

Gases efecto invernadero

como elementos explicativos de los casos de cáncer
en el estado de Hidalgo en el 2015

Greenhouse Gases
*as Explanatory Elements of Cancer Cases
in the State of Hidalgo in 2015*

Juan Bacilio Guerrero Escamilla y Sócrates López Pérez*

El presente trabajo estima las repercusiones que generan los gases efecto invernadero (partículas por millón, dióxidos de azufre y de carbono, óxidos de nitrógeno y nitroso, así como metano) sobre la salud pública de la población hidalguense a partir del diseño de un modelo que toma como referencia el valor esperado de casos de cáncer en cada uno de los municipios de la entidad en el 2015. Para lograr este objetivo, se construyó un modelo probabilístico, en el cual se estimó el grado de incidencia que tenía el óxido de nitrógeno sobre el número de casos de dicha enfermedad en el estado.

Palabras clave: gases efecto invernadero; enfermedades; modelos.

The present work estimates the repercussions generated by greenhouse gases (particles per million, sulphur and carbon dioxides, nitrogen and nitrous oxides, as well as methane) on the public health of the population of Hidalgo, based on the design of a model that takes as a reference the expected value of cancer cases in each of the municipalities of the entity in 2015. To achieve this objective, a probabilistic model was constructed, in which the degree of incidence that nitrogen oxide had on the number of cases of this disease in the state was estimated.

Key words: greenhouse gases; diseases; models.

Recibido: 12 de septiembre de 2019.

Aceptado: 3 de octubre de 2019.

*Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, guerreroescamilla@yahoo.com.mx y lopezsoc@gmail.com, respectivamente.



Planta de energía. Billowing humo en forma de cráneo / Freder/Getty/images

Introducción

El cambio climático (CC) es un fenómeno que, en las últimas cinco décadas, se ha intensificado y afecta a todo tipo de población, actividades y sistemas de vida. Hasta el momento, las diversas fuentes antropogénicas de generación de gases de efecto invernadero (GEI) siguen aportando grandes volúmenes de estos a la atmósfera: el dióxido de carbono (CO_2), el óxido nitroso (N_2O) y el metano (CH_4) son los que tienen mayor acumulación.

El último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) señala que en el periodo de 1983 al 2012 han sido los años más cálidos de los últimos 1 400 y que los datos muestran una tendencia lineal de crecimiento del calentamiento de 0.85 grados centígrados. Derivado de ello, hay un almacenamiento de energía de 90% que representa 1% de la acumulada en la atmósfera y el complemento de esta se guarda, sobre todo, en la superficie terrestre. Los GEI, a su vez, se han con-

centrado en los océanos, en una capa de 75 m, en un margen de temperatura entre 0.09 y 0.13 grados centígrados. Estos cambios en las superficies oceánicas han aumentado las precipitaciones, la salinidad y, con la intensificación del aumento del CO₂, su acidificación. El pH del agua ha disminuido, por lo cual, su acidez aumentó 26% por la alta concentración de iones de hidrógeno.

Entre 1970 y el 2010, el crecimiento de emisión de GEI ha sido de 78%: al final de ese lapso estaba en 49 Gt CO₂eq/año, con un margen de +/- 4.5, procedente de la utilización de combustibles fósiles y procesos industriales. En ese mismo periodo y bajo esta dinámica, se dio un crecimiento de la población y la economía, así como grandes cambios tecnológicos en el relevo de consumo de energías y consolidación de industrias (cemento, refinación de gasolinas y termoeléctricas). Estas modificaciones se han relacionado como causantes o factores determinantes del cambio climático, con sus impactos en los sistemas naturales y humanos, en los océanos y continentes y en todo fenómeno meteorológico, los cuales son sensibles a los cambios y se asocian a influencias humanas, disminuyendo las temperaturas extremas de frío, aumento de las cálidas, incremento del nivel del mar y cambios e intensidad en los ciclos de precipitación en diversas regiones.

Las consecuencias derivadas del CC no solo se dan sobre los sistemas ecológicos y medioambientales, de igual forma influyen sobre el agua y aire limpio, agua potable, producción de alimentos, vivienda segura, uso de suelo y, sobre todo, en la salud de los grupos humanos. La relación del CC con esta última tiene que ver con el incremento de 250 mil defunciones extras anuales al facilitar las condiciones de aumento de enfermedades, malnutrición, estrés calórico, desplazamientos de asentamientos a zonas más altas, incremento de los refugiados del CC y mayor incidencia de casos de afecciones cardiovasculares y respiratorias, asma y diversas alergias derivadas de las modificaciones en los niveles de polen y otros alérgenos. También, se relaciona con más de 60 mil muertes derivadas de eventos climáticos extremos y acrecentamiento

de enfermedades transmisibles. Con los cambios en el consumo de agua limpia y la higiene, las diarreas son más frecuentes; con las inundaciones, hay modificaciones en el patrón de desarrollo de plagas e incremento del tiempo de las estaciones de transmisión de enfermedades, sus vectores y desplazamiento geográfico a zonas afectadas (mosquitos *Aedes* y *Anopheles*, vectores del dengue y paludismo, respectivamente).

A consecuencia de ello, es necesario crear conocimiento que contribuya a explicar la relación entre el CC y el comportamiento de la morbilidad y mortalidad de la población, la localización de los grupos vulnerables y el tipo de afectaciones para, de esta forma, identificar las áreas de mayor afectación y diseñar planes y políticas públicas de intervención para la mitigación de los GEI y la adaptación y resiliencia de esos grupos. Bajo estas condiciones, hemos diseñado diversos modelos para la construcción de sistemas de indicadores para la toma de decisiones, los cuales son el antecedente del diseño del presente modelo probabilístico, cuya finalidad es estimar la dinámica del valor esperado del número de casos de cáncer que se presentaron en el 2015 en uno de los municipios del estado de Hidalgo, México, tomando como referencia las cantidades de toneladas de GEI emitidas por la actividad productiva antropogénica de esta región.

El presente trabajo propone que la construcción de un modelo probabilístico (bajo herramientas matemáticas y estadísticas) aporta elementos de explicación y relación de los efectos derivados de los GEI sobre la salud humana; en este caso, sobre el valor esperado de casos de cáncer en el estado de Hidalgo.

Planteamiento del problema

Diseñar un modelo que relacionara la morbilidad (cáncer) de la población con los GEI en una misma región, implicó el desarrollo de un primer modelo de análisis para conocer los volúmenes de gas emitido. Esta primera etapa de investigación definió

la línea base (LB) de emisión siguiendo el modelo del IPCC, así como la creación de una base de datos por cada fuente antropogénica ubicada a nivel municipal que, a su vez, cuantificara la emisión por factor de cada gas y lo sistematizara por cuantiles. Esto nos llevó al diseño de un simulador que, al correrlo con datos reales (y un sustento *ceteris paribus*) bajo *software* estadístico (*R*), definió el balance de emisiones para integrarlo al Sistema de Indicadores Ambientales (SIAv.0) y conocer, así, el Índice de Impacto Ambiental (IIA). Junto al SIA se desarrolló otro modelo matemático para la construcción del Indicador de Riesgo (IR), que facilitó el diseño de la Estrategia Estatal de Mitigación y Adaptación ante el Cambio Climático (EEMYACC) en Hidalgo. El IR facilitó el conocimiento de las regiones, el inventario de GEI y los niveles de vulnerabilidad de su población. Estos elementos son los antecedentes para el diseño del modelo probabilístico que define el algoritmo de morbilidad y emisiones de GEI.

El estado de Hidalgo se localiza en la región centro-oriente de la República Mexicana; cuenta con una población de 2 858 359 habitantes y se integra por 84 municipios. Su Producto Interno Bruto (PIB) representa 1.6% con respecto al total nacional, donde sus sectores económicos dominantes son la agroindustria, el turismo, la construcción, las energías renovables, las industrias textil y logística, los servicios profesionales, la investigación e innovación y las tecnologías de la información (Secretaría de Economía, 2016).

El sector secundario cuenta con una infraestructura productiva formada por 13 parques industriales y tecnológicos (Secretaría de Economía, 2016) distribuidos a lo largo del territorio de Hidalgo (ver cuadro 1).

Estos parques están concentrados, sobre todo, en la zona Tula-Tepeji, que está integrada por los municipios de Atitalaquia, Tula de Allende, Mixquiahuala, Atotonilco de Tula, Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Tepeji del Río de Ocampo, con industrias que se establecieron en la región en diversas etapas desde la década de los 60 y que, en la

Cuadro 1

Parque industrial	Fraccionamiento industrial
Atitalaquia.	El Manantial.
Tula-Atitalaquia.	
Tepeji del Río de Ocampo.	
Metropolitano.	
Platah.	
Bicentenario/QUMA.	
Tizayuca.	
La Reforma.	
Sahagún-Tepeapulco.	
Sahagún, AC.	
Huejutla Siglo XXI	

Fuente: resumen de la Secretaría de Economía (con datos del 2016), México, 2019.

actualidad, son de las más importantes de México, como las cementeras Fortaleza, Cemex, Cruz Azul y Tolteca; la central termoeléctrica Francisco Pérez Ríos de ciclo combinado en Tula de Allende de la Comisión Federal de Electricidad; la refinería Miguel Hidalgo de Petróleos Mexicanos (PEMEX) y la industria química de apoyo a refinados.

A su vez, el IPCC las ha catalogado, a nivel internacional, como las fuentes generadoras de los principales GEI, cuyo aporte ha derivado en el fenómeno del CC. Para el caso del estado de Hidalgo y de la zona centro de México, son los agentes antropogénicos fundamentales, que están generando el aporte más importante en el país.

En un primer trabajo de investigación sobre la composición de los GEI en Hidalgo (*Plan Estatal de Acción ante el Cambio Climático en Hidalgo*), se encontró que la LB de generación de GEI está compuesta por emisiones de N₂O, dióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x),¹ alcanzando en el 2015 más de 1 500 toneladas; esto

¹ Los NO_x son una mezcla entre el monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂), donde el primero es un gas incoloro y no inflamable, pero inodoro y tóxico, en tanto que el segundo es un gas pardo-rojizo, no inflamable pero sí tóxico y se identifica por un olor muy asfixiante (Carnicer, 2006). Son sustancias que provocan enrojecimiento y quemaduras cutáneas. La inhalación de estos gases en altas concentraciones da origen a dolores de cabeza, mareo, dificultades para respirar, temblores, confusión y zumbido en los oídos. Una exposición más alta puede causar edemas pulmonares; sin embargo, en la actualidad no se tiene la suficiente evidencia científica de que son causantes de cáncer.

representó 55% de los gases emitidos en toda la entidad (López y Guerrero; 2018).

El aporte de emisiones de GEI de Hidalgo en unidades de bióxido de carbono equivalente (CO₂eq) fue de 709 005.3 Gg² (Otazo-López; 2010) y el desglose por gas fue: CO₂, 492 862.2 Gg (69.51%); CH₄, 185 390.9 Gg (26.14%); N₂O, 20 511.7 Gg (2.89%); y el restante 1.46%, de 9 586.4 Gg de hidrofluorocarbonos (HFC) y 654.1 Gg de hexafluoruro de azufre (SF₆).³

El CO₂ originado por la quema de combustibles, en la categoría *Energía*, es la emisión más sobresaliente de los GEI, con 19 636.09 Gg, del total de 30 504.12 Gg de CO₂eq que se genera en el estado, siendo la mayor fuente la termoeléctrica Francisco Pérez Ríos de Tula. Esta categoría también es responsable de la mayor emisión de SO₂, derivado de la quema de combustóleo para el calentamiento de las calderas (Otazo-López, 2010).

La de *Procesos industriales* ocupa el segundo lugar, en parte por las altas emisiones de compuestos orgánicos volátiles (calculadas en 818.38 Gg) y por el CO₂ (4 631.66 Gg), por la fabricación de cemento, cal y mineral de manganeso, que son actividades sustantivas en Hidalgo. La de *Desechos* se ubica en el tercer sitio, debido en especial a la emisión de CH₄ (245.56 Gg), que equivale a 5 156.76 Gg de CO₂eq.

2 El gigagramo es un múltiplo decimal de la unidad base de masa del Sistema Internacional de Unidades (SIU): 1 Gg = 10⁹ g = 10⁶ kg, que nos sirve como unidad para establecer las equivalencias de los GEI a CO₂eq.

3 El dióxido de carbono equivalente es una medida que establece la composición de la huella de carbono que emite cualquier fuente; se mide en toneladas y está formado por los GEI. El CO₂eq se crea mediante la conversión equivalente de cada gas multiplicado por la masa del gas de equivalencia y por su potencial de calentamiento global (PCG). Tomado de: Table 8.A.1; Radiative efficiencies (REs), lifetimes/adjustment times, AGWP and GWP values for 20 and 100 years, and AGTP and GTP values for 20, 50 and 100 years. Climate-carbon feedbacks are included for CO₂ while no climate feedbacks are included for the other components (see discussion in Sections 8.7.1.4 and 8.7.2.1, Supplementary Material and notes below the table; Supplementary Material Table 8.SM.16 and references therein. P. 731. Myhre, G.; D. Shindell; F.-M. Bréon; W. Collins; J. Fuglestedt; J. Huang; D. Koch; J.-F. Lamarque; D. Lee; B. Mendoza; T. Nakajima; A. Robock; G. Stephens; T. Takemura and H. Zhang. "Anthropogenic and Natural Radiative Forcing Supplementary Material", in: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. // Stocker, T. F.; D. Qin; G.-K. Plattner; M. Tignor; S. K. Allen; J. Boschung; A. Nauels; Y. Xia; V. Bex and P. M. Midgley (eds.). 2013 (DE) www.climatechange2013.org and www.ipcc.ch

Estos cuatro gases compilan un total neto de 30 504.12 Gg en unidades de CO₂eq; en realidad, las emisiones totales, sin considerar los sumideros, es de 31 640.78 Gg CO₂eq. De manera similar a los resultados del inventario nacional, en Hidalgo el comportamiento del sector *Energía* es la mayor fuente de emisiones de unidades equivalentes de CO₂; en orden de aporte le siguen *Desechos* y *Procesos industriales*. La emisión debida al cambio de uso de suelo y quema de bosques es pequeña (López-Guerrero; 2018).

Bajo ese contexto, el objetivo central de este trabajo es la estimación de las repercusiones que generan los GEI (PPM, SO₂, CO₂, NO_x, CH₄ y N₂O)⁴ de tales industrias sobre la salud pública de la población hidalguense, tomando como referencia el valor esperado de casos de cáncer en cada uno de los municipios de la entidad, bajo la LB del 2015. La expresión matemática es:

$$E[Y_c] = f(PPM, SO_2, CO_2, NO_x, CH_4, N_2O), \quad (1)$$

donde:

$E[Y_c]$ = valor esperado del número de casos con cáncer.

PPM = partículas por millón en miles de toneladas.

SO_2 = dióxido de azufre en miles de toneladas.

CO_2 = dióxido de carbono en miles de toneladas.

NO_x = óxidos de nitrógeno en miles de toneladas.

CH_4 = metano en miles de toneladas.

N_2O = óxido nitroso en miles de toneladas.

4 La información de los gases efecto invernadero se obtuvo del inventario diseñado por la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) en el proyecto EEMYACC para el diseño de la política pública ambiental en Hidalgo y con recursos obtenidos en la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) mediante contrato núm. SEMARNATH/DJ/0031/2014, que fueron transferidos a la SEMARNAT del gobierno de la entidad, el cual, en la administración 2017-2022, fue integrada a la plataforma para la construcción de la EEMYACC-H. La inclusión de estos gases (PPM, SO₂, CO₂, NO_x, CH₄ y N₂O) dentro del modelo se deriva de la presencia que tienen en las regiones de Hidalgo y su relación con las fuentes más importantes (termoeléctricas, refinerías, cementeras, industria química, aguas residuales y vehículos con motores de combustión interna) y porque, a su vez, las emisiones presentan la mayor relación de exposición ante poblaciones humanas (López y Guerrero, 2017).

Es de suma importancia decir que no hay diferencia alguna en distinguir si un cáncer u otro son resultado del CC; sin embargo, las contribuciones de las causas ambientales están determinadas por la incidencia geográfica y temporal. No obstante, se ha estimado que los factores ambientales explican 31% de la carga global de las enfermedades de cáncer de pulmón; en el caso de la leucemia, se ha asociado a agentes químicos, es decir, suele aparecer en la población que está en contacto con sustancias inhalables y tóxicas como el benceno y etileno. De forma general, 19% de todos los casos de cáncer son atribuibles a factores ambientales (Instituto de Salud Carlos III, 2007).

Metodología

Para conocer las repercusiones que producen los GEI sobre la salud humana (detonante de algún cáncer) en el estado de Hidalgo, se desarrolló un modelo probabilístico en cuatro fases (Díaz, 1994):

1. Especificación del modelo. Se determinan tanto las variables *respuesta* y *explicativas* que intervienen en el fenómeno a partir de recomendaciones teóricas de cada caso particular; aunado a esto, se procede a la búsqueda de datos mediante la consulta de distintas fuentes de información.
2. Estimación de parámetros. Se procede a su cálculo, lo cual requiere de métodos probabilísticos e hipótesis del comportamiento del fenómeno.
3. Viabilidad del modelo. Se realiza la evaluación de la eficiencia de los parámetros, es decir, si su estimación es teóricamente significativa y estadísticamente satisfactoria.
4. Interpretación de resultados. Se predice el comportamiento del fenómeno a partir de la lectura que se tiene de los parámetros estimados.

Aplicación y resultados

En este apartado se obtienen los pronósticos acerca del comportamiento de los casos de cáncer en

el estado de Hidalgo. Se parte del cumplimiento de las cuatro fases planteadas en la metodología.

Especificación del modelo

Partiendo de la expresión algebraica (1), la regresión del valor esperado de casos de cáncer en la entidad está dada por (Tusell, 2007):

$$E[\hat{Y}_c] = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \ln(PPM) + \hat{\beta}_2 \ln(SO_2) + \hat{\beta}_3 \ln(CO_2) + \hat{\beta}_4 \ln(NO_x) + \hat{\beta}_5 \ln(CH_4) + \hat{\beta}_6 \ln(N_2O) + U_i \quad (2)$$

donde:

$E[\hat{Y}_c]$ = valor esperado estimado del número de casos con cáncer.

$\hat{\beta}_i$ = parámetros por estimar, tal que $i = 1, 2, 3, 4, 5$ y 6 .

U_i = margen de error que no explica la relación lineal del modelo.

Todo esto bajo el cumplimiento de los siguientes supuestos (Freund y Miller, 1999):

- Linealidad entre las variables *respuesta* y *explicativas*.
- Los U_i deben aproximarse a una distribución normal.
- Los U_i deben ser homocedásticos.
- Los U_i no deben estar correlacionados.
- No colinealidad entre las variables explicativas.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en el 2015 se registraron 34.38 casos de cáncer por cada 100 mil habitantes en Hidalgo, es decir:

$$34.38 = \left[\frac{E[Y_c]}{PT} \right] * 100\ 000 \quad (3)$$

donde:

- PT = población total en la entidad.

Por lo tanto:

$$E[Y_c] = \left(\frac{34.38 * 2\,878\,366}{100\,000} \right) = 989.58 \sim 990$$

(4)

Se sabe que la población total en ese año fue de aproximadamente 2 878 366 habitantes, esto personifica 990 casos de cáncer en toda la entidad; para ver su distribución a partir de la proporción poblacional de cada uno de los 84 municipios, se generó el cuadro 2.

Cuadro 2

Valor esperado del número de casos con cáncer por municipio

Continúa

Municipio	Y_c	Municipio	Y_c
Acatlán	7	Nicolás Flores	2
Acaxochitlán	15	Nopala de Villagrán	6
Actopan	20	Omitlán de Juárez	3
Agua Blanca de Iturbide	3	San Felipe Orizatlán	14
Ajacuba	6	Pacula	2
Alfajayucan	7	Pachuca de Soto	93
Almoloya	4	Pisa Flores	6
Apan	15	Progreso de Obregón	8
El Arenal	6	Mineral de la Reforma	58
Atitalaquia	10	San Agustín Tlaxiaca	12
Atlapexco	7	San Bartolo Tutotepec	6
Atotonilco de Tula	12	San Salvador	12
Atotonilco el Grande	10	Santiago de Anaya	6
Calnali	6	Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero	12
Cardonal	7	Singuilucan	5
Cuautepec de Hinojosa	21	Tasquillo	6
Chapantongo	4	Tecoautla	13
Chapulhuacán	8	Tenango de Doria	6
Chilcuautla	6	Tepeapulco	18
Eloxochitlán	1	Tepehuacán de Guerrero	10
Emiliano Zapata	5	Tepeji del Río de Ocampo	30
Epazoyucan	5	Tepetitlán	4
Francisco I. Madero	13	Tetepango	4
Huasca de Ocampo	6	Villa de Tezontepec	4
Huautla	8	Tezontepec de Aldama	18
Huazalingo	5	Tianguiستengo	5
Huehuetla	8	Tizayuca	44
Huejutla de Reyes	44	Tlahuelilpan	6
Huichapan	16	Tlahuiltepa	3
Ixmiquilpan	33	Tlanalapa	4
Jacala de Ledezma	5	Tlanchinol	13

Valor esperado del número de casos con cáncer por municipio

Municipio	Y_c	Municipio	Y_c
Jaltocán	4	Tlaxcoapan	10
Juárez Hidalgo	1	Tolcayuca	5
Lolotla	3	Tula de Allende	38
Metepec	4	Tulancingo de Bravo	57
San Agustín Metzquitlán	3	Xochiatipan	7
Metztitlán	8	Xochicoatlán	3
Mineral del Chico	3	Yahualica	8
Mineral del Monte	5	Zacualtipán de Ángeles	13
La Misión	4	Zapotlán de Juárez	7
Mixquiahuala de Juárez	16	Zempoala	16
Molango de Escamilla	4	Zimapan	14

Fuente: elaboración propia con base en el SIAv.0 y el inventario de aporte GEI a nivel municipal (López-Guerrero, 2018).

Estimación de parámetros

Las variables CO_2 , NO_x y N_2O están altamente correlacionadas con Y_c (ver cuadro 3) (Cuadras, 2012).

A partir de esta correlación, la expresión algebraica del modelo sería la siguiente:

$$E[\hat{Y}_c] = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \ln(CO_2) + \hat{\beta}_2 \ln(NO_x) + \hat{\beta}_3 \ln(N_2O) + U_i$$

(5)

Partiendo de la expresión (5) se obtiene la primera corrida del modelo (ver cuadro 4).

Con un nivel de confianza $(1 - \alpha)$ de 0.95 y uno de significancia (α) de 0.05, la variable CO_2 no es explicativa dentro del modelo, pues su P -valor es mayor a 0.05. Bajo este contexto, CO_2 tiene que salir del modelo (ver cuadro 4). Mediante las transformaciones *Box-Cox*⁵ y sacando la variable CO_2 , se obtiene la segunda corrida (ver cuadro 5).

⁵ Sirven para corregir los problemas de no normalidad y heterocedasticidad de los U_i (Castaño, 2011).

Cuadro 3

Matriz de correlación de las variables

Y_c	0.39	0.39	0.62	0.68	0.18	0.48
0.39	PPM	0.87	0.80	0.83	0.64	0.80
0.39	0.87	SO_2	0.86	0.83	0.47	0.69
0.62	0.80	0.86	CO_2	0.95	0.50	0.79
0.68	0.83	0.83	0.95	NO_x	0.52	0.85
0.18	0.64	0.47	0.50	0.52	CH_4	0.69
0.48	0.80	0.69	0.79	0.85	0.60	N_2O

Fuente: elaboración propia con base en el SIAv.0 y el inventario de aporte GEI a nivel municipal, con resultados en R , según el propio modelo diseñado (López-Guerrero, 2019).

Cuadro 4

Primera corrida del modelo

```
Call:
lm(formula = Yc ~ CO2 + NOX + N2O, data = data.frame(Ejer1))
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-28.369  -4.836   -0.881    2.957   50.443

Coefficients:
            Estimate Std. Error  t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -68.513    11.068   -6.190 2.43e-08 ***
CO2           -3.343     2.279   -1.467 0.146339
NOX           14.991     2.863    5.236 1.30e-06 ***
N2O           -4.087     1.086   -3.763 0.000318 ***

Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Residual standard error: 9.881 on 80 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5463, Adjusted R-squared:  0.5293
F-statistic: 32.11 on 3 and 80 DF, p-value: 9.993e-14
```

Fuente: elaboración propia con base en resultados en R, según el propio modelo diseñado (Guerrero, E., J. Bacilio, 2019).

Cuadro 5

Segunda corrida del modelo

```
Call:
lm(formula = log(Yc) ~ NOX + N2O, data = data.frame(Ejer1))
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.15214 -0.37163  0.02123  0.34672  1.01322

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -3.69590    0.57744  -6.400 9.43e-09 ***
NOX          0.57010    0.08280   6.885 1.12e-09 ***
N2O         -0.10898    0.06227  -1.750  0.0839 .
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Residual standard error: 0.568 on 81 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5672, Adjusted R-squared:  0.5565
F-statistic: 53.07 on 2 and 81 DF, p-value: 1.869e-15
```

Fuente: elaboración propia con base en resultados en R, según el propio modelo diseñado (Guerrero E., J. Bacilio, 2019).

Con un nivel de confianza $(1 - \alpha)$ de 0.95 y el de significancia (α) de 0.05, la variable N_2O no es explicativa dentro del modelo, pues su P -valor es mayor a 0.05, por lo tanto, debe salir del modelo (ver cuadro 6).

Con un nivel de confianza $(1 - \alpha)$ de 0.95 y uno de significancia (α) de 0.05, la variable NO_x es explicativa dentro del modelo, pues su P -valor es inferior a 0.05, esto ocurre de igual forma con el intercepto. Bajo este contexto, la ecuación lineal del modelo sería de la siguiente forma:

$$\ln(E[\hat{Y}_c]) = -3.763 + 0.447 \ln(NO_x); U_i \sim 0$$

La expresión algebraica (6) tiene un coeficiente de determinación de 0.5453, es decir, la ecuación lineal del modelo de casos de cáncer conserva 54.53% de la variabilidad de los datos.

Viabilidad del modelo

Aunado a lo anterior, el presente modelo debe cumplir con los siguientes supuestos (Carollo, 2012):

Cuadro 6

Tercera corrida del modelo

```
Call:
lm(formula = log(Yc) ~ NOX, data = data.frame(Ejer1))
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.95551 -0.44738 -0.06758  0.38504  1.12723

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -3.76266    0.58338   -6.45 7.32e-09 ***
NOX          0.44743    0.04462   10.03 6.60e-16 ***

Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.5751 on 82 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5508, Adjusted R-squared:  0.5453
F-statistic: 100.5 on 1 and 82 DF,  p-value: 6.602e-16
```

Fuente: elaboración propia con base en resultados en *R*, según el propio modelo diseñado (Guerrero, E., J. Bacilio, 2019).

- Linealidad entre las variables *respuesta* y *explicativas*. Mediante un análisis de varianza se puede ver la existencia de una relación lineal entre el número de casos de cáncer $\ln(E[\hat{Y}_c])$ y el NO_x en miles de toneladas, pero con un *P*-valor inferior a 0.05 (ver cuadro 7).
 - Los U_i deben aproximarse a una distribución normal a través de la prueba Kolmogorov (ver cuadro 8).
Planteando la prueba de hipótesis:
 H_0 : U_i - normalidad vs. H_a :
 U_i - no normalidad
- Si *P*-valor es menor a 0.05, se rechazaría H_0 . El *P*-valor (0.4749) de los U_i es mayor a 0.05, por lo tanto, no se rechaza H_0 , es decir, los U_i se aproximan a una distribución normal.
- Los U_i deben ser homocedásticos mediante la prueba Breush-Pagan (ver cuadro 9).
Planteando la prueba de hipótesis:
 H_0 : U_i - homocedásticos vs. H_a :
 U_i - heterocedasticidad
Si *P*-valor es menor a 0.05, se rechazaría H_0 . El *P*-valor (0.885) de los U_i es mayor a

Cuadro 7

Análisis de varianza

```
Analysis of Variance Table

Response: log(Yc)
          Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
NOX         1  33.254   33.254  100.54 6.602e-16 ***
Residuals  82  27.122    0.331
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Fuente: elaboración propia con base en resultados en *R*, según el propio modelo diseñado (Guerrero, E., J. Bacilio, 2019).

Cuadro 8

Prueba de normalidad

```
Lilliefors (Kolmogorov-Smirnov) normality test
data: modelo3$residuals
D = 0.066572, p-value = 0.4749
```

Fuente: elaboración propia con base en resultados en *R*, según el propio modelo diseñado (Guerrero, E., J. Bacilio, 2019).

0.05, por lo tanto, no se rechaza H_0 (los U_i son homocedásticos).

- Los U_i no deben estar correlacionados a través de la prueba Durbin-Watson (ver cuadro 10).

Planteando la prueba de hipótesis:

H_0 : U_i - no correlación vs. H_a : U_i - correlación

Si P -valor es menor a 0.05, se rechazaría H_0 . El P -valor (0.2424) de los U_i es mayor a 0.05, por lo tanto, no se rechaza H_0 , es decir, los U_i no están correlacionados.

Partiendo de la expresión algebraica (6), la ecuación que predice la dinámica del cáncer a través de la variable NO_x sería la siguiente:

$$\ln(E[\hat{Y}_c]) = -3.763 + 0.447 \ln(NO_x) \quad (7)$$

Despejando $\ln(E[\hat{Y}_c])$:

$$E[\hat{Y}_c] = \exp\{-3.763 + 0.447 \ln(NO_x)\} \quad (8)$$

Por lo tanto:

$$E[\hat{Y}_c] = 0.023e^{0.447 \ln(NO_x)} \quad (9)$$

Con un nivel de confianza $(1 - \alpha)$ de 0.95, uno de significancia (α) de 0.05 y con el cumplimiento de los supuestos de inferencia, la ecuación (9) predice en 54.53% el número de casos de cáncer en el estado de Hidalgo.

Interpretación de resultados

Partiendo de la ecuación (9), la función de distribución de probabilidad (grado de riesgo) del número de casos de cáncer sería la siguiente:

$$P(E[\hat{Y}_c]) = \int 0.023e^{0.447 \ln(NO_x)} dNO_x; \quad 0 \leq P(E[\hat{Y}_c]) \leq 1 \quad (10)$$

Resolviendo la integral:

$$P(E[\hat{Y}_c]) = 0.05e^{0.447 \ln(\overline{NO}_x)} \quad (11)$$

donde:

- En la media que $P(E[\hat{Y}_c]) \sim 1$, mayor riesgo de contraer cáncer.
- \overline{NO}_x son los óxidos de nitrógeno promedio, los cuales se calculan de la siguiente forma:

$$\overline{NO}_x = \frac{NO_x}{\text{Población total}} \quad (11.1)$$

Con base en lo anterior, los resultados fueron los siguientes (ver gráfica): los municipios de Tula de Allende, Atotonilco de Tula y Tepeji del Río presentaron altos casos de cáncer (61, 32 y 32, respectivamente) con altas probabilidades

Cuadro 9

Prueba de homocedasticidad

Studentized Breusch-Pagan test
data: modelo3
BP = 0.020925, df = 1, p-value = 0.885

Fuente: elaboración propia con base en resultados en R , según el propio modelo diseñado (Guerrero E., J. Bacilio, 2019).

Cuadro 10

Prueba de no correlación

Durbin-watson test
data: modelo3
DW = 1.8481, p-value = 0.2424

Fuente: elaboración propia con base en resultados en R , según el propio modelo diseñado (Guerrero E., J. Bacilio, 2019).

Scatterplot de riesgo y de casos estimados de cáncer en el estado de Hidalgo

Fuente: elaboración propia con base en resultados en *R*, según el propio modelo diseñado (Guerrero E., J. Bacilio, 2019).

de riesgo (0.741, 0.658 y 0.435, cada uno); este comportamiento obedece, en gran medida, a los siguientes aspectos: los tres municipios se distinguen por la existencia de un parque industrial, en el cual, predominan la termoeléctrica, la refinería de hidrocarburos y las cementeras, donde la producción de estas plantas se sustenta en los residuos sólidos y en la quema de combustible fósil.

En el municipio de Pachuca (capital del estado) se presentó un bajo riesgo de contraer cáncer (0.287) a través de los NO_x , ya que mostró moderados casos (35). Es de suma importancia destacar que el municipio contaba con aproximadamente 271 mil habitantes, esto representaría 13 casos de cáncer por cada 100 mil pobladores; aunado a esto,

su actividad económica se sustenta en el comercio y la educación, por lo tanto, implica la circulación de una gran cantidad de vehículos, los cuales son emisores de los NO_x .

Eloxochitlán presentó moderado riesgo de que su población contraiga cáncer (0.423) a través de los NO_x , con pocos casos de cáncer (7). Con base en el informe emitido por la SEMARNAT en Hidalgo, las principales fuentes emisoras de GEI en este municipio son la ganadería bovina, granjas de producción avícola y las aguas residuales, las cuales emitieron, en promedio, 355 mil toneladas de NO_x . Esto define un gran impacto con base en la relación proporcional de habitantes (3 mil, en el 2015) y el tamaño de la población del municipio (López y Guerrero, 2016).

El resto de los municipios presentó baja probabilidad de riesgo, pues mostró pocos casos; esto se debe, en gran medida, a la baja cantidad de emisiones de NO_x . Bajo el contexto del presente modelo y a través de sus resultados, se puede observar que los municipios con mayor emisión de NO_x son aquellos donde están asentadas las industrias cementera, termoeléctrica, refinación de hidrocarburos y química.

Conclusiones

El aporte fundamental del presente trabajo radica en tres vertientes: la primera, en relación con el grado de incidencia que tiene el medio ambiente sobre la salud pública; segunda, la importancia que tienen los modelos matemáticos y estadísticos para la predicción de enfermedades; y tercera, la estimación de una ecuación matemática que predice las dinámicas del valor esperado de casos de cáncer en el estado de Hidalgo a partir de los GEI.

Con el desarrollo del presente modelo se pudo comprobar que los GEI son detonantes de las enfermedades cancerígenas y, en particular, los NO_x , los cuales tienen como principales fuentes emisoras a los equipos, maquinarias e industrias que consumen y transforman la energía fósil (petróleo, gasolinas, diésel, etc.). El grado de correlación que existe entre el valor esperado de casos de cáncer $\ln(E[\hat{Y}_c])$ y los NO_x es de 0.68, es decir, a mayor emisión de óxidos de nitrógeno, mayor será el número de casos de cáncer en el estado de Hidalgo. No obstante, en la actualidad no existe mucha evidencia científica de que los NO_x sean causantes de algún tipo de cáncer, por tal motivo, el presente trabajo da los elementos necesarios para que se desarrollen posteriores investigaciones en las cuales se compruebe (desde el contexto de la salud pública y medio ambiente) el grado de asociación que existe entre ambos fenómenos.

Para poder explicar la relación que hay entre el medio ambiente y la salud, los modelos matemáticos y estadísticos se convierten en la herramienta a

utilizar, pues sus objetivos primordiales son describir, estimar y predecir el comportamiento de una enfermedad a partir de determinados factores que inciden en ella y, con ello, tomar decisiones.

Con el desarrollo del presente modelo se pudo obtener una ecuación matemática (9), la cual explica en 54.53% la dinámica del valor esperado de casos de cáncer en la entidad a partir de la cantidad de GEI en toneladas que emiten los vehículos que utilizan combustibles fósiles y las productoras de cemento que utilizan en sus procesos diversos tipos de combustible. A partir de esta ecuación se pudo estimar que los municipios de Tula de Allende, Atotonilco de Tula y Tepeji del Río presentan mayor probabilidad de riesgo, es decir, los habitantes de cualquiera de estos lugares tienen una gran posibilidad de desarrollar una enfermedad cancerígena debido a las altas emisiones de NO_x por parte de estas fuentes antropogénicas.

Prospectiva

Aunado a los problemas de cáncer que se han presentado en Hidalgo, las enfermedades respiratorias tienen gran predominio en la entidad —que se pueden vincular con la contaminación atmosférica (OMS; 2017)—, pues la tasa de incidencia en el 2015 fue de 678.8 casos por cada 100 mil habitantes; sin embargo, en el presente trabajo de investigación solo se analizan los casos de cáncer que se han presentado en la entidad. En un futuro se buscaría construir otro modelo en el cual se pueda identificar el GEI de mayor predominio sobre este tipo de enfermedades.

Fuentes

- Berberian, G. y M. Rosanova. *Impacto del cambio climático en las enfermedades infecciosas*. Argentina, 2012 (DE) www.scielo.org.ar/pdf/aap/v110n1/v110n1a09.pdf
- Carollo, C. *Regresión lineal simple*. España, 2012 (DE) http://eio.usc.es/eipc1/BASE/BASEMASTER/FORMULARIOS-PHP-DPTO/MATERIALES/Mat_50140116_Regr_%20simple_2011_12.pdf

- Carnicer, J. *Contaminación atmosférica*. España, 2006 (DE) file:///C:/Users/Bacilio/Downloads/componente45257.pdf
- Castaño, E. *Una estimación no paramétrica y robusta de la transformación Box-Cox para el modelo regresión*. Colombia, 2011 (DE) <http://www.scielo.org.co/pdf/le/n75/n75a5.pdf>
- Cuadras, C. *Nuevos métodos de análisis multivariante*. España, CMC Editions, 2012.
- Cuadros Cagua, T. A. "El cambio climático y sus implicaciones en la salud humana", en: *Ambiente y Desarrollo*. 21(40), 2017, pp. 157-171 (DE) <https://doi.org/10.11144/Javeriana.ayd21-40.ccis>
- Díaz, M. *Metodología de la investigación econométrica*. España, Universidad de Oviedo, 1994.
- Dirección General de Salud Pública, Calidad e Innovación. *Impactos del cambio climático en la salud. Informes, estudios e investigación 2013*. Madrid, Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad, 2010, pp. 169-177.
- Freund, J. e I. Miller. *Estadística matemática con aplicaciones*. Estados Unidos de América, Prentice Hall, 1999.
- González Sánchez, Yamilé; Yaima Fernández Díaz y Tania Gutiérrez Soto. "El cambio climático y sus efectos en la salud", en: *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*. 51 (3). La Habana, Cuba, 2013, pp. 331-337.
- Instituto de Salud Carlos III. *Evaluación de impacto en salud y medio ambiente*. España, Agencia de Evaluación de Tecnologías Sanitarias, 2007.
- IPCC. *Cambio climático 2014: Informe de síntesis*. Ginebra, Suiza, IPCC, 2014, 157 pp.
- _____. "Summary for Policymakers", in: Edenhofer, O.; R. Pichs-Madruga; Y. Sokona; E. Farahani; S. Kadner; K. Seyboth; A. Adler; I. Baum; S. Brunner; P. Eickemeier; B. Kriemann; J. Savolainen; S. Schlömer; C. von Stechow; T. Zwickel and J. C. Minx (eds.). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2014.
- Ize Lema, Irina. "El cambio climático y la salud humana", en: *Gaceta Ecológica*. Núm. 65, octubre-diciembre. Distrito Federal, México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002, pp. 43-52 (DE) <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=53906503>
- López, Sócrates y Juan Bacilio Guerrero. *Estrategia de mitigación y adaptación ante el cambio climático*. México, Gobierno del Estado de Hidalgo, 2018.
- Malagón-Rojas, Jeadran N.; Carolina F. Garrote-Wilches y Paola A. Castilla-Bello. "Cambio climático y salud humana: una revisión desde la perspectiva colombiana", en: *Revista Salud Uninorte*. Vol. 33, núm. 2, 2017.
- OMS. *Cambio climático y salud humana: riesgos y respuestas: Resumen*. OMS, 2003.
- _____. *Cambio climático y salud: resolución de la 61 Asamblea Mundial de la Salud*. 24 de mayo de 2008 (consultada en septiembre del 2019).
- _____. *La carga mundial de la enfermedad 2004* (DE) www.who.int/mediacentre/news/releases/2004/wha4/es/, consultado en septiembre del 2019.
- _____. *Marco operacional para el desarrollo de sistemas de salud resilientes al clima (Operational framework for building climate resilient health systems)*. OMS, 2017.
- _____. *61.ª Asamblea Mundial de la Salud*. Ginebra, 19-24 de mayo de 2008, p. 132.
- OMS y Organización Meteorológica Mundial (OMM). *Atlas de la salud y del clima*. OMS y OMM, 2012.
- Organización Panamericana de la Salud (OPS). *La salud y el ambiente en el desarrollo sostenible*. Vol. 572. Washington, DC, OPS, 2000.
- _____. *Proteger la salud frente al cambio climático: evaluación de la vulnerabilidad y la adaptación*. Washington, DC, OPS, 2012.
- Otazo Sánchez, Elena María; Numa Pompilio Pavón Hernández y Sócrates López Pérez. *Programa estatal de acción para el cambio climático*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales del Estado de Hidalgo, UAEH, México, 2011, p. 350.
- Oyhantçabal, Walter; Edgardo Vitale y Patricia Lagarmilla. *El cambio climático y su relación con las enfermedades animales y la producción animal*. Uruguay, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca de Uruguay, 2010.
- Prüss Üstün, A. y C. Carvalán. *Preventing Disease Through Healthy Environments-Towards an Estimate of the Environmental Burden of Disease*. Geneva, World Health Organization, 2006.
- Secretaría de Economía. *Información económica y estatal*. Hidalgo. México, 2016 (DE) <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/113594/hidalgo.pdf>
- Tusell, F. *Estadística matemática*. España, Universidad del País Vasco, 2007.
- Veliz Rojas, Lizet Helena y Andrés Felipe Bianchetti Saavedra. "Cambio climático y salud pública: acciones desde la institucionalidad en el escenario sociocultural actual", en: *Revista Costarricense de Salud Pública*. Vol. 22, núm. 2, julio-diciembre. Chile, 2013, pp. 163-168.
- WHO. *Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s*. Geneva, World Health Organization, 2014.
- Zhou XN et al. "Potential impact of climate change on schistosomiasis transmission in China", en: *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*. 78, 2008, pp. 188-194.