positivos su valor esperado se expresa de la siguiente forma:

$$E(x) = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i} ; \quad 1, 2, \dots, n \quad \text{tal que } x_i > 0$$

- Media armónica: si existen $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ números positivos su valor esperado se expresa de la siguiente forma:

$$E(x) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i}} = \frac{1}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots + \frac{1}{x_n}}$$

- Intervalos de confianza: sea X una variable aleatoria cuya distribución depende de un parámetro θ , y sea una muestra aleatoria simple de X , se dice que T_1 y T_2 son estimadores totales que:

$$p[T_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq \theta \leq T_2(x_1, x_2, \dots, x_n)] = 1 - \alpha$$

Paso 2. Modelo estadístico para el riesgo ambiental.

Con base en lo anterior, la expresión algebraica para calcular el IRA es la siguiente:

$$RA = \sqrt[3]{(VSE)(EC)(VS)} \quad \text{tal que } 0 \leq IRA \leq 100$$

$$\text{y } SE \neq 0; EC \neq 0; VC \neq 0 \quad \rightarrow (1)$$

Donde:

- VSE es el Índice de vulnerabilidad social y económica.
- VC es el Índice de eventos climáticos.
- VS es el Índice de vulnerabilidad por sector.

¹ Las tasas que conforman el Riesgo Ambiental y sus derivados están en distinta simetría, para lo cual se utilizó la metodología del Banco Interamericano de Desarrollo en la construcción del Índice de Desarrollo Humano, dicha metodología consiste en lo siguiente en la aplicación de logaritmos sobre las variables que actúa sobre tal indicado, con la

aplicación de esta herramienta estadística se minimizan las distancias que existen entre cada una de las observaciones analizadas (EEMACCH, 2018).

Vulnerabilidad Social y Económica (VSE)

Mide el grado de no bienestar social y económico de los municipios, su expresión algebraica es:

$$VSE = \frac{7}{\frac{1}{TP} + \frac{1}{TI} + \frac{1}{TE} + \frac{1}{TS} + \frac{1}{TM} + \frac{1}{TC} + \frac{1}{TH}} \quad (2)$$

Donde:

Tasa de vulnerabilidad del ingreso familiar (TI)	$TI = \left[1 - \left(\frac{\lg(xi)}{\lg(\sum xi)} \right) \right] * 100$
Tasa de vulnerabilidad de los años de educación (TE)	$TE = \left[1 - \left(\frac{\lg(xi)}{\lg(\sum xi)} \right) \right] * 100$
Tasa de vulnerabilidad de vivienda en servicios básicos (TS)	$TS (100 - TVS)$ TVS es la tasa de vivienda con servicios.
Tasa de vulnerabilidad en migración (TM)	$TM = \left[1 - \left(\frac{\lg(xi)}{\lg(\sum xi)} \right) \right] * 100$
Tasa de vulnerabilidad en los hijos de familia (TH)	$TM = \left[\left(\frac{\lg(xi)}{\lg(\sum xi)} \right) \right] * 100$
Tasa de Pobreza (TP)	No se requiere cambio
Tasa de carencia en acceso a servicios de salud (TC)	No se requiere cambio

- x_i es el i-ésimo dato de variable analizada
- $\sum x_i$ es la suma de los datos de la variable analizada.

Vulnerabilidad Climática (VC)

Mide el grado de presencia de eventos climáticos en los municipios, su expresión algebraica es:

$$VC = MT + NT ; \quad 0 \leq IEC \leq 100 \quad \rightarrow \quad (3)$$

Donde:

- IM es la tasa de meteorológica ambiental
- IDN es la tasa de desastres naturales

La Tasa de Meteorológica Ambiental (MT) se obtiene de la siguiente forma:

$$MT = \left[50 - \sum_{i=1}^n x_i \right] ; \quad i = 1,2,3, \dots, n \quad \rightarrow \quad (3.1)$$

Tal que:

Tasa de temperatura máxima (Y ₁)	$Y_1 = \left[\left(\frac{\lg \lg (1 + y_i)}{\lg (45)} \right) \right] * 8.34$
Tasa de temperatura mínima (Y ₂)	$Y_2 = \left[1 - \left(\frac{\lg(1 + y_i)}{\lg(\sum y_i)} \right) \right] * 8.34$
Tasa de precipitación (Y ₃)	$Y_3 = \left[\left(\frac{\lg(1 + y_i)}{\lg(\sum y_i)} \right) \right] * 8.34$
Tasa de niebla (Y ₄)	$Y_4 = \left[\left(\frac{\lg(1 + y_i)}{\lg(\sum y_i)} \right) \right] * 8.34$
Tasa de granizo (Y ₅)	$Y_5 = \left[\left(\frac{\lg(1 + y_i)}{\lg(\sum y_i)} \right) \right] * 8.34$
Tasa de tormentas eléctricas (Y ₆)	$Y_6 = \left[\left(\frac{\lg(1 + y_i)}{\lg(\sum y_i)} \right) \right] * 8.34$

- y_i es el i-ésimo dato de variable analizada
- 45 es la temperatura máxima que se puede alcanzar
- $\sum y_i$ es la suma de los datos de la variable analizada

La Tasa de desastres naturales (NT) se obtiene de la siguiente forma:

$$NT = \left[\frac{\lg (1 + W_i)}{\lg \lg (Wt)} \right] * 50 \quad \rightarrow \quad (3.2)$$

Donde:

- W_i es el total de eventos de desastres naturales en el i-esimo municipio
- Wt es el máximo de eventos que se pueden presentar:

$$Wt = \left[(1.96) \left(\sqrt{\text{var}(w_i)} \right) + \underline{W}_i \right] \quad \rightarrow \quad (3.2.1)$$

Tal que:

- \underline{W}_i es el promedio de eventos naturales en el estado.
- $\sqrt{\text{var}(w_i)}$ es la desviación estándar de los eventos naturales en el estado.

Vulnerabilidad por Sector (VS)

Mide el grado de vulnerabilidad por sector productivo, en cada uno de los municipios de la entidad, y se calcula de la siguiente forma:

$$VS = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^n R_i \rightarrow (4)$$

Donde:

- R_i son los distintos sectores productivos de la entidad:

Tasa de vulnerabilidad en energía (R1)	$R1 = \left[1 - \left(\frac{\lg (r_i)}{\lg (\sum r_i)} \right) \right] * 100$
Tasa de vulnerabilidad en agricultura (R2)	$R2 = \left[\left(\frac{\lg (r_i)}{\lg (\sum r_i)} \right) \right] * 100$
Tasa de vulnerabilidad en ganadería (R3)	$R3 = \left[\left(\frac{\lg (r_i)}{\lg (\sum r_i)} \right) \right] * 100$
Tasa de vulnerabilidad en turismo(R4)	$R4 = \left[1 - \left(\frac{\lg (r_i)}{\lg (\sum r_i)} \right) \right] * 100$
Tasa de vulnerabilidad en salud (R5)	$R5 = \left[1 - \left(\frac{\lg (r_i)}{\lg (\sum r_i)} \right) \right] * 100$
Tasa de vulnerabilidad en el transporte (R6)	$R6 = \left[1 - \left(\frac{\lg (r_i)}{\lg (\sum r_i)} \right) \right] * 100$
Tasa de vulnerabilidad en la industria – comercio (R7)	$R7 = \left[1 - \left(\frac{\lg (r_i)}{\lg (\sum r_i)} \right) \right] * 100$
Tasa de vulnerabilidad del agua (R8)	$R8 = \left[1 - \left(\frac{\lg (r_i)}{\lg (\sum r_i)} \right) \right] * 100$
Tasa de vulnerabilidad de las ciudades (R9)	$R9 = \left[1 - \left(\frac{\lg (r_i)}{\lg (\sum r_i)} \right) \right] * 100$

- r_i es el i-ésimo dato de variable analizada
- $\sum r_i$ es la suma de los datos de la variable analizada.

Con base en lo anterior, ya se puede predecir el modelo de riesgo ambiental en la Zona Metropolitana de Tulancingo. Para el cálculo del modelo del riesgo ambiental se utilizan las siguientes expresiones algebraicas y sus derivadas:

$$VSE = \frac{7}{\frac{1}{TP} + \frac{1}{TI} + \frac{1}{TE} + \frac{1}{TS} + \frac{1}{TM} + \frac{1}{TC} + \frac{1}{TH}}$$

$$VC = MT + NT ; \quad MT = \left[50 - \sum_{i=1}^n Y_i \right];$$

$$NT = \left[\frac{\lg \lg (1 + W_i)}{\lg \lg (Wt)} \right] * 50 \quad y \quad Wt = \left[(1.96) \left(\sqrt{var(w_i)} \right) + W_i \right]$$

3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos a partir del análisis de los índices de Impacto Ambiental y Riesgo Ambiental para la Zona Metropolitana de Tulancingo muestran que los principales GEI que se emiten son CO₂, CH₄ y N₂O, y estos se emiten principalmente por fuentes como el transporte, la industria, servicios públicos, ganadería, uso de fertilizantes, entre otros. Así mismo se identificó que el grado de impacto ambiental en la ZM es moderado, sin embargo, se debe prestar especial atención al municipio de Tulancingo de Bravo ya que este tiene un nivel alto.

Tabla 4: Grado de impacto ambiental en las Zona Metropolitana de Tulancingo

Zona Metropolitana	Grado de impacto
ZM Tulancingo	Moderado impacto ambiental
Cuautepec de Hinojosa	Moderado impacto ambiental
Santiago Tulantepec	Moderado impacto ambiental
Tulancingo de Bravo	Alto impacto ambiental

Fuente: Elaboración propia.

El riesgo ambiental para la ZM es de un nivel moderado en el que se tomaron en cuenta los grados de vulnerabilidad económica y social, climática y por sector, siendo esta última la que tiene una mayor incidencia en el caso de los 3 municipios que integran la ZM.

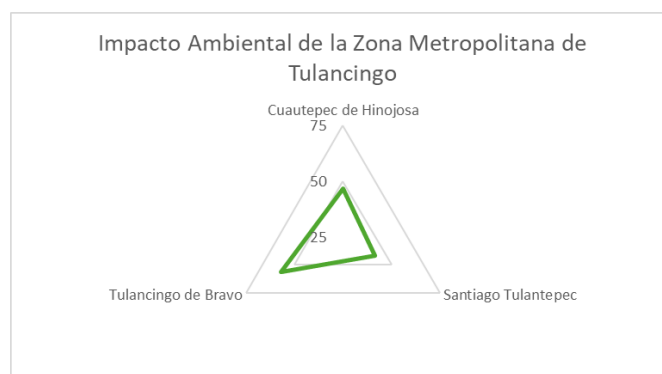


Figura 2: Impacto Ambiental en los municipios de la Zona Metropolitana de Tulancingo.

Fuente: Elaboración propia.

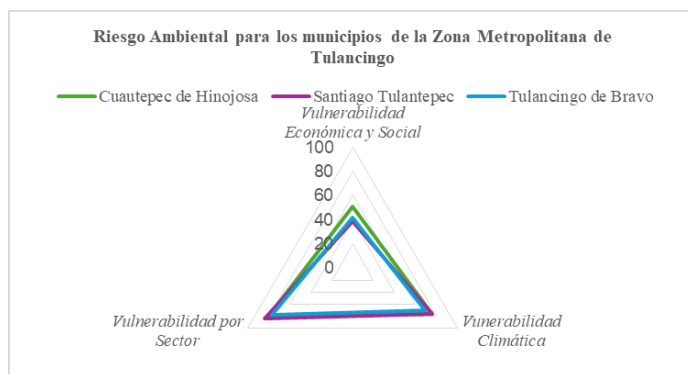


Figura 4: Riesgo ambiental en los municipios de las Zona Metropolitana de Tulancingo.

Fuente: Elaboración propia.

4. Conclusiones

El cambio climático representa un desafío global de gran complejidad, con efectos significativos en los sistemas económicos, sociales y ambientales de todos los países. En este contexto, el análisis realizado para la Zona Metropolitana de Tulancingo permite comprender la relación entre el crecimiento urbano y el aumento de la presión ambiental.

A través de la aplicación de una metodología adaptada de la Estrategia Estatal de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático (2018), se identificaron las principales fuentes de emisiones de GEI, así como los niveles de vulnerabilidad económica, social, sectorial y climática de la región. Los resultados muestran un impacto ambiental moderado y un riesgo ambiental que varía entre bajo y moderado, siendo Tulancingo de Bravo el municipio con mayores niveles en ambos indicadores.

Estos hallazgos proporcionan un insumo clave para la toma de decisiones en materia de planeación urbana, sustentabilidad y políticas públicas, permitiendo orientar acciones concretas de mitigación y adaptación al cambio climático en una región con alto potencial de desarrollo, pero también con creciente presión ambiental.

La información recopilada permite no solo caracterizar la situación ambiental actual de la Zona Metropolitana, sino también

identificar áreas prioritarias de intervención para mitigar el impacto ambiental. A pesar de ello, se reconoce la necesidad de mejorar la disponibilidad de datos locales, especialmente en los municipios de menor tamaño, para fortalecer la precisión de los análisis.

5. Referencias

- EEMACCH. (2018). Estrategia estatal de mitigación y adaptación ante el cambio climático de Hidalgo. Secretaría de Cultura. Gobierno del Estado de Hidalgo. Pachuca de Soto, México.
- IPCC. (1992). Climate Change 1992: The Supplementary Report to IPCC Scientific Assessment. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- López, S., Oliver, L., Guerrero, J., Cárdenas, R., Sámano, M. Vera, R., Estrada, B. (2020). Estrategia de mitigación y adaptación ante el cambio climático en el estado de Hidalgo, un modelo para la construcción de una agenda nacional ambiental. En el Premio Nacional de Investigación Social y de Opinión Pública 2020. Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública (CESOP), Cámara de diputados LXIV legislatura.
- López, S., Oliver, L., Guerrero, J. Oliver, L. & Bass, S. (2024). Agenda ambiental para focalizar acciones de intervención en las ciudades que componen las tres zonas metropolitanas del estado de Hidalgo: Pachuca, Tula y Tulancingo. Grañén Porrúa, grupo editorial. Pachuca de Soto, México.
- López, S., Guerrero, J., Bass, S. (2021). Construcción de estrategia de mitigación y adaptación al cambio climático municipal, caso de estudio Hidalgo, México. Universidad Nacional Autónoma de México.
- POEH. (2015, 16 de noviembre). Periódico Oficial del Estado de Hidalgo. Gobierno del Estado de Hidalgo. https://normateca.hidalgo.gob.mx/ver/2801f5d6-c8ba-4e13-8e96-86bd8384cea2_pdf
- Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano SEDATU, Secretaría General del Consejo Nacional de Población CONAPO, Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI. (2024). Metrópolis de México 2020. <https://www.gob.mx/sedatu/documentos/metropolis-de-mexico-2020?state=published>