

Factores asociados al rebrote de miasis por *Cochliomyia hominivorax* en Chiapas: Un enfoque de modelaje de la enfermedad.

Estrella Segobia, Blanca Osornio, Daniela Villanueva, Melissa Martinez

2025-11-24

Contents

1	Introducción	1
2	Antecedentes	2
3	Objetivos	2
3.1	Objetivo general	2
3.2	Objetivos específicos	2
4	Metodología	2
4.1	Integración y curación de bases de datos	2
4.2	Formulación del modelo SEIRS expandido	3
4.2.1	Módulos adicionales del modelo	3
4.2.2	Módulo climático	3
4.2.3	Módulo socioeconómico	4
4.2.4	Módulo de mitigación	4
4.2.5	Obtención de Parámetros	6
4.2.6	Parámetros del Compartimento Bovino (SEIRS)	8
4.3	Referencias	10

1 Introducción

La reemergencia de la miasis por *Cochliomyia hominivorax* en México durante 2024 evidenció la necesidad de herramientas analíticas que permitan comprender la dinámica que favorece su persistencia en sistemas ganaderos. Como extensión del proyecto original presentado en la materia **proyecto de investigación**, la presente sección se enfoca exclusivamente en la construcción, calibración y validación de un modelo compartimental. Este modelo busca integrar parámetros biológicos, climáticos y socioeconómicos asociados al rebrote registrado en el estado de Chiapas, con el fin de identificar los factores que contribuyeron a su aparición y mantenimiento.

Los modelos compartimentales permiten descomponer procesos complejos en transiciones ordenadas entre estados epidemiológicos. Para *C. hominivorax*, esta aproximación resulta adecuada debido a que su ciclo incluye etapas definidas que pueden representarse mediante compartimentos susceptibles, expuestos, infestados y recuperados. A diferencia de las simulaciones centradas en la TIE (Técnica del Insecto Estéril) o modelos climáticos aislados, esta propuesta integra múltiples componentes para generar un panorama mayor de la dinámica observada.

2 Antecedentes

La literatura existente documenta modelos enfocados principalmente en evaluar estrategias de liberación de machos estériles (Dhahbi et al., 2020) y modelos ecofisiológicos que analizan el efecto del clima sobre la distribución del parásito (Gutiérrez et al., 2019). Sin embargo, no se han encontrado modelos que incorporen lo siguiente:

1. Ciclo de vida del parásito.
2. Datos climáticos (humedad, precipitación y temperatura)
3. Componentes socioeconómicos (entrada legal e ilegal de ganado)

Por ello, se plantea el desarrollo de un modelo SEIRS expandido que capture las transiciones biológicas del gusano, su interacción con factores ambientales y socioeconómicos.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Desarrollar y validar un modelo epidemiológico SEIRS expandido que represente la dinámica del rebrote de miasis por *C. hominivorax* en Chiapas, integrando parámetros biológicos, climáticos y socioeconómicos.

3.2 Objetivos específicos

1. Construir un modelo compartimental SEIRS que represente la dinámica de infestación en ganado bovino.
2. Obtener y depurar parámetros biológicos y ambientales mediante revisión documental y bases oficiales.
3. Implementar análisis de sensibilidad local y global utilizando muestreo tipo Latin Hypercube e índices de Sobol.
4. Simular escenarios antes, durante y después del rebrote a fin de identificar los parámetros con mayor influencia en la dinámica observada.

4 Metodología

4.1 Integración y curación de bases de datos

La información se recopilará desde fuentes oficiales y científicas, incluyendo:

- SENASICA/SADER: número de casos confirmados y sus fechas.
- INEGI: ingreso de ganado.
- USDA/COMEXA: frecuencia y volumen de liberaciones de machos estériles.

- CONAGUA: registros de precipitación, humedad relativa y temperatura.
- Además de referencias como:
(ingresar bibliografía de dónde se sacan tasas sobre el ciclo de vida de la larva) Literatura especializada: tasas biológicas (oviposición, maduración larvaria, pupación, emergencia y longevidad).

4.2 Formulación del modelo SEIRS expandido

El modelo propuesto describe la dinámica epidemiológica de la miasis por *Cochliomyia hominivorax* en bovinos mediante un esquema compartimental tipo SEIRS. El flujo básico considera cuatro estados:

$$S \rightarrow E \rightarrow I \rightarrow R \rightarrow S$$

donde:

- **S**: bovinos susceptibles.
- **E**: bovinos expuestos (oviposición o presencia temprana de larvas).
- **I**: bovinos infestados (lesiones con larvas activas).
- **R**: bovinos recuperados temporalmente (lesiones tratadas o cicatrizadas).

El retorno $R \rightarrow S$ representa la **pérdida de protección**, la **generación de nuevas heridas**, o el **reinicio del riesgo** tras la curación.

Además del ciclo SEIRS en bovinos, se incorpora explícitamente el ciclo biológico del gusano barrenador:

$$A \rightarrow H \rightarrow L \rightarrow P$$

con:

- **A** = adultos (moscas reproductivas)
- **H** = huevos
- **L** = larvas
- **P** = pupas

Estos dos subsistemas se acoplan mediante la **fuerza de infestación**, que depende del número de adultos y del clima.

4.2.1 Módulos adicionales del modelo

A continuación se describen los tres módulos que complementan el modelo SEIRS y que permiten incorporar mejor las condiciones reales del rebrote.

4.2.2 Módulo climático

El desarrollo del gusano barrenador depende mucho del clima. Para que pase de huevo → larva → pupa → adulto, necesita buena temperatura, suficiente humedad y lluvia.

Por eso, cada parámetro del ciclo biológico ($\alpha, \eta, \kappa, \epsilon$) se ajusta con una función que nos dice **qué tan favorable es el clima** en ese momento.

La función combina temperatura (T), precipitación (P) y humedad (H):

$$f_c(T, P, H) = \left(\frac{T - T_{min}}{K} \right) \left(\frac{P - P_{min}}{K} \right) \left(\frac{H - H_{min}}{K} \right)$$

- Si el clima está “ideal”, la función da valores grandes y el gusano se desarrolla rápido.
- Si el clima está “malo”, los valores bajan y el desarrollo se frena.

Este factor se multiplica directamente en tus parámetros de paso:

- α : oviposición ajustada
- η : paso huevo \rightarrow larva
- κ : paso larva \rightarrow pupa
- ϵ : paso pupa \rightarrow adulto

Así el modelo reacciona automáticamente a las condiciones reales.

4.2.3 Módulo socioeconómico

Además del clima, la entrada de animales al estado afecta la dinámica de la miasis. Aquí se consideran dos tipos:

- **entrada legal**, que aumenta bovinos susceptibles registrados,
- **entrada ilegal**, que puede mover casos entre municipios sin registros oficiales.

Como no podemos medir exactamente cuánto ganado ilegal entra, usamos un ajuste sencillo:

$$\rho = \frac{\text{incautaciones}}{\text{estimación total}}$$

Este ajuste representa el nivel de ganado ilegal que pudo entrar. Lo cual influye directamente en:

- la cantidad de bovinos susceptibles S
- la posibilidad de introducir animales infestados
- y el mantenimiento del riesgo durante el rebrote

4.2.4 Módulo de mitigación

Este módulo representa la **Técnica del Insecto Estéril (TIE)**, que disminuye la reproducción del gusano.

Cuando se liberan machos estériles, compiten con los machos normales, pero si una hembra se aparea con un macho estéril, los huevos no son viables.

En el modelo esto se ajusta modificando la oviposición real:

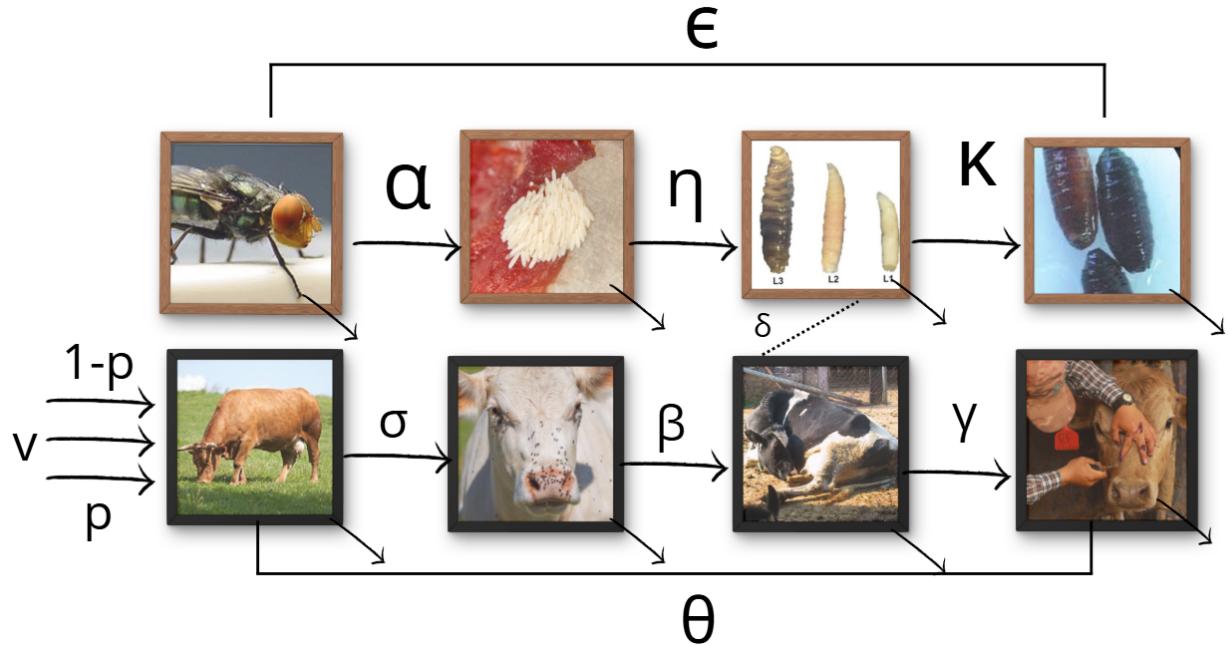
$$\alpha_{ef} = \alpha(1 - u)$$

donde:

- u = proporción de hembras que sí fueron fecundadas por machos estériles.

Entre mayor sea u , menor es la oviposición efectiva, y por lo tanto, disminuye la producción de larvas.

Este módulo permite simular escenarios con liberaciones bajas, medias o intensivas.



A continuación se presenta la formulación del modelo completo mediante ecuaciones diferenciales:

La población total del hospedero es:

$$N_v = S_v + E_v + I_v + R_v$$

Ecuaciones para el hospedero

-> Susceptibles

$$\frac{dS_v}{dt} = \text{natalidad} + p_1 + p_2 - \sigma S_v \left(\frac{M}{N_v} \right) - \mu_v S_v + \theta R_v$$

-> Expuestos

$$\frac{dE_v}{dt} = \sigma S_v \left(\frac{M}{N_v} \right) - \beta E_v - \mu_v E_v$$

-> Infestados

$$\frac{dI_v}{dt} = \sigma S_v \left(\frac{M}{N_v} \right) - \beta E_v - \gamma I_v + \delta M_l I_v - \mu_v I_v$$

-> Recuperados

$$\frac{dR_v}{dt} = \gamma I_v - \mu_v R_v - \theta R_v$$

Ciclo del gusano barrenador

-> Adultos

$$\frac{dM}{dt} = \epsilon M_p - \alpha M - \mu_m M$$

-> Huevos

$$\frac{dM_o}{dt} = \alpha M - (\eta + \mu_m)M_o$$

-> Larvas

$$\frac{dM_l}{dt} = \eta M_o - (\kappa + \mu_m)M_l$$

-> Pupas

$$\frac{dM_p}{dt} = \kappa M_l - (\epsilon + \mu_m)M_p$$

4.2.5 Obtención de Parámetros

Estos se basan en la biología conocida de la mosca *Cochliomyia hominivorax* y se obtienen principalmente de literatura científica, estudios entomológicos y reportes de programas de erradicación (como el de COPEG o agencias gubernamentales como SENASICA/USDA). La siguiente información se obtuvo de SENASICA (2020):

- El parámetro α_{base} representa la tasa promedio de producción de huevos por mosca adulta por día en condiciones ideales.

$$\alpha_{\text{base}} = \frac{\text{Huevos totales puestos en su vida}}{\text{Esperanza de vida reproductiva de la hembra (días)}}$$

Dato Biológico	Valor	Uso en α_{base}
Población en A	50% Hembras, 50% Machos	Solo las hembras oviponen.
Oviposición por Masa	200 a 400 huevos (Usamos 300)	Se usa para calcular la producción total.
Masas Totales	Hasta cuatro masas de huevos en su vida.	Se usa para calcular la producción total.
Vida Reproductiva	El apareamiento ocurre entre el día 3-5, y la oviposición comienza al día 6. La vida es de ≈ 20 días.	La fase reproductiva dura aproximadamente $20 - 6 = 14$ días.

Valor que usaremos para el modelo: $\alpha_{\text{base}} \approx 43$ por día.

Ajuste de la fecundidad por Técnica del Insecto Estéril (TIE)

Para estimar cuánto baja la reproducción por las liberaciones de machos estériles, usamos el parámetro u , que representa la proporción de hembras silvestres que quedan esterilizadas al aparearse con machos estériles.

La fórmula estándar de la TIE es:

$$u = \frac{CS}{CS + W}$$

donde: - S : machos estériles liberados por día, - W : machos silvestres, - C : competitividad del macho estéril.

La competitividad C se usa porque el macho estéril no siempre compite igual que el silvestre: a veces vuela menos, vive menos o es menos atractivo. Por eso no basta con contar moscas; hay que ponderar su “calidad”.

Se tomo $C = 0.5$ como valor medio estimado para *C. hominivorus*, ya que específicamente de esta mosca, no hay registros, sin embargo basado en la literatura de otros vectores, ronda entre 0.3 y 0.7, por lo que es el promedio.

```
C <- 0.5          # competitividad promedio
```

Con los datos de SENASICA (885 millones de moscas estériles entre nov 2024 y mayo 2025) (<https://www.gob.mx/agricultura/articulos/tecnica-del-insecto-esteril-la-tecnologia-que-esta-aplicando-el-gobierno-de-mexico-contra-el-gusano-barrenador-del-ganado>), el promedio diario fue:

```
lib_tot <- 885e6
dias <- as.numeric(as.Date("2025-05-16") - as.Date("2024-11-30"))
```

```
S <- lib_tot / dias      # estériles por día
S
```

```
## [1] 5299401
```

y, dado que el programa opera con una relación 10 moscas estériles por 1 silvestre (<https://www copeg.org/gusano-barrenador/#insecto>):

```
W <- S/10
W
```

```
## [1] 529940.1
```

Sustituyendo en la fórmula:

```
u <- (C*S)/(C*S + W)
u
```

```
## [1] 0.8333333
```

$$u \approx 0.83$$

Esto significa que alrededor del **83% de las hembras quedan estériles**.

Finalmente, se ajusta la fecundidad del modelo reduciendo la tasa original :

$$\alpha_{ef} = \alpha(1 - u)$$

Como $u = 0.83$, queda:

```
alpha_ef <- 43 * (1 - u)
alpha_ef
```

```
## [1] 7.166667
```

$$\alpha_{ajustado} \approx 7.17 \text{ huevos/día con TIE (} u = 0.83).$$

Tasa de Mortalidad del Adulto (μ_A) El parámetro μ_A es el inverso de la esperanza de vida promedio del adulto en la naturaleza.

- Vida de los Machos: 14 a 21 días (Promedio: 17.5 días)
- Vida de las Hembras: 10 a 30 días (Promedio: 20 días)
- Vida Promedio Ponderada (asumiendo 50% machos, 50% hembras):

$$\text{Vida Promedio} \approx \frac{17.5 + 20}{2} = 18.75 \text{ días}$$

La tasa de mortalidad diaria (μ_A) se calcula como el inverso del tiempo promedio de vida:

$$\mu_A = \frac{1}{\text{Vida Promedio}} \approx \frac{1}{18.75} \approx 0.0533$$

Valor que usaremos para el modelo: $\mu_A \approx 0.053$ por día

- Para estimar directamente los parámetros de tasas de transición (η, κ, ϵ) para el ciclo de vida del parásito ($H \rightarrow L \rightarrow P \rightarrow A$). Usaremos la siguiente formula

$$\text{Tasa de Transición } (\lambda) = \frac{1}{\text{Tiempo Promedio de la Fase } (\tau \text{ días})}$$

Parámetro	Fase	Duración Promedio (τ)	Tasa Diaria ($\lambda = 1/\tau$)	Valor que usaremos para el modelo
η_{base}	Huevo → Larva	0.4167 días	1/0.4167	2.4
κ_{base}	Larva → Pupa	6 días	1/6	0.167
ϵ_{base}	Pupa → Adulto	8.5 días	1/8.5	0.118

4.2.6 Parámetros del Compartimento Bovino (SEIRS)

Los parámetros del modelo SEIRS para bovinos se calculan utilizando datos epidemiológicos del rebrote de miasis por *Cochliomyia hominivorax* en Chiapas durante 2024-2025, en combinación con información biológica documentada por SENASICA.

Notación de parámetros:

- σ : tasa de transición Susceptible → Expuesto (oviposición e incubación)
- β : tasa de transición Expuesto → Infestado (desarrollo larvario temprano)
- γ : tasa de transición Infestado → Recuperado (tratamiento y cicatrización)
- θ : tasa de transición Recuperado → Susceptible (pérdida de protección)

4.2.6.1 Obtención de Parámetros Estos parámetros se basan en datos epidemiológicos oficiales de SENASICA/INEGI.

Parámetro σ (Susceptible → Expuesto)

El parámetro σ representa la **tasa de incidencia**, calculada a partir de la proporción de casos observados durante el período del brote.

Paso 1: Cálculo de la proporción de incidencia

La proporción de incidencia se calcula como la fracción de la población bovina que fue infestada durante el período del brote:

$$\text{Proporción de incidencia} = \frac{\text{Casos confirmados}}{\text{Población total}}$$

Datos:

	Valor	Fuente
Población bovina 2022 (Censo INEGI)	1,653,718 cabezas	INEGI (2022)
Tasa de crecimiento anual	8.06%	INEGI (2022)
Período de proyección	2022 → 2025 (3 años)	-
Casos confirmados en Chiapas	1,326 casos	SENASICA (2025)

Cálculo de la población bovina en 2025:

$$N_{2025} = N_{2022} \times (1 + r)^t$$

$$N_{2025} = 1,653,718 \times (1.0806)^3 = 1,653,718 \times 1.2617 = 2,086,688 \text{ cabezas}$$

Cálculo de la proporción de incidencia:

$$\text{Proporción} = \frac{1,326}{2,086,688} = 6.35 \times 10^{-4}$$

Paso 2: Conversión a tasa de incidencia

$$\sigma = \frac{\text{Proporción de incidencia}}{\text{Duración del brote (días)}}$$

Datos temporales del brote:

	Valor	Fuente
Inicio del brote	Noviembre 2024	SENASICA (2024)
Casos reportados hasta	24 de noviembre 2025	SENASICA (2025)
Duración del brote	365 días	Calculado

Cálculo de σ (tasa de incidencia):

$$\sigma = \frac{6.35 \times 10^{-4}}{365 \text{ días}} = 1.74 \times 10^{-6} \text{ día}^{-1}$$

Valor que usaremos para el modelo: $\sigma \approx 1.74 \times 10^{-6}$ día $^{-1}$ (0.00000174 día $^{-1}$)

Parámetro β (Expuesto → Infestado)

El parámetro β representa la tasa a la cual bovinos con huevos depositados o larvas recién eclosionadas desarrollan una infestación clínicamente detectable.

Base biológica (SENASICA, 2020): Entre 12 y 24 horas después de la oviposición las larvas eclosionan y se alimentan de tejido vivo durante 4 a 8 días.

Componentes del estado Expuesto (E):

Fase	Duración
Huevos (pre-eclosión)	12-24h (promedio 18h)
Larvas recién nacidas	24-32h (promedio 30h)
Total en estado E	~2 días (48 h)

$$\text{Tasa de Transición } (\beta) = \frac{1}{\text{Tiempo Promedio en E } (\tau_E \text{ días})}$$

$$\beta = \frac{1}{2 \text{ días}} = 0.5 \text{ día}^{-1}$$

Valor que usaremos para el modelo: $\beta \approx 0.5$ día $^{-1}$

4.2.6.2 Parámetro γ (Infestado → Recuperado) El parámetro γ representa la tasa a la cual bovinos infestados se recuperan tras eliminación natural de larvas.

Base biológica:

- **Sin tratamiento:** La miasis puede ser fatal en 7-10 días

Cálculo:

$$\tau_{\text{recuperación}} = 7 \text{ días}$$

$$\gamma = \frac{1}{\tau_{\text{recuperación}}} = \frac{1}{7} \approx 0.143 \text{ día}^{-1}$$

Valor que usaremos para el modelo: $\gamma \approx 0.14$ día $^{-1}$

4.3 Referencias

- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria [SENASICA]. (2020). Todo lo que usted debe saber sobre la erradicación de la miasis causada por el gusano barrenador del ganado (GBG). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/936256/TODO_LO_QUE_DEBES_SABER_SOBRE_LA_ERRADICACION_DE_LA_MIASIS_CAUSADA_POR_GBG.pdf