

El Impacto del Uso de Preservativos en el Pronóstico del Número de Individuos Infeccionados por VIH en México

The Impact of Condom use on the Projected Number of HIV-Infected Individuals in Mexico

Virgilio Vázquez-Hipólito^a, Hugo David Sánchez-Chávez^a, Silvia Reyes-Mora^a, Emmanuel Abdías Romano-Castillo^a

Resumen

En este estudio, presentamos un modelo matemático basado en ecuaciones diferenciales ordinarias para predecir la dinámica del VIH en México, utilizando datos del período 2018-2022. Las principales hipótesis del modelo incluyen la transmisión vertical, la homosexualidad, las estrategias de control y la migración. La estrategia de control se enfoca en analizar el uso de preservativos entre los individuos, con el fin de estudiar su impacto sobre la cantidad de contagios. Se realiza una proyección a veinte años, donde el modelo predice un aumento en el número de personas infectadas. Además, se exploran diferentes escenarios para analizar la sensibilidad del sistema a parámetros clave, como el uso de preservativos en diferentes grupos de la población. El modelo incorpora una distinción importante al incluir a los hombres migrantes como un parámetro, reconociendo que la migración puede influir significativamente en la propagación del VIH al introducir el virus en nuevas poblaciones. También se considera la transmisión vertical, de madre a hijo. Aunque el modelo se enfoca en estudiar el efecto del uso de preservativos, aún no evalúan otras estrategias, como la profilaxis pre exposición (PrEP). Las simulaciones muestran cómo cambios en el uso de preservativos pueden desacelerar la transmisión del VIH, proporcionando información valiosa para la planificación de salud pública y las estrategias de prevención.

Abstract

This study presents a mathematical model based on ordinary differential equations to predict HIV dynamics in Mexico from 2018 to 2022, with a 20-year projection. The model incorporates key transmission pathways, including vertical (mother-to-child) transmission, sexual transmission among gay men, and migration, while evaluating control strategies—particularly condom usage and its impact on infection rates. Projections indicate a rising trend in HIV cases over time. Sensitivity analyses assess the influence of critical parameters, such as variations in condom use across population groups. Notably, the model explicitly includes migrant men as a distinct parameter, reflecting migration's role in HIV spread. While the study underscores the effectiveness of condom-based interventions in reducing transmission, it does not assess alternative strategies like pre-exposure prophylaxis (PrEP). Simulations demonstrate that increased condom use can significantly mitigate HIV spread, offering actionable insights for public health policy and prevention programs.

Keywords: HIV, epidemiological modeling, mathematical model, population dynamics, vertical transmission, migration

^aCentro de Modelación Matemática, Vinculación y Consultoría. Universidad Tecnológica de la Mixteca. Av. Dr. Modesto Seara Vázquez No.1. C.P. 69004, Acatlima, Huajuapán de León, Oaxaca. México.

Correspondencia: Hugo David Sánchez Chávez
Universidad Tecnológica de la Mixteca
Correo electrónico: hchavez@mixteco.utm.mx

Palabras clave: VIH, proyección epidemiológica, modelo matemático, dinámica poblacional, transmisión vertical, migración.

Introducción

El Virus de Inmunodeficiencia Humana (VIH) continúa representando un desafío crítico para la salud pública en México, afectando a diversas poblaciones de manera significativa. Aunque se han logrado avances importantes en el control y tratamiento del virus, factores como la migración, la transmisión vertical de madre a hijo, y la falta de uso consistente de métodos preventivos como los preservativos, siguen complicando los esfuerzos para reducir la propagación del virus. Estos elementos subrayan la necesidad de desarrollar modelos matemáticos que no solo predigan la evolución de la epidemia, sino que también permitan evaluar el impacto de distintas intervenciones preventivas.

En este trabajo, se propone un modelo matemático basado en ecuaciones diferenciales ordinarias para estudiar la dinámica del VIH en México, utilizando datos del período 2018-2022. El planteamiento del problema se centra en la preocupación por el aumento de infecciones y la necesidad de mejorar la efectividad de las estrategias de control existentes. El modelo toma en cuenta factores clave como la migración, el uso de preservativos entre distintos grupos poblacionales (heterosexuales, homo- sexuales), y la transmisión vertical, con el objetivo de comprender mejor su impacto en la dinámica del virus.

El objetivo principal del estudio es realizar una proyección a 20 años de la evolución del número de personas infectadas, evaluando diferentes escenarios de prevención y control. Adicionalmente, se busca analizar la sensibilidad del sistema a los parámetros más representativos, como el uso de preservativos y la influencia de la migración, con el fin de identificar las estrategias más efectivas para mitigar los contagios.

La justificación de este trabajo radica en la necesidad de contar con herramientas predictivas que permitan a las autoridades de salud pública planificar intervenciones oportunas y adecuadas. Al cuantificar el impacto de diferentes factores en la transmisión del VIH, este modelo puede ayudar a diseñar políticas públicas más eficaces, adaptadas a las características y comportamientos de las poblaciones más afectadas, como las personas migrantes y otros grupos clave. La intención es adaptar estos resultados a un nivel regional o local, sin embargo, debido a la falta de investigación y datos a nivel local, se optó por realizar el análisis a nivel nacional.

Fundamentos Teóricos

El VIH continúa siendo una de las mayores crisis de salud pública a nivel global. Este virus afecta principalmente a las células CD4 del sistema inmunológico, lo que compromete la capacidad del cuerpo para combatir infecciones y enfermedades oportunistas. En México, las principales vías de transmisión del VIH incluyen las relaciones sexuales sin protección, el uso compartido de jeringas y la transmisión vertical de madre a hijo durante el embarazo, parto o lactancia [1]. Según datos de ONUSIDA, para finales de 2020, más de 250,000 personas vivían con VIH en México, con un aumento considerable en las infecciones entre ciertas poblaciones clave, como los hombres que tienen sexo con hombres y las personas migrantes [2]. En particular, el impacto de la migración en la transmisión del VIH es relevante en México debido a la gran movilidad poblacional, especialmente en las regiones fronterizas, lo que representa un desafío adicional para los esfuerzos de control de la epidemia [3]. A pesar de los avances en los programas de prevención, la transmisión vertical sigue siendo una preocupación importante, lo que subraya la necesidad de implementar estrategias más efectivas para la prevención de la transmisión de madre a hijo [4].

Los modelos matemáticos han sido herramientas clave para entender la propagación de enfermedades infecciosas como el VIH y para evaluar el impacto potencial de diferentes estrategias de intervención. El modelo SIR (Susceptibles, Infectados, Recuperados), propuesto por Kermack y McKendrick en 1927, sigue siendo uno de los enfoques más utilizados en la epidemiología matemática [5]. Sin embargo, investigaciones más recientes han extendido estos modelos para capturar dinámicas más complejas, tales como la transmisión vertical del VIH, los comportamientos sexuales diferenciados, y el efecto de la migración en la propagación del virus [6]. En el presente estudio, se propone un modelo basado en ecuaciones diferenciales ordinarias (EDOs) que se enfoca en la dinámica poblacional del VIH en México. A diferencia de los modelos epidemiológicos tradicionales, este modelo incluye poblaciones diferenciadas: hombres susceptibles (H_S), hombres infectados (M_S), mujeres susceptibles (M_S), mujeres infectadas (M_I) y una población de migrantes (G_H). El modelo captura la transmisión del virus a través de contactos sexuales desprotegidos y la transmisión vertical de madre a hijo.

Las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento de estas poblaciones permiten proyectar la evolución de la epidemia bajo diferentes escenarios. Estas ecuaciones consideran la influencia del uso de preservativos y las políticas migratorias, las cuales juegan un papel crucial en la propagación del VIH [7]. Para ajustar los parámetros del modelo a los datos empíricos correspondientes al período 2018-2022, se utilizó el método de optimización Nelder-Mead. Este algoritmo, ampliamente usado en problemas de optimización multidimensional sin derivadas, fue implementado utilizando la librería `scipy.optimize` en Python 3.8.10. El objetivo del algoritmo fue minimizar la función de error cuadrático entre los datos observados y las predicciones del modelo, lo que permitió un ajuste preciso de los

parámetros de transmisión, contacto y migración [8, 9].

El modelo propuesto incluye varios parámetros epidemiológicos clave para capturar la dinámica del VIH. Entre ellos se encuentran la tasa de transmisión del virus en hombres susceptibles e infectados (δ_{H1}, δ_{H2}), la tasa de contacto entre individuos susceptibles e infectados (β), y los porcentajes de uso de preservativos en hombres y mujeres heterosexuales y homosexuales ($\sigma_{H1}, \sigma_{H2}, \sigma_{M1}$). Adicionalmente, la tasa de migración de hombres susceptibles e infectados (ϵ) también es considerada, ya que la movilidad de las personas juega un papel importante en la difusión del virus [10]. La sensibilidad del modelo fue evaluada mediante análisis de escenarios, lo que demostró que incrementos modestos en el uso de preservativos podrían reducir significativamente las nuevas infecciones proyectadas en un horizonte de 20 años. Asimismo, se encontró que tanto la migración como la transmisión vertical son variables clave que impactan significativamente en la evolución de la epidemia en México [11].

Estudios previos han demostrado la utilidad de los modelos matemáticos en la predicción de la evolución de la epidemia de VIH. En particular, Nowak y May desarrollaron un modelo de dinámica viral que ha servido de base para la modelización moderna de infecciones virales como el VIH [7]. En el contexto mexicano, investigaciones como las de De Peña et al., han resaltado la importancia de considerar la migración en la expansión del VIH, especialmente en las zonas fronterizas del país [3]. Este trabajo contribuye a la literatura existente al integrar nuevos factores, como la migración y la transmisión vertical, en un marco matemático basado en EDOs que permite simular distintos escenarios de control y prevención. Los resultados de este modelo proporcionan una herramienta valiosa para la toma de decisiones en salud pública, particularmente en la planificación de políticas de prevención del VIH en México.

Metodología y supuestos

Para la formulación del modelo matemático, la población se segmenta en cinco grupos: hombres susceptibles (H_S), hombres migrantes (G_H), hombres infectados (H_I), mujeres susceptibles (M_S) y mujeres infectadas (M_I). Además, los individuos se clasifican según su orientación sexual en homosexuales y heterosexuales, tal como se muestra en la Figura 1. La infección por tuberculosis se clasifica en (3):

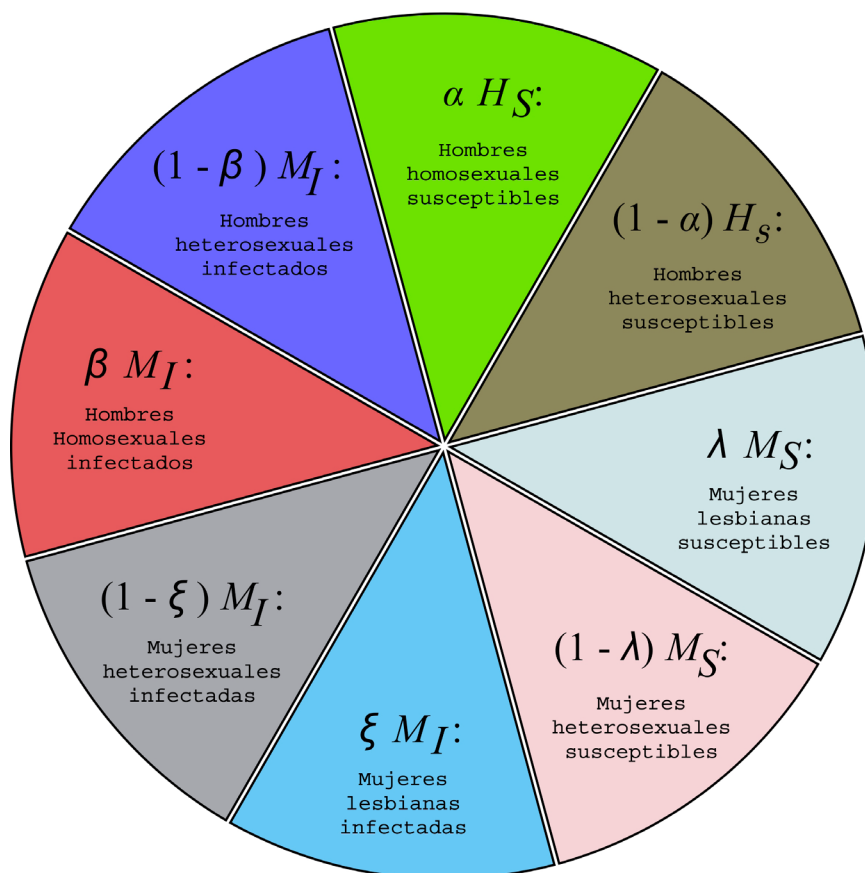
Las principales hipótesis que se asumen en este modelo son las siguientes:

1. Los individuos infectados no se recuperan de la enfermedad.

2. La transmisión de la enfermedad ocurre a través de contacto sexual, tanto en parejas heterosexuales como homosexuales, así como por nacimientos.
3. La población susceptible está compuesta por individuos sanos y sexualmente activos.
4. Se asume que una proporción de los individuos utiliza preservativos como medida de protección.
5. Se contempla la emigración de hombres sexualmente activos.

Los parámetros del modelo se listan en la Tabla 1:

Figura 1. División de las clases de individuos que se consideran en el modelo.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Descripción de los parámetros del modelo.

Parámetro	Significado
Tasas de llegada	
r_{1H}	Número de hombres sanos en la población que se vuelven sexualmente activos por año.
r_{2H}	Número de hombres infectados en la población que se vuelven sexualmente activos por año.
r_{1M}	Número de mujeres sanas en la población que se vuelven sexualmente activas por año.
r_{2M}	Número de mujeres infectadas en la población que se vuelven sexualmente activas por año.
Tasas de infección	
δ_{H1}	Número de hombres sanos que se infectan como resultado de un encuentro sexual con mujeres infectadas.
δ_{H2}	Número de hombres sanos que se infectan como resultado de un encuentro sexual con hombres infectados.
δ_{M1}	Número de mujeres sanas que se infectan como resultado de un encuentro sexual con hombres infectados.
δ_{M2}	Número de mujeres sanas que se infectan como resultado de un encuentro sexual con mujeres infectadas.
Uso de protección	
σ_{H1}	Proporción de hombres heterosexuales que usan preservativos.
σ_{H2}	Proporción de hombres homosexuales que usan preservativos.
σ_{M1}	Proporción de mujeres heterosexuales que usan medios de protección
σ_{M2}	Proporción de mujeres lesbianas que usan medios de protección.
Migración y mortalidad	
ε	Tasa de emigración de hombres; es decir, el número de hombres queden su país de origen en busca de oportunidades por año.
ϕ	Tasa de retorno de hombres migrantes.
ϱ	Proporción de migrantes que regresan sanos.
μ	Tasa de muerte natural en el lugar de origen, es decir, número de hombres que fallecen por otra causa que no es por VIH.
μ_m	Tasa de muerte natural de hombres migrantes; es decir, número de hombres que fallecen en el extranjero por otra causa que no es por VIH.
θ_1	Tasa de muerte de hombres debido a la infección por VIH.
θ_2	Tasa de muerte de mujeres debido a la infección por VIH.
Distribución de población susceptible e infectada	
α	Proporción de hombres homosexuales susceptibles.
$1 - \alpha$	Proporción de hombres heterosexuales susceptibles.
β	Proporción de hombres homosexuales infectados.
$1 - \beta$	Proporción de hombres heterosexuales infectados.
λ	Proporción de mujeres homosexuales susceptibles.
$1 - \lambda$	Proporción de mujeres heterosexuales susceptibles.
ξ	Proporción de mujeres homosexuales infectadas.
$1 - \xi$	Proporción de mujeres heterosexuales infectadas.

Fuente: Elaboración propia.

Representemos por $N(t)$ la población total de individuos en el tiempo t . El cambio en el tamaño de cada grupo, es decir, hombres susceptibles, hombres infectados, mujeres susceptibles y mujeres infectadas, es directamente proporcional a N . Este cambio se representa mediante los términos $r_{1H}N$, $r_{2H}N$, $r_{1M}N$ y $r_{2M}N$, respectivamente.

El número de encuentros entre individuos susceptibles e infectados se modela según una ley de acción de masas. Así, el número de encuentros entre hombres heterosexuales susceptibles y mujeres heterosexuales infectadas es $((1 - \alpha)H_S)((1 - \xi)M_I)$. Dado que una proporción σ_{H1} de los hombres heterosexuales utiliza preservativo, la tasa de infección, δ_{H1} , se reduce por el factor $1 - \sigma_{H1}$. Por lo tanto, el número efectivo de hombres heterosexuales que se infectan debido al encuentro con mujeres infectadas es $\delta_{H1}(1 - \sigma_{H1})((1 - \alpha)H_S)((1 - \xi)M_I)$.

De manera análoga, el número de encuentros entre hombres homosexuales susceptibles e infectados es $(\alpha H_S)(\beta H_I)$. Como una proporción σ_{H2} de estos hombres usa preservativos, la tasa de infección, δ_{H2} , se reduce, y el número efectivo o de infecciones en hombres homosexuales es $\delta_{H2}(1 - \sigma_{H2})(\alpha H_S)(\beta H_I)$.

Consideramos también la emigración de hombres. La fracción de hombres susceptibles que emigra es εH_S , y la fracción

de hombres infectados que emigra es εH_I . Además, una parte de los hombres que están en el extranjero regresa a su lugar de origen, representada por ϕG_H . Sin embargo, como no todos regresan sanos, $\varrho \phi G_H$ denota el número de hombres sanos que regresan, mientras que $(1 - \varrho)\phi G_H$ representa aquellos que regresan infectados.

Asimismo, consideramos la mortalidad natural, es decir, muertes por causas no relacionadas con el VIH en el lugar de origen. Las fracciones de hombres y mujeres susceptibles e infectados que fallecen por causas naturales son μH_S , μH_I , μM_S , μM_I , respectivamente. Por otro lado, las muertes debidas al VIH son modeladas como $\theta_1 H_I$ para hombres y $\theta_2 M_I$ para mujeres.

A partir de estas hipótesis, y de acuerdo con dos reportes [22, 23], se ha estimado que el valor de σ_{M2} es aproximadamente 0. Con base en ello, hemos formulado un modelo matemático (1).

Estimamos todos los parámetros del modelo matemático (1) utilizando un método de optimización basado en el algoritmo de Nelder-Mead [21]. Este método fue implementado en el lenguaje de programación Python 3.8.10. Los valores obtenidos para los parámetros se presentan en la Tabla 4 donde: $N = H_S + H_I + M_S + M_I$, $\sigma_H \in [0, 1]$, $\sigma_M \in [0, 1]$ y $\varrho \in [0, 1]$.

$$\begin{aligned}
 \frac{dH_S}{dt} &= r_{1H}N - \delta_{H1}(1 - \sigma_{H1})((1 - \alpha)H_S)((1 - \xi)M_I) - \delta_{H2}(1 - \sigma_{H2})(\alpha H_S)(\beta H_I) - \varepsilon H_S + \varrho \phi G_H - \mu H_S \\
 \frac{dG_S}{dt} &= \varepsilon H_S + \varepsilon H_I - \phi G_H - \mu_m G_H \\
 \frac{dH_I}{dt} &= r_{2H}N + \delta_{H1}(1 - \sigma_{H1})((1 - \alpha)H_S)((1 - \xi)M_I) + \delta_{H2}(1 - \sigma_{H2})(\alpha H_S)(\beta H_I) - \varepsilon H_I + (1 - \varrho)\phi G_H \\
 &\quad - \theta_1 H_I - \mu H_I \\
 \frac{dM_S}{dt} &= r_{1M}N - \delta_{M1}(1 - \sigma_{M1})((1 - \lambda)M_S)((1 - \beta)H_I) - \mu M_S \\
 \frac{dM_I}{dt} &= r_{2M}N + \delta_{M1}(1 - \sigma_{M1})((1 - \lambda)M_S)((1 - \beta)H_I) - \theta_2 M_I - \mu M_I
 \end{aligned} \tag{1}$$

Así pues, de manera general, resumiendo, la metodología seguida fue la siguiente: Para el desarrollo de este estudio, realizamos una búsqueda exhaustiva de literatura científica disponible sobre la teoría biológica de la enfermedad, además de revisar las técnicas matemáticas y computacionales utilizadas para analizar y simular modelos matemáticos. También revisamos el estado del arte en la modelación de la dinámica de la enfermedad del VIH, lo que nos permitió identificar los enfoques más relevantes y actualizados.

Durante el proceso, planteamos preguntas de interés que discutimos en reuniones con personal del sector salud de la Ciudad de Huajuapán de León. Estas reuniones nos ayudaron a formular hipótesis importantes que consideramos esenciales para la construcción del modelo matemático. A partir de estas hipótesis, definimos las variables y parámetros clave del modelo.

Para la obtención de los valores de los parámetros, investigamos en diferentes fuentes oficiales disponibles en internet, y utilizamos estos datos para estimar los parámetros mediante métodos de optimización. Finalmente, empleando el lenguaje de programación Python, realizamos proyecciones a futuro para estudiar el comportamiento dinámico del número de individuos infectados, proporcionando una

perspectiva cuantitativa sobre la evolución de la epidemia bajo diferentes escenarios.

Resultados

A partir de las bases de datos consultadas [12]- [20], se obtienen los valores presentados en la Tabla 2:

Tomando como referencia el año 2018, se establecieron las siguientes poblaciones iniciales: $H_{S0} = 61,167,571$ para hombres susceptibles, $G_{H0} = 469,684$ para hombres migrantes, $H_{I0} = 234,518$ para hombres infectados, $M_{S0} = 63,868,153$ para mujeres susceptibles y $H_{I0} = 108,026$ para mujeres infectadas. A partir de estos valores, se llevaron a cabo proyecciones futuras al modificar los porcentajes de uso de preservativos entre hombres heterosexuales (σ_{H1}), hombres homosexuales (σ_{H2}) y mujeres heterosexuales (σ_{M1}). Este enfoque permite evaluar el impacto de estas variables en la dinámica poblacional y en la evolución de la epidemia.

En las gráficas presentadas en la figura 2, se varió el porcentaje de uso de preservativos entre hombres heterosexuales, considerando los valores del 30%, 60% y 90%. Se puede observar que, a medida que aumenta el porcentaje de hombres heterosexuales que utilizan protección, el crecimiento en el número de infectados se vuelve más lento.

Tabla 2. Valores de los parámetros obtenidos a partir de bases de datos reales que se han utilizado en el modelo.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
r_{1H}	0.00099	r_{2H}	0.00000065	r_{1M}	0.00372
r_{2M}	0.00000065	δ_{H1}	0.000000003064	δ_{H2}	0.00000001692
δ_{M1}	0.000000005529	β	0.62	ξ	0.07
α	0.0560272105791744	μ	0.00615977	θ_1	0.0158240125466869
θ_2	0.0042349008387546	ε	0.001172	ϕ	0.06979407
λ	0.03486	ϱ	0.994	μ_m	0.000261184

Fuente: Elaboración propia.

En las gráficas presentadas en la figura 3, se varió el porcentaje de uso de preservativos entre hombres homosexuales, considerando los valores del 30%, 60% y 90%. En estas gráficas, se puede observar que, a mayor porcentaje de hombres homosexuales que utiliza protección, el crecimiento en el número de infectados es más lento; sin embargo, este crecimiento no es tan rápido como en el caso de los hombres heterosexuales.

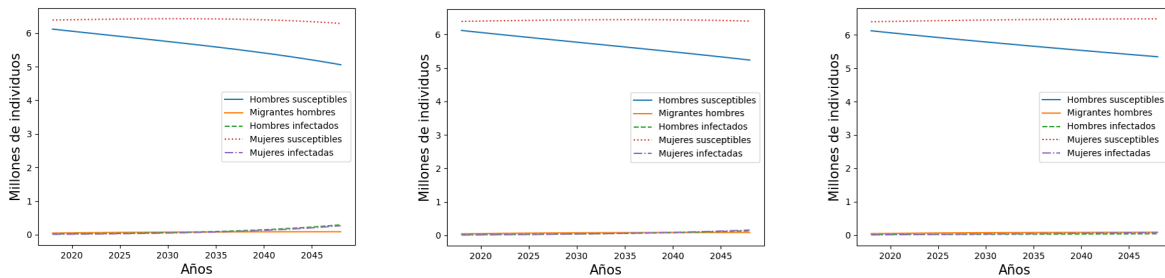
En las gráficas presentadas en la figura 4, se varió el porcentaje de uso de preservativos entre mujeres heterosexuales, considerando los valores del 30%, 60% y 90%. En estas gráficas, se puede observar que, a mayor

porcentaje de mujeres heterosexuales que utilizan protección, el crecimiento en el número de infectados es más lento, y se presenta un decremento notable en la cantidad de mujeres infectadas.

Considerando los datos presentados en la Tabla 3, obtenidos de [12, 20]:

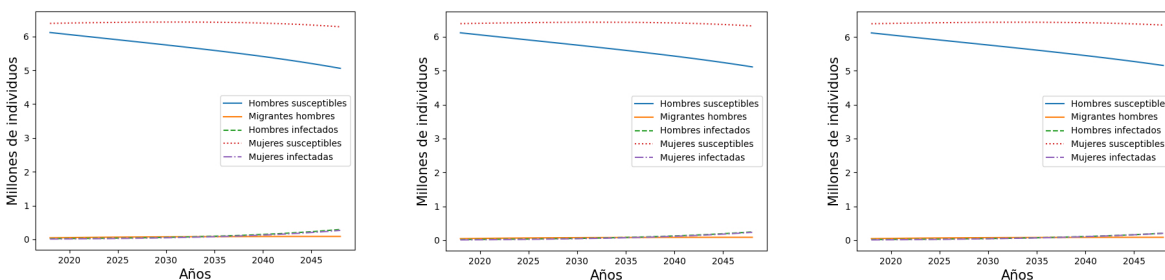
Estimamos todos los parámetros del modelo matemático (1) utilizando un método de optimización basado en el algoritmo de Nelder-Mead [21]. Este método fue implementado en el lenguaje de programación Python 3.8.10. Los valores obtenidos para los parámetros se presentan en la Tabla 4.

Figura 2. Porcentaje de hombres heterosexuales (σ_{H1}) que utilizan preservativos, considerando los valores de $\sigma_{H2}=0.3$ y $\sigma_{M1}=0.3$.



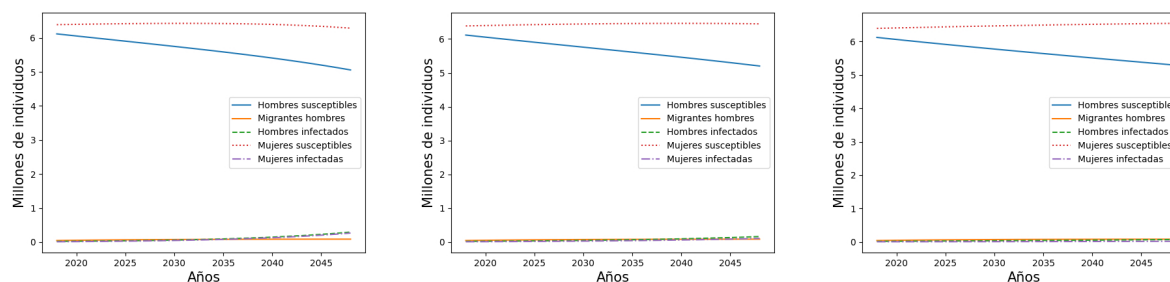
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Porcentaje de hombres homosexuales (σ_{H2}) que utilizan preservativos, considerando los valores de $\sigma_{H1}=0.3$ y $\sigma_{M1}=0.3$.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Porcentaje de hombres heterosexuales (σ_{M1}) que utilizan preservativos, considerando los valores de $\sigma_{H1} = 0.3$ y $\sigma_{H2} = 0.3$.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Datos de población por año.

Variable	Año				
	2018	2019	2020	2021	2022
Hombres Susceptibles	61,167,571	61,765,762	62,344,893	62,654,299	62,973,741
Hombres Migrantes	469,684	469,455	283,973	380,197	341,785
Hombres Infectados	234,518	249,333	258,248	271,989	284,114
Mujeres Susceptibles	63,868,153	64,428,774	64,989,317	65,386,895	65,756,951
Mujeres Infectadas	108,026	166,040	225,534	287,156	350,746

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Valores estimados de los parámetros del modelo.

Parámetros	Valores estimados
r_{1H}	0.00537818
r_{2H}	1.8516×10^{-7}
r_{1M}	0.00393573
r_{2M}	6.6999×10^{-4}
δ_{H1}	3.1465×10^{-9}
δ_{H2}	1.2396×10^{-8}
δ_{M1}	5.3061×10^{-9}
β	0.89669759
ξ	0.00614166
α	0.98317156
μ	3.5252×10^{-8}
θ_1	0.37923321
θ_2	0.13625972
λ	0.22791559
σ_{H1}	0.53872687
σ_{H2}	0.41921476
σ_{M1}	0.51362461
ε	0.00171655
ϕ	0.08400425
ρ	0.49547826
μ_m	0.28939417

Fuente: Elaboración propia.

Con los valores de los parámetros estimados se obtuvieron los ajustes de las variables y los errores porcentuales

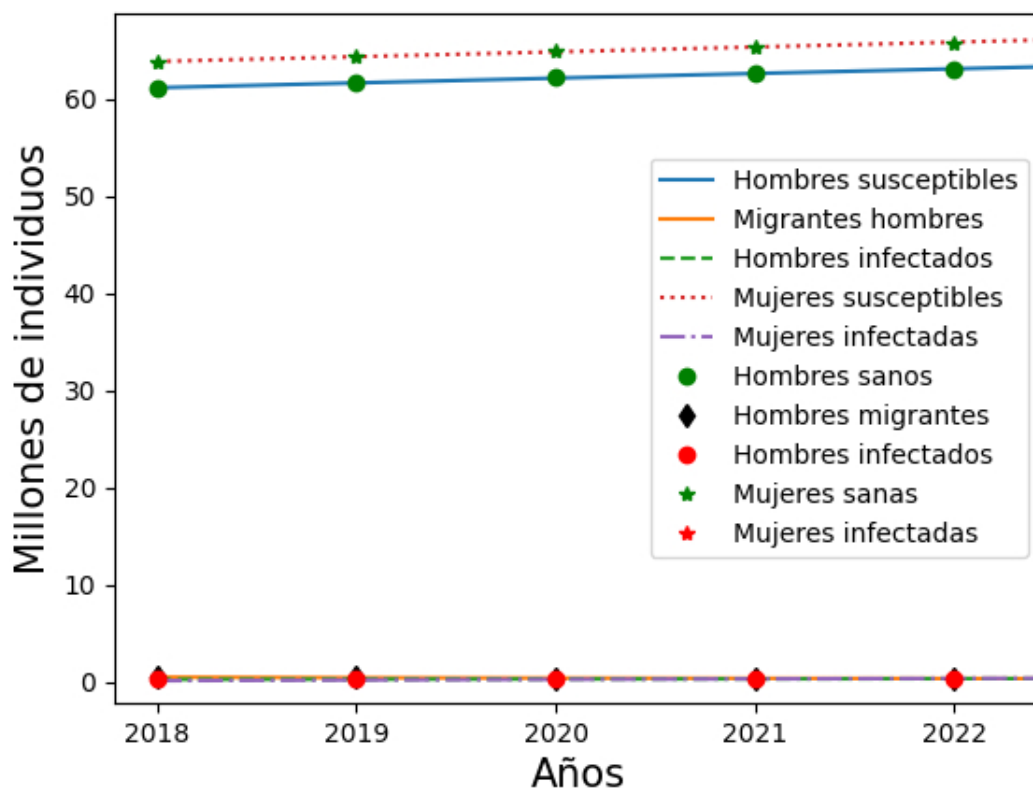
cometidos en cada año se muestran en la Tabla 5. El ajuste realizado se puede apreciar en la figura (5).

Tabla 5. Porcentajes de variables ajustadas por año.

Variable Ajustada (%)	2018	2019	2020	2021	2022
Hombres Susceptibles	0.0	0.2	0.3	0.0	0.2
Hombres Migrantes	0.0	12.3	31.1	9.0	3.8
Hombres Infectados	0.0	2.5	6.7	8.7	11.2
Mujeres Susceptibles	0.0	0.1	0.2	0.0	0.2
Mujeres Infectadas	0.0	6.1	4.9	1.1	3.6

Fuente: Elaboración propia.

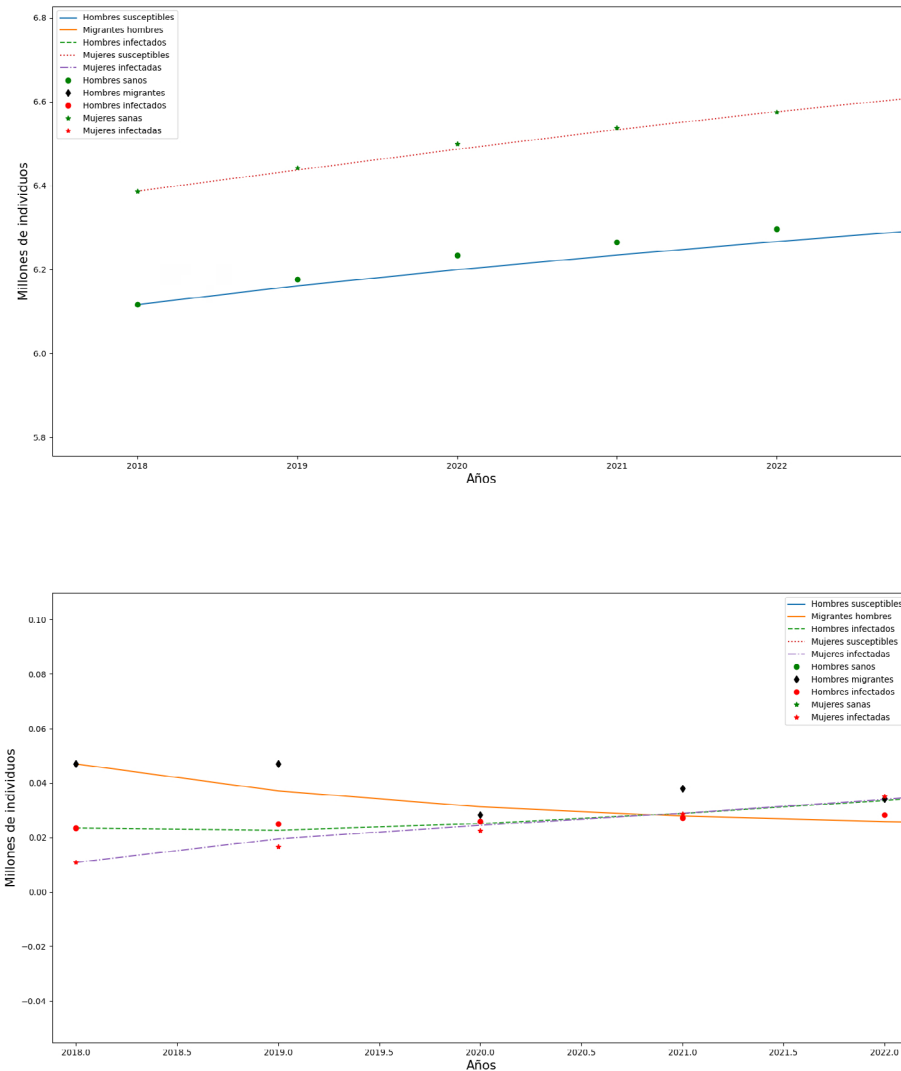
Figura 5. Ajuste de datos mediante optimización para los años de 2018 a 2022.



Fuente: Elaboración propia.

Realizando una ampliación de la figura (5), se presentan las gráficas detalladas en la figura (6).

Figura 6. Ampliación de las partes de la figura (5).

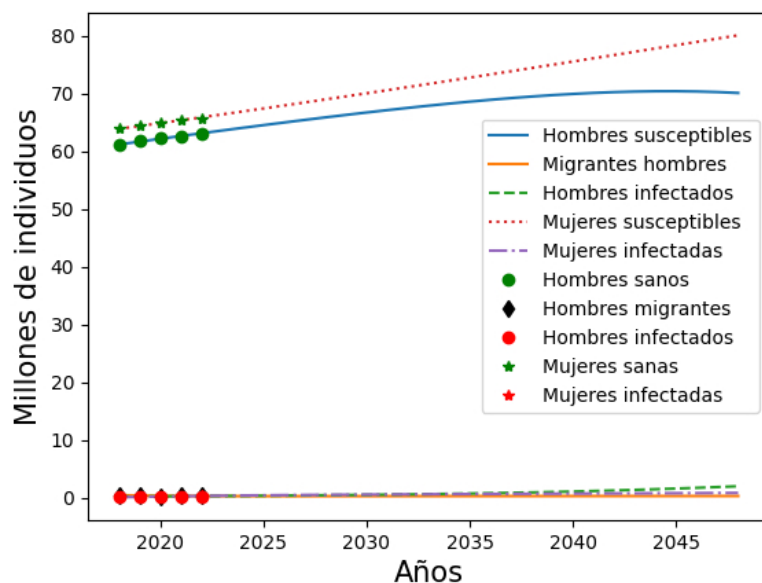


Fuente: Elaboración propia.

Utilizando los valores estimados mediante el método de optimización basado en el algoritmo de Nelder-Mead, se obtuvo el modelo numérico asociado al modelo original (1). Este modelo numérico permite realizar proyecciones futuras para analizar el

comportamiento del número de infectados. Al considerar como condición inicial el año 2018, con los siguientes valores de las variables: $H_{S0}=61,167,571$, $G_{H0}=469,684$, $H_{I0}=234,518$, $M_{S0}=63,868,153$ y $M_{I0}=108,026$, se presentan las proyecciones en la figura (7).

Figura 7. Proyección del comportamiento del número de individuos utilizando los parámetros estimados.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Valores pronosticados de las variables ajustadas por año.

Año	Hombres Susceptibles	Hombres Migrantes	Hombres Infectados	Mujeres Susceptibles	Mujeres Infectadas
2023	63583923	317836	336989	66368641	380621
2024	64051422	310644	359346	66880195	418782
2025	64512944	306495	383166	67395476	453062
2026	64967811	304423	408721	67914437	483979
2027	65415240	303539	436290	68437030	511994
2028	65854224	303576	466103	68963198	537503
2029	66283627	304360	498404	69492881	560856
2030	66702220	305623	533465	70026008	582367
2031	67108670	307048	571581	70562504	602320
2032	67501448	308598	613046	71102282	620962
2033	67878871	310301	658168	71645248	638500
2034	68239111	312127	707285	72191293	655129
2035	68580195	314001	760757	72740298	671029
2036	68900000	315805	818972	73292129	686367
2037	69196235	317515	882309	73846638	701296
2038	69466358	319178	951190	74403662	715936
2039	69707674	320807	1026041	74963023	730402
2040	69917362	322397	1107262	75524520	744802
2041	70092472	323924	1195231	76087936	759244
2042	70229930	325345	1290304	76653034	773833
2043	70326535	326600	1392814	77219557	788668
2044	70379039	327693	1503012	77787232	803833
2045	70384142	328649	1621064	78355763	819395

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Validación de los pronósticos para el año 2023.

Año (2023)	Valor pronosticado	Valor real	Error porcentual
Hombres Susceptibles	63583923	62195187	2%
Hombres Migrantes	317836	476500	33%
Hombres Infectados	336989	299580	12%
Mujeres Susceptibles	66368641	66651920	0.4%
Mujeres Infectadas	380621	353313	8%

Figura 8. Validación de los pronósticos para el año 2024.

Año (2024)	Valor pronosticado	Valor real	Error porcentual
Hombres Susceptibles	64051422	64501534	0.7%
Hombres Migrantes	310644	428984	28%
Hombres Infectados	359346	312930	15%
Mujeres Susceptibles	66880195	67104191	0.3%
Mujeres Infectadas	418782	355761	18%

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla (6) se presentan los datos del pronóstico del modelo, junto con los valores de los parámetros obtenidos.

Podemos observar en la gráfica de la figura (7) y en la tabla (7) que en 2030 el crecimiento en el número de infectados será rápido.

Con los valores pronosticados para los años 2023 y 2024, comparamos, mediante el cálculo del error porcentual, los resultados obtenidos con los valores reales consultados en [22–25]. De este modo, obtenemos las tablas (7) y (8).

Conclusiones

En este trabajo, se propuso un modelo matemático para estudiar el comportamiento del número de individuos infectados por VIH en México. El modelo se fundamenta en hipótesis fundamentales y, mediante diversas fuentes, se identificaron los parámetros involucrados. Con esta información, se analizó el comportamiento

del modelo variando el porcentaje de individuos que utilizan preservativos. Las simulaciones realizadas revelaron que un alto porcentaje de uso de preservativos puede reducir significativamente el número de infectados en un corto período de tiempo. En particular, cuando el porcentaje de individuos que utilizan preservativo es del 60% el número de infectados disminuye significativamente. Este comportamiento es muy notorio en el caso de individuos heterosexuales. Estos resultados permiten cuantificar tanto el porcentaje necesario de individuos protegidos como el tiempo requerido para disminuir las tasas de infección, lo cual puede ser de gran utilidad en la planificación de estrategias de control.

Por otro lado, a partir de los datos recopilados sobre las variables: hombres susceptibles (H_S), hombres migrantes (G_H), hombres infectados (H_I), mujeres susceptibles (M_S) y mujeres infectadas (M_I), se realizó la estimación de todos los parámetros involucrados en el modelo matemático. Para esta estimación, se empleó un método

de optimización basado en el algoritmo de Nelder-Mead, implementado en el lenguaje de programación Python. Con los valores estimados de los parámetros, se logró un ajuste con errores muy pequeños para cada uno de los años con datos registrados.

Utilizando el modelo numérico, se realizaron proyecciones futuras, las cuales muestran que el número de individuos contagiados siempre tiende a aumentar, con un crecimiento notable a partir del año 2030. Utilizando el modelo numérico, se realizaron proyecciones a futuro, observando que el número de individuos contagiados siempre tiende a aumentar, con un crecimiento notable a partir del año 2030, alcanzando un máximo entre 2040 y 2045. Este pronóstico puede ser valioso para el personal encargado de la salud pública, ya que les permitirá planificar adecuadamente las estrategias a seguir y evitar un futuro escenario desfavorable. Cabe señalar que el modelo presentado es básico y deja de lado muchas variables que podrían considerarse en investigaciones futuras. Aunque este trabajo se desarrolló a nivel nacional, el objetivo sigue siendo que los resultados puedan aplicarse de manera local una vez que se disponga de los datos regionales.

Referencias

- [1]. UNAIDS. Global HIV & AIDS statistics — Fact sheet. Geneva: Joint United Nations Programme on HIV/AIDS (UNAIDS); 2020. Available from: https://www.unaids.org/sites/default/files/media_asset/2020_aids-data-book_en.pdf
- [2]. Centro Nacional para la Prevención y el Control del VIH y el SIDA (CENSIDA). Informe Nacional de Avances en la Lucha contra el SIDA. México: CENSIDA; 2020. Available from: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/642610/InformeNacional_VIH_SIDA_CENS
- [3]. De Peña C, Hernández L, López M. Migration and HIV risk in the Mexico- US border: A predictive model. *J Epidemiol.* 2019;30(4):15-25. Available from: <https://www.jstage.jst.go.jp/article/jea/30/4/15/pdf>
- [4]. World Health Organization (WHO). Mother-to-child transmission of HIV [Internet]. 2021. Available from: <https://www.who.int/teams/global-hiv-hepatitis-and-stis-programmes/hiv/prevention/mother-to-child-transmission-of-hiv>
- [5]. Kermack WO, McKendrick AG. A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proc R Soc Lond A Math Phys Sci.* 1927;115(772):700-21 [Internet]. Available from: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.1927.0118>
- [6]. Brauer F. *Mathematical Models in Epidemiology*. Springer; 2017 [Internet]. Available from: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4939-9828-9>
- [7]. Nowak M, May R. *Virus dynamics: Mathematical principles of immunology and virology*. Oxford University Press; 2000 [Internet]. Available from: <https://global.oup.com/academic/product/virus-dynamics-9780198504177>
- [8]. Nelder JA, Mead R. A simplex method for function minimization. *Comput J.* 1965;7(4):308-13 [Internet]. Available from: <https://academic.oup.com/comjnl/article/7/4/308/354237>
- [9]. Press WH, Teukolsky SA, Vetterling WT, Flannery BP. *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press; 2007 [Internet]. Available from: <https://numerical.recipes/book/book.html>
- [10]. Anderson RM, May RM. *Infectious Diseases of Humans: Dynamics and Control*. Oxford University Press; 1991 [Internet]. Available from: <https://global.oup.com/academic/product/infectious-diseases-of-humans-9780198540403>
- [11]. Hethcote HW. The Mathematics of Infectious Diseases. *SIAM Rev.* 2000;42(4):599-653 [Internet]. Available from: <https://epubs.siam.org/doi/10.1137/S0036144500371907>
- [12]. Consejo Nacional de Población (CONAPO). Bases de datos de la conciliación demográfica 1950 a 2019 y proyecciones de la población de México 2020 a 2070 [Internet]. México: Gobierno de México; 2020 [citado el 12 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://www.gob.mx/conapo/documentos/bases-de-datos-de-la-conciliacion-demografica-1950-a-2019-y-proyecciones-de-la-poblacion-de-mexico-2020-a-2070?idiom=es>

- [13]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Internet]. México: INEGI; 2024 [citado el 12 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/>
- [14]. Centro Nacional para la Prevención y el Control del VIH/ SIDA (CEN- SIDA). Epidemiología. Registro Nacional de Casos de SIDA [Internet]. México: CENSIDA; 2024 [citado el 12 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://www.gob.mx/censida/documentos/epidemiologia-registro-nacional-de-casos-de-sida>
- [15]. Programa Conjunto de las Naciones Unidas sobre el VIH/ SIDA (ONUSIDA). México [Internet]. Ginebra: ONUSIDA; 2024 [citado el 12 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://www.unaids.org/es/regions-countries/countries/mexico>
- [16]. Programa Conjunto de las Naciones Unidas sobre el VIH/ SIDA (ONUSIDA). Hoja informativa [Internet]. Ginebra: ONUSIDA; 2024 [citado el 12 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://www.unaids.org/es/resources/fact-sheet>
- [17]. Instituto Nacional de Salud Pública (INSP). Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (ENSANUT) [Internet]. Cuernavaca: INSP; 2024 [citado el 12 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://ensanut.insp.mx/>
- [18]. Secretaría de Salud. Utilizan condón 75% de hombres y 51% de mujeres adolescentes [Internet]. Ciudad de México: Secretaría de Salud; 2024 [citado el 12 de septiembre de 2024]. Disponible en: [https://www.gob.mx/salud/prensa/066-utilizan-condon-75-de-hombres-y-51-de-mujeres-adolescentes?](https://www.gob.mx/salud/prensa/066-utilizan-condon-75-de-hombres-y-51-de-mujeres-adolescentes)
- [19]. Secretaría de Salud. Utilizan condón en la primera relación sexual 83% de los hombres y 70% de las mujeres adolescentes [Internet]. Ciudad de México: Secretaría de Salud; 2024 [citado el 12 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://www.gob.mx/salud/prensa/034-utilizan-condon-en-primera-relacion-sexual-83-de-los-hombres-y-70-de-las-mujeres-adolescentes?idiom=es>
- [20]. Secretaría de Salud. Sistema de Vigilancia Epidemiológica de VIH [Internet]. Ciudad de México: Secretaría de Salud; 2024 [citado el 12 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://www.gob.mx/salud/acciones-y-programas/sistema-de-vigilancia-epidemiologica-de-vih>
- [21]. Nelder, J. A., & Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization. The computer journal, 1965;7(4):308-313. Disponible en: <https://academic.oup.com/comjnl/article/7/4/308/354237>
- [22]. Gobierno de México. VIH Día Mundial del VIH 2024. México: Gobierno de México; 2024. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/960192/VIH_DVEET_DIA_MUNDIAL_VIH2024.pdf
- [23]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Noticia de la Sala de Prensa. México: INEGI; 2024. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/saladeprensa/noticia/9051>
- [24]. El economista. Suben 58% número de mexicanos que migraron en 2023. El economista; 2024. Disponible en: <https://www.eleconomista.com.mx/politica/Sube-58-numero-de-mexicanos-que-migraron-en-2023-20240522-0144.html>
- [25]. Consejo Nacional de Población (CONAPO). Bases de datos de la conciliación demográfica 1950 a 2019 y proyecciones de la población de México 2020 a 2070. México: Gobierno de México; 2020. Disponible en: <https://www.gob.mx/conapo/documentos/bases-de-datos-de-la-conciliacion-demografica-1950-a-2019-y-proyecciones-de-la-poblacion-de-mexico-2020-a-2070> {<https://www.gob.mx/conapo/documentos/bases-de-datos-de-la-conciliacion-demografica-1950-a-2019-y-proyecciones-de-la-poblacion-de-mexico-2020-a-2070>}
- Recibido:** 29 de noviembre de 2024.
Corregido: 07 de abril de 2025.
Aceptado: 20 de junio de 2025.
- Conflictos de interés:** Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.