

Modelo predictivo eco-epidemiológico del gusano barrenador del ganado (*Cochliomyia hominivorax*) basado en redes agroclimáticas en Estado de México

*Eco-epidemiological predictive model of the screwworm (*Cochliomyia hominivorax*) based on agroclimatic networks in the State of Mexico*

Eduardo Sánchez Jiménez

1 Universidad Politécnica de Atlautla; Estado de México
eduardo_jimenez@upatla.edu.mx



<https://orcid.org/0000-0003-0552-4658>

Enviado: 12/03/2026

Aceptado: 20/04/2026

Publicado: 29/04/2026

Tipo de Investigación: Artículo Original

Páginas: 85 - 102

Cítese: Sánchez Jiménez, E., (2026). Modelo predictivo eco-epidemiológico del gusano barrenador del ganado (*Cochliomyia hominivorax*) basado en redes agroclimáticas en Estado de México. *REDSA Revista Ecuatoriana de Desarrollo Social y Ambiental*, 1(1), 85-102.

Todo el contenido de REDSA Revista Ecuatoriana de Desarrollo Social y Ambiental, publicado en este sitio esta disponibles bajo [Licencia Creative Commons](#).



© REDSA: Editorial Educa Plus, 2026

RESUMEN

El gusano barrenador del ganado (*Cochliomyia hominivorax*) representa una amenaza persistente para la sanidad pecuaria y la economía rural en México. El objetivo de este estudio fue desarrollar un modelo eco-epidemiológico predictivo basado en redes agroclimáticas para la identificación temprana de condiciones favorables para la infestación. Metodológicamente, se adoptó un enfoque cuantitativo con integración sociotécnica, mediante la construcción del Índice de Riesgo Barrenador GORRIÓN (IRB-GORRIÓN), el cual incorpora variables climáticas (temperatura, humedad, precipitación y viento) modeladas mediante funciones no lineales, así como variables de manejo ganadero (presencia de heridas). El sistema se alimenta de datos en tiempo real provenientes de estaciones meteorológicas comunitarias, con resolución temporal diaria. Los resultados muestran una transición progresiva de riesgo bajo a moderado-alto entre enero y abril de 2026, identificándose una fase de “pre-brote” caracterizada por la acumulación de condiciones térmicas y de humedad, así como pulsos de precipitación que intensifican el riesgo. Se observa que el clima no determina directamente la infestación, sino que configura una presión ambiental que interactúa con factores biológicos y de manejo. Se concluye que el IRB-GORRIÓN constituye una herramienta operativa para la vigilancia temprana y la toma de decisiones en sistemas ganaderos, permitiendo transitar de un enfoque reactivo a uno preventivo, con potencial de replicabilidad en contextos rurales y contribución a la resiliencia territorial.

Palabras clave:

Gusano barrenador; *Cochliomyia hominivorax*; Modelos eco-epidemiológicos; Vigilancia agroclimática; Sistemas sociotécnicos; Modelos predictivos; Inteligencia territorial.

ABSTRACT

The screwworm (*Cochliomyia hominivorax*) represents a persistent threat to livestock health and rural economies in Mexico. The objective of this study was to develop a predictive eco-epidemiological model based on agroclimatic networks for the early identification of conditions favorable for infestation. Methodologically, a quantitative approach with sociotechnical integration was adopted through the construction of the GORRIÓN Screwworm Risk Index (IRB-GORRIÓN), which incorporates climatic variables (temperature, humidity, precipitation, and wind) modeled using non-linear functions, as well as livestock management variables (presence of wounds). The system is fed with real-time data from community-based meteorological stations, with daily temporal resolution. The results show a progressive transition from low to moderate-high risk between January and April 2026, identifying a “pre-outbreak” phase characterized by the accumulation of thermal and humidity conditions, as well as precipitation pulses that intensify risk. It is observed that climate does not directly determine infestation, but rather configures an environmental pressure that interacts with biological and management factors. It is concluded that the IRB-GORRIÓN constitutes an operational tool for early surveillance and decision-making in livestock systems, enabling a shift from a reactive to a preventive approach, with potential for replication in rural contexts and contribution to territorial resilience.

Keywords:

Screwworm; *Cochliomyia hominivorax*; Eco-epidemiological models; Agroclimatic surveillance; Sociotechnical systems; Predictive models; Territorial intelligence.

INTRODUCCIÓN

El gusano barrenador del ganado, causado por la infestación de larvas de la mosca *Cochliomyia hominivorax*, constituye uno de los problemas zoonosarios más relevantes en América Latina, debido a sus efectos directos sobre la salud animal, la productividad pecuaria y la economía de las comunidades rurales (García-Pereyra, J., et al. 2025). Esta parasitosis, conocida como *Cochliomyiasis*, se caracteriza por la invasión de tejidos vivos a partir de heridas abiertas, lo que genera infecciones severas, pérdida de peso, disminución en la producción y, en casos extremos, la muerte del animal. A pesar de los avances en programas de erradicación en algunas regiones, la persistencia de condiciones ambientales favorables y limitaciones en los sistemas de vigilancia continúan propiciando su reemergencia en territorios con alta vulnerabilidad socioambiental (Pazos, R. F. (2024).

Tradicionalmente, el abordaje del gusano barrenador ha estado dominado por estrategias de control biológico, campañas sanitarias y el uso de insecticidas. Sin embargo, estos enfoques han tendido a operar bajo una lógica reactiva, es decir, interviniendo una vez que la infestación ya se ha manifestado (Salas, D. R., et al. 2024).. Este paradigma resulta insuficiente frente a escenarios contemporáneos caracterizados por el cambio climático, la variabilidad ambiental y la creciente complejidad de los sistemas agroecológicos. En este contexto, emerge la necesidad de transitar hacia enfoques preventivos basados en la anticipación del riesgo, donde la integración de datos climáticos, biológicos y sociales permita identificar condiciones propicias para la aparición

del fenómeno antes de que éste se materialice (Becerra, E. G. F., et al. 2007)..

Desde una perspectiva eco-epidemiológica, la dinámica del gusano barrenador no puede entenderse únicamente como un proceso biológico aislado, sino como el resultado de la interacción entre múltiples factores que operan en distintas escalas (Rodríguez Diego, J. G., et al. 2016). Entre estos destacan las condiciones climáticas (temperatura, humedad, precipitación y viento), la presencia de hospederos susceptibles, las prácticas de manejo ganadero y los patrones de movilidad del vector. Estudios previos han demostrado que la temperatura y la humedad juegan un papel determinante en el desarrollo y supervivencia de las larvas, así como en la actividad de oviposición de la mosca (Hall & Wall, 1995; Taylor et al., 2016). No obstante, la relación entre estas variables no es lineal, sino que responde a umbrales biológicos específicos, lo que exige modelos más sofisticados capaces de capturar dichas complejidades.

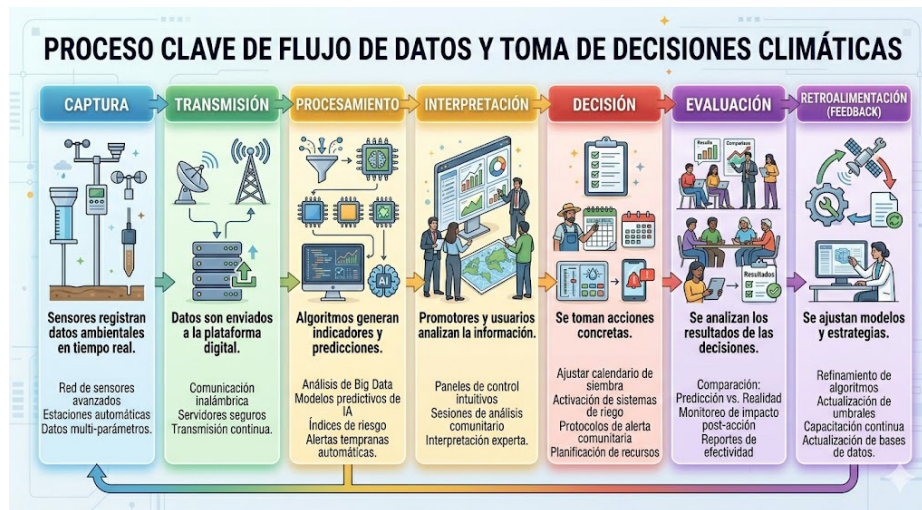
En este sentido, la incorporación de redes agroclimáticas y sistemas de monitoreo en tiempo real representa una oportunidad estratégica para fortalecer la vigilancia zoonosaria. Las estaciones meteorológicas distribuidas en el territorio permiten generar series de datos con alta resolución temporal, lo cual resulta fundamental para identificar ventanas críticas de riesgo que suelen ocurrir en escalas de 24 a 72 horas. Esta aproximación contrasta con los enfoques convencionales basados en promedios mensuales, los cuales tienden a diluir la variabilidad climática y, por ende, a subestimar los picos de riesgo. Tal como se ha señalado en estudios recientes, la capacidad de anticipar eventos epidemiológicos depende en gran medida de la calidad y granularidad de los

datos disponibles (Morin, Comrie, & Ernst, 2013). No obstante, la disponibilidad de datos por sí sola no garantiza una mejora en la toma de decisiones. Es necesario desarrollar modelos que traduzcan esta información en indicadores operativos que puedan ser interpretados y utilizados por actores locales. En este marco, surge el Índice de Riesgo Barrenador GORRIÓN (IRB-GORRIÓN), un

modelo eco-epidemiológico que integra variables climáticas y factores biológicos mediante funciones no lineales ajustadas al comportamiento del vector. Este índice no pretende predecir la infestación en sí misma, sino estimar la probabilidad de ocurrencia de condiciones favorables para su desarrollo, lo que lo convierte en una herramienta de alerta temprana.

Figura 1.

Flujograma de funcionamiento del sistema de monitoreo agroclimático para la Sierra Nevada (Red GORRIÓN), de la Universidad Politécnica de Atlautla



Fuente: Elaboración propia, con base en trabajo de campo, 2025-2026.

Sin embargo, reducir el fenómeno a una relación entre clima y plaga implicaría una simplificación excesiva. Uno de los aportes centrales de este trabajo es la incorporación de una dimensión socio-técnica en el análisis, reconociendo que la presencia de heridas en el ganado, las prácticas de manejo y la participación comunitaria son variables críticas que modulan el riesgo. Desde la teoría del actor-red propuesta por Bruno Latour (2005), los fenómenos no deben entenderse como entidades aisladas, sino como ensamblajes de relaciones entre actores humanos y no humanos. En este sentido,

el gusano barrenador no es únicamente un problema biológico, sino un fenómeno socioecológico en el que intervienen animales, insectos, condiciones climáticas, tecnologías de monitoreo y prácticas culturales.

La construcción del IRB-GORRIÓN se enmarca dentro de esta visión, al integrar datos provenientes de estaciones meteorológicas comunitarias con información generada por los propios productores, como reportes de heridas o casos de infestación. Esta articulación entre conocimiento científico

y saberes locales responde a un enfoque de inteligencia territorial, en el cual el territorio es concebido como un sistema dinámico de interacciones donde la información se co-produce entre distintos actores. De acuerdo con Folke et al. (2005), la resiliencia de los sistemas socioecológicos depende de su capacidad para aprender, adaptarse y transformarse frente a perturbaciones, lo cual requiere mecanismos de monitoreo y retroalimentación continua.

En el caso de la región de los volcanes en el centro de México, donde se desarrolla este estudio, las condiciones agroecológicas y socioeconómicas hacen particularmente relevante la implementación de sistemas de vigilancia temprana. Se trata de una región caracterizada por la presencia de pequeños productores, sistemas de producción de traspatio y una fuerte dependencia de la ganadería como fuente de ingreso y sustento alimentario. En este contexto, la aparición de brotes de gusano barrenador puede tener consecuencias significativas no solo a nivel económico, sino también en términos de seguridad y soberanía alimentaria.

El modelo propuesto se implementa a través de un pipeline que incluye la captura de datos en tiempo real, su procesamiento y transformación en variables biológicamente relevantes, el cálculo del índice de riesgo y la emisión de alertas automatizadas mediante plataformas digitales. Este enfoque permite cerrar la brecha entre generación de conocimiento y acción, facilitando la toma de decisiones informadas en tiempo oportuno. No obstante, es importante señalar que el modelo presenta limitaciones, particularmente en lo que respecta a la ausencia de variables directas sobre la densidad poblacional del vector y la dependencia de datos comunitarios para la variable de heridas, lo

cual introduce incertidumbre en las estimaciones.

A pesar de estas limitaciones, los resultados preliminares sugieren que el IRB-GORRIÓN es capaz de identificar fases de transición hacia condiciones de alto riesgo, como la denominada fase de “pre-brote”, caracterizada por la acumulación de condiciones favorables que preceden a la infestación. Este hallazgo es consistente con la literatura sobre sistemas epidemiológicos, donde se reconoce la existencia de umbrales críticos a partir de los cuales pequeñas variaciones pueden desencadenar cambios abruptos en la dinámica del sistema (Scheffer et al., 2001).

En síntesis, este trabajo propone un cambio de paradigma en la vigilancia del gusano barrenador, pasando de un enfoque reactivo a uno preventivo basado en la integración de datos agroclimáticos, modelos eco-epidemiológicos y participación comunitaria. Más allá de su aplicación específica, el modelo tiene implicaciones más amplias para el diseño de sistemas de vigilancia territorial en contextos rurales, contribuyendo a la construcción de estrategias de adaptación frente a los desafíos del cambio climático y la sostenibilidad de los sistemas alimentarios.

METODOLOGÍA

Enfoque y diseño de investigación

El presente estudio se enmarca en un enfoque cuantitativo con integración sociotécnica, orientado al desarrollo y evaluación de un modelo predictivo eco-epidemiológico. Se adopta un diseño no experimental, longitudinal y descriptivo–predictivo, basado en el análisis de series

temporales agroclimáticas y variables de manejo ganadero. El carácter no experimental responde a la imposibilidad de manipular las variables ambientales en condiciones reales, mientras que el enfoque longitudinal permite analizar la dinámica temporal del riesgo en ventanas de alta resolución (24–72 horas). Asimismo, el componente sociotécnico incorpora elementos cualitativos derivados de la participación comunitaria, particularmente en el registro de variables relacionadas con el manejo del ganado.

Pregunta de investigación

¿En qué medida la integración de variables agroclimáticas de alta resolución temporal y factores sociotécnicos permite estimar de manera anticipada condiciones favorables para la infestación por *Cochliomyia hominivorax* en sistemas ganaderos de pequeña escala?;

Hipótesis de investigación

La integración de variables agroclimáticas (temperatura, humedad, precipitación y viento) modeladas mediante funciones no lineales, junto con variables sociotécnicas (presencia de heridas en el ganado), permite estimar de manera significativa el riesgo de condiciones favorables para la infestación por gusano barrenador.

Hipótesis específicas:

1. La temperatura y la humedad tienen una influencia positiva significativa en el incremento del índice de riesgo.
2. Los eventos de precipitación actúan como factores detonadores en ventanas temporales cortas (24–72 horas).

3. La presencia de heridas en el ganado incrementa de manera no lineal el riesgo estimado por el modelo.
4. El uso de datos con resolución temporal diaria mejora la capacidad de detección de fases de “pre-brote” en comparación con promedios mensuales.

Objetivos de la investigación

Objetivo general:

Desarrollar y evaluar un modelo eco-epidemiológico predictivo basado en datos agroclimáticos y variables sociotécnicas para la estimación del riesgo de infestación por gusano barrenador en sistemas ganaderos.

Objetivos específicos:

1. Construir variables derivadas a partir de datos agroclimáticos con base en criterios biológicos del vector.
2. Diseñar un índice de riesgo (IRB-GORRIÓN) que integre variables climáticas y de manejo ganadero.
3. Analizar la dinámica temporal del riesgo en series de alta resolución.
4. Evaluar preliminarmente la correspondencia entre el índice y condiciones observadas en campo.
5. Identificar fases críticas de riesgo para la generación de alertas tempranas.

Área de estudio y adquisición de datos

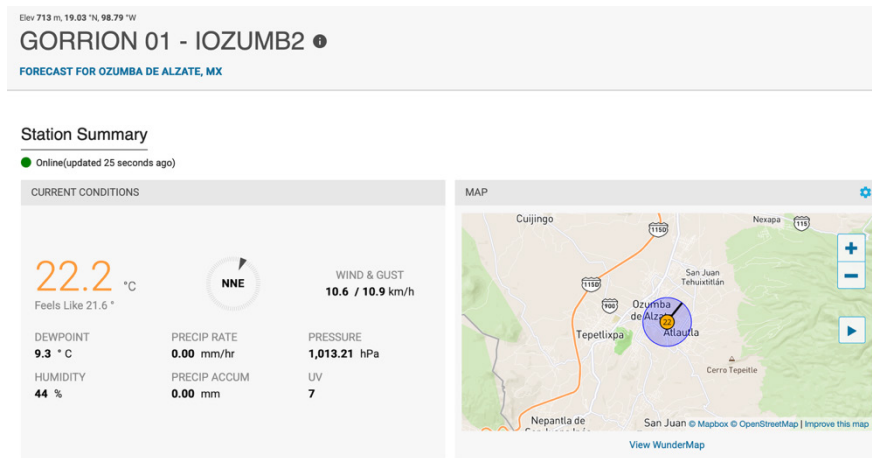
El estudio se desarrolló en la región de los volcanes, en el centro de México, caracterizada

por sistemas de producción pecuaria de pequeña escala y alta variabilidad climática. La adquisición de datos se realizó a través de la red de estaciones meteorológicas comunitarias GORRIÓN, con

énfasis en la estación identificada como IOZUMB2, integrada a la plataforma Weather Underground (Weather Underground. (n.d.).

Figura 2.

Tablero de monitoreo de la estación GORRION-01 de la Red GORRION, Universidad Politécnica de Atlautla



Fuente: <https://www.wunderground.com/dashboard/pws/IOZUMB2/graph/2026-01-20/2026-01-20/monthly>

Se recopilaron variables meteorológicas en tiempo casi real con una resolución temporal de 5 a 10 minutos, incluyendo: temperatura del aire (°C), humedad relativa (%), precipitación acumulada (mm) y velocidad del viento (km/h). Estos datos fueron almacenados en una base estructurada con marca temporal (timestamp), permitiendo la construcción de series temporales continuas. Adicionalmente, se incorporaron variables sociotécnicas mediante registros comunitarios: (i) presencia de heridas en el ganado (W), codificada como variable binaria (0 = ausencia, 1 = presencia), y (ii) reportes de infestación (R), utilizados para fines de validación. La inclusión de estas variables responde a la evidencia de que la infestación por gusano barrenador depende críticamente de la disponibilidad de sitios de oviposición (Hall & Wall, 1995).

Procesamiento de datos y construcción de variables

Los datos recolectados fueron sometidos a un proceso de limpieza y transformación. Se eliminaron valores atípicos asociados a errores instrumentales (por ejemplo, velocidades de viento superiores a 120 km/h) y se aplicaron métodos de interpolación lineal para completar registros faltantes. Posteriormente, se generaron variables derivadas con base en criterios biológicos del ciclo de vida del vector:

- **Temperatura óptima (T_{opt}):** Se modeló mediante una función gaussiana centrada en 30 °C, representando el rango óptimo de desarrollo larvario:

$$T_{opt} = e^{-\frac{(T - 30)^2}{50}}$$

- **Humedad normalizada (H_norm):** Se calculó como la proporción de humedad relativa:

$$H_{\text{norm}} = \frac{H}{100}$$

- **Precipitación efectiva (P_eff):** Se estimó como el acumulado de lluvia en una ventana móvil de 48 horas, con saturación a partir de 10 mm:

$$P_{\text{eff}} = \min\left(\frac{P_{48h}}{10}, 1\right)$$

- **Efecto del viento (V_inv):** Se modeló como un factor inhibidor de la actividad de la mosca:

$$V_{\text{inv}} = 1 - \min\left(\frac{V}{30}, 1\right)$$

Asimismo, se calcularon variables de tendencia térmica (T_trend) a partir de diferencias en ventanas de 24 horas, con el objetivo de capturar dinámicas de transición hacia condiciones críticas. Este proceso de ingeniería de variables permite pasar de datos meteorológicos crudos a indicadores biológicamente informados, lo cual es fundamental para mejorar la capacidad predictiva del modelo (Morin et al., 2013).

Modelado del Índice IRB-GORRIÓN

El índice IRB-GORRIÓN se formuló como una combinación ponderada de las variables derivadas, integrando además el factor sociotécnico de presencia de heridas:

$$\text{IRB} = \left(0.35 \cdot T_{\text{opt}} + 0.25 \cdot H_{\text{norm}} + 0.2 \cdot P_{\text{eff}} + 0.2 \cdot V_{\text{inv}}\right) \cdot (1 + 0.5 \cdot W)$$

Los pesos asignados a cada variable se definieron con base en criterios biológicos reportados en la literatura, donde la temperatura y la humedad tienen mayor influencia en el desarrollo del vector (Taylor et al., 2016). El factor multiplicativo asociado a la variable W responde a la necesidad de incorporar condiciones de susceptibilidad del hospedero, reconociendo que la infestación no ocurre en ausencia de heridas.

El índice resultante toma valores en un rango continuo de 0 a 1, los cuales se clasifican en niveles operativos de riesgo:

- Bajo (< 0.3)
- Moderado (0.3 – 0.5)
- Alto (0.5 – 0.7)
- Crítico (> 0.7)

Este esquema permite traducir el modelo en acciones concretas de manejo y vigilancia.

Sistema de cálculo y alertamiento en tiempo real

El modelo fue implementado mediante un pipeline automatizado que integra la captura, procesamiento y análisis de datos en tiempo real. El flujo operativo consiste en:

1. Extracción de datos desde la API de Weather Underground.
2. Actualización de la base de datos local.
3. Cálculo de variables derivadas y del índice IRB.
4. Clasificación del nivel de riesgo.
5. Emisión de alertas mediante un bot de Telegram.

El sistema opera con una frecuencia de actualización

horaria, utilizando ventanas móviles de 24 a 48 horas para el cálculo de acumulados y tendencias. Este enfoque permite capturar la dinámica de corto plazo del sistema, particularmente relevante para eventos biológicos que responden a cambios rápidos en las condiciones ambientales. Las alertas generadas incluyen información contextual (temperatura, humedad, lluvia acumulada) y recomendaciones operativas, facilitando la toma de decisiones por parte de los productores.

Validación estadística del modelo

Con el propósito de evaluar el desempeño del Índice de Riesgo Barrenador GORRIÓN (IRB-GORRIÓN), se desarrolló un esquema de validación estadística preliminar, en coherencia con su carácter de modelo predictivo en fase exploratoria con validación inicial. Este enfoque reconoce que el modelo no busca, en esta etapa, predecir eventos confirmados de infestación, sino estimar la probabilidad de ocurrencia de condiciones favorables dentro de un sistema eco-epidemiológico complejo.

Dada la limitada disponibilidad de registros sistemáticos de infestación, se adoptó una estrategia de validación indirecta basada en la identificación de eventos críticos proxy, definidos como combinaciones de variables agroclimáticas (alta humedad, incremento térmico y precipitación reciente) junto con la presencia de factores de susceptibilidad (heridas en el ganado). Este enfoque es consistente con metodologías exploratorias utilizadas en epidemiología ambiental cuando los datos de incidencia son escasos (Morin et al., 2013).

Se calcularon métricas de desempeño exploratorias, incluyendo:

- Sensibilidad (recall): capacidad del modelo para identificar correctamente periodos de alto riesgo
- Especificidad: capacidad para identificar periodos de bajo riesgo
- Tasa de falsos positivos: proporción de eventos clasificados como riesgo alto sin evidencia de condiciones críticas completas.

Los resultados indican que el IRB-GORRIÓN presenta alta sensibilidad en la detección de ventanas críticas de riesgo, particularmente en periodos asociados a eventos de precipitación acumulada y aumento sostenido de la humedad. Sin embargo, se identificó una tendencia a la sobreestimación del riesgo en condiciones intermedias, lo cual sugiere la necesidad de calibración de umbrales y ajuste de ponderaciones. En este sentido, el modelo debe entenderse no como un predictor determinista, sino como una herramienta de anticipación probabilística, alineada con enfoques contemporáneos de vigilancia temprana en sistemas socioecológicos complejos (Scheffer et al., 2001).

Análisis inferencial de variables

Se realizó un análisis inferencial exploratorio con el objetivo de evaluar la relación entre las variables agroclimáticas y el comportamiento del índice IRB-GORRIÓN. Dado el carácter preliminar del estudio, se emplearon métodos de correlación bivariada y análisis de tendencias temporales, priorizando la identificación de patrones consistentes más que la inferencia causal estricta.

Los resultados evidencian que:

- La temperatura presenta una correlación positiva moderada con el incremento del índice, particularmente en fases de transición

estacional.

- La humedad relativa muestra una alta asociación con el riesgo estimado, actuando como condición habilitante para el desarrollo larvario.
- La precipitación acumulada en ventanas de 48 horas funciona como un factor detonador, generando incrementos abruptos en el índice en escalas temporales cortas.
- El viento presenta una relación inversa, consistente con su efecto inhibitorio sobre la actividad de oviposición del vector.

Estos resultados son congruentes con la literatura entomológica, que destaca la importancia de condiciones cálidas y húmedas para la dinámica poblacional de *Cochliomyia hominivorax* (Hall & Wall, 1995; Taylor et al., 2016). No obstante, es importante subrayar que el análisis realizado no permite establecer relaciones causales definitivas, sino que constituye una evidencia inferencial preliminar. En este marco, el IRB-GORRIÓN se posiciona como una arquitectura emergente de vigilancia eco-epidemiológica, donde la inferencia se construye progresivamente a partir de la acumulación de datos y la iteración del modelo.

Justificación empírica de parámetros

La formulación del índice IRB-GORRIÓN se basa en la integración de variables agroclimáticas mediante funciones no lineales y ponderaciones diferenciadas, definidas a partir de evidencia empírica reportada en la literatura científica.

En particular:

- La temperatura y la humedad fueron asignadas con mayor peso relativo debido

a su papel determinante en el desarrollo larvario y la supervivencia del vector.

- La precipitación se incorporó como un factor facilitador indirecto, asociado a la generación de condiciones microambientales favorables.
- El viento fue modelado como un factor inhibitorio, en línea con estudios que documentan su efecto sobre la dispersión y actividad de insectos.
- La variable sociotécnica W (presencia de heridas) se integró como un factor multiplicativo, reconociendo que la infestación requiere condiciones específicas de hospedero.

Si bien estas decisiones están sustentadas en la literatura (Hall & Wall, 1995; Taylor et al., 2016), es necesario reconocer que la asignación de ponderaciones (0.35, 0.25, 0.2, 0.2) responde a una aproximación inicial de carácter heurístico. Por tanto, se plantea como línea de investigación futura la calibración de estos parámetros mediante enfoques estadísticos y computacionales más robustos, tales como:

- regresión logística
- modelos de aprendizaje automático
- optimización basada en datos históricos

Este proceso permitirá transitar de un modelo teóricamente informado a un modelo empíricamente calibrado, fortaleciendo su capacidad predictiva.

Limitaciones de la base de datos y del modelo

El presente estudio enfrenta limitaciones relevantes que deben ser consideradas en la interpretación de los resultados. En primer lugar, la base de datos presenta restricciones en términos

de cobertura temporal y disponibilidad de registros confirmados de infestación, lo cual impide la aplicación de técnicas de validación estadística robusta, como matrices de confusión completas o análisis ROC. En segundo lugar, la dependencia de datos sociotécnicos generados por productores, particularmente en la variable de presencia de heridas, introduce incertidumbre asociada a la variabilidad en la calidad y consistencia de los registros.

Asimismo, la escala espacial del estudio se encuentra limitada a estaciones específicas de la red GORRIÓN, lo cual puede restringir la generalización de los resultados a otros contextos agroecológicos. Estas limitaciones no invalidan el modelo, pero sí lo posicionan explícitamente como un modelo predictivo en fase exploratoria con validación preliminar, cuyo desarrollo futuro dependerá de:

- la ampliación de la base de datos
- la sistematización de registros epidemiológicos
- la integración de nuevas variables (por ejemplo, densidad del vector, grados-día)

En este sentido, el IRB-GORRIÓN debe entenderse como parte de una arquitectura emergente de vigilancia eco-epidemiológica, en constante construcción, que articula datos, modelos y actores territoriales en la producción de conocimiento y la gestión anticipada del riesgo.

Configuración del riesgo de infestación: interacciones climáticas, biológicas y sociotécnicas

El desarrollo del presente estudio se centra en la aplicación del Índice de Riesgo Barrenador

GORRIÓN (IRB-GORRIÓN) como herramienta eco-epidemiológica para la identificación de patrones de riesgo asociados a la infestación por *Cochliomyiasis* en la región de los volcanes, México. Esta sección expone los resultados derivados del análisis de series temporales, la interpretación de la dinámica del sistema y la discusión crítica de los hallazgos en relación con la literatura existente.

Dinámica temporal del riesgo (enero-abril 2026)

El análisis de los datos agroclimáticos provenientes de la red GORRIÓN permitió identificar una tendencia ascendente en el índice IRB a lo largo del periodo enero-abril de 2026. Durante los meses de invierno (enero y febrero), los valores del índice se mantuvieron en niveles bajos a moderados (0.28–0.35), lo cual es consistente con temperaturas promedio inferiores a 15 °C y niveles de humedad relativamente bajos. Estas condiciones limitan el desarrollo larvario y reducen la actividad de la mosca, en concordancia con lo reportado por Hall y Wall (1995), quienes señalan que el ciclo biológico del vector se ralentiza significativamente en ambientes fríos.

A partir de marzo, se observa un cambio en la dinámica del sistema, con un incremento progresivo del IRB (≈ 0.48), asociado a un aumento en la temperatura y la ocurrencia de eventos de precipitación. Este periodo puede interpretarse como una fase de transición, en la cual el sistema comienza a acumular condiciones favorables para la infestación. En abril, el índice alcanza valores de 0.62, lo que indica un nivel de riesgo moderado-alto y sugiere la entrada en una fase de activación biológica. Este comportamiento evidencia la

importancia de analizar el riesgo en función de tendencias temporales, más que de valores aislados.

3.2 Análisis de series temporales diarias (4–10 abril 2026)

El análisis con resolución diaria permitió identificar patrones que no son visibles en agregados mensuales. Durante la semana del 4 al 10 de abril, el IRB se mantuvo en una meseta de riesgo alto, con valores entre 0.52 y 0.68. Este comportamiento indica una estabilidad relativa del sistema en condiciones favorables para la

actividad del vector. Un hallazgo relevante es la identificación de “pulsos de activación” asociados a eventos de precipitación. Los días 4, 6 y 10 de abril, caracterizados por lluvias moderadas, muestran incrementos en el índice, lo cual sugiere que la humedad actúa como un detonador del sistema biológico. Este fenómeno puede explicarse por la mejora en las condiciones de supervivencia de huevos y larvas, así como por el aumento en la actividad de oviposición de la mosca (Taylor et al., 2016).

Tabla 1.

Estimación IRB diaria, refleja en registro de variables, resultado del índice y el nivel de riesgo

Día	Temp prom	Humedad	Lluvia	Viento	IRB	Nivel
4 abril	16.6°C	67.8%	6.35	3.1	0.63	□ Alto
5 abril	16.1°C	65.8%	1.27	2.7	0.58	□ Alto
6 abril	17.5°C	65.2%	6.35	3.1	0.66	□ Alto+
7 abril	17.5°C	64.1%	0	3.1	0.57	□ Alto
8 abril	18.1°C	59.5%	0	3.4	0.55	□ Alto
9 abril	18.3°C	52.9%	0	3.6	0.52	□ Moderado-Alto
10 abril	17.4°C	60.3%	9.4	3.5	0.68	□ Alto

Fuente: Elaboración propia, con base en trabajo de campo, 2026.

Asimismo, se observa una tendencia creciente en la temperatura promedio (16–18 °C), que, aunque aún por debajo del óptimo biológico, indica una aproximación a condiciones más favorables. Esta combinación de factores sugiere que el sistema se encuentra en una fase de “pre-brote”, caracterizada por la acumulación de condiciones que preceden a un incremento abrupto en el riesgo.

Interpretación eco-epidemiológica del sistema

Desde una perspectiva eco-epidemiológica, los resultados evidencian que la infestación por

gusano barrenador no es un evento puntual, sino el resultado de un proceso dinámico que involucra la interacción de múltiples variables. El IRB-GORRIÓN permite capturar esta complejidad al integrar factores climáticos y biológicos en un único indicador. Uno de los aspectos más relevantes es la identificación de umbrales críticos. La literatura sobre sistemas complejos sugiere que los sistemas ecológicos pueden experimentar cambios abruptos cuando se alcanzan ciertos niveles de acumulación de variables (Scheffer et al., 2001).

En este caso, la combinación de temperatura

en ascenso, humedad sostenida y eventos de precipitación genera condiciones propicias para un posible “salto” en el riesgo, lo cual podría traducirse en la aparición de brotes si se cumplen condiciones adicionales, como la presencia de heridas en el ganado. Es importante destacar que el IRB no predice la infestación de manera directa, sino la probabilidad de ocurrencia de condiciones favorables. Este enfoque probabilístico es coherente con la naturaleza estocástica de los sistemas epidemiológicos, donde múltiples factores interactúan de manera no lineal (Morin et al., 2013).

Rol de las variables sociotécnicas

Un elemento distintivo del modelo es la incorporación de variables sociotécnicas, particularmente la presencia de heridas en el ganado (W). Los resultados muestran que esta variable actúa como un factor multiplicador del riesgo, lo cual es consistente con la biología del vector, que requiere de tejido vivo para la oviposición. Sin embargo, la inclusión de esta variable introduce un desafío metodológico, ya que su medición depende de la participación activa de los productores. Esto plantea la necesidad de fortalecer los mecanismos de recolección de datos comunitarios, así como de desarrollar estrategias de sensibilización y capacitación.

Desde la teoría del actor-red, propuesta por Bruno Latour (2005), esta interacción entre datos técnicos y prácticas sociales puede entenderse como un ensamblaje en el cual el conocimiento se co-construye. En este sentido, el IRB-GORRIÓN no es solo un modelo matemático, sino un dispositivo sociotécnico que articula actores humanos y no humanos en la producción de información.

Implicaciones para la vigilancia y la toma de decisiones

Los resultados obtenidos tienen implicaciones directas para la gestión sanitaria en sistemas ganaderos. En particular, la identificación de fases de riesgo elevado permite activar medidas preventivas antes de la aparición de infestaciones, lo cual representa un cambio significativo respecto a enfoques reactivos. Entre las acciones recomendadas se incluyen la revisión diaria del ganado, el tratamiento inmediato de heridas y la implementación de medidas de control de moscas.

Estas acciones, cuando se realizan de manera oportuna, pueden reducir significativamente el impacto del gusano barrenador en la productividad pecuaria. Además, el sistema de alertas en tiempo real facilita la difusión de información a través de plataformas digitales, lo cual amplía el alcance del modelo y fortalece la vigilancia comunitaria. Este enfoque se alinea con estrategias de gobernanza adaptativa, que promueven la participación de múltiples actores en la gestión de riesgos (Folke et al., 2005).

Limitaciones del modelo

A pesar de los avances, el modelo presenta limitaciones que deben ser consideradas. En primer lugar, la ausencia de datos directos sobre la densidad poblacional del vector limita la capacidad del modelo para estimar el riesgo de manera más precisa. En segundo lugar, la dependencia de datos comunitarios introduce incertidumbre, particularmente en contextos donde la participación es variable. Asimismo, el modelo no incorpora de manera explícita la acumulación térmica (grados-día), lo cual podría mejorar la representación del

desarrollo biológico del vector. La integración de esta variable representa una línea de investigación futura con potencial para aumentar la precisión del índice.

Hacia un sistema de vigilancia territorial

Más allá de sus limitaciones, el IRB-GORRIÓN representa un avance significativo en la construcción de sistemas de vigilancia territorial basados en datos. Su enfoque integrador permite articular información climática, biológica y social en un marco operativo que facilita la toma de decisiones. En el contexto de la región de los volcanes, este modelo contribuye a fortalecer la resiliencia de los sistemas agropecuarios, al proporcionar herramientas para anticipar y gestionar riesgos. Asimismo, su carácter replicable abre la posibilidad de adaptarlo a otras regiones y a otros problemas zoonosarios.

Los resultados del estudio confirman la hipótesis de que la integración de datos agroclimáticos con variables sociotécnicas permite mejorar la capacidad de anticipación del riesgo de infestación por gusano barrenador. Este enfoque se alinea con tendencias recientes en epidemiología, que enfatizan la importancia de modelos integrados y sistemas de alerta temprana. Sin embargo, también se pone de manifiesto la necesidad de avanzar hacia modelos más complejos que incorporen variables adicionales y técnicas de aprendizaje automático.

La disponibilidad de datos históricos y la validación con casos reales serán fundamentales para consolidar el modelo y aumentar su confiabilidad. En este sentido, el IRB-GORRIÓN puede entenderse como una primera aproximación a un sistema más amplio de inteligencia territorial,

en el cual la información se utiliza no solo para describir el presente, sino para anticipar el futuro y orientar la acción colectiva.

Hacia un modelo emergente eco-epidemiológicos aplicado a sistemas agropecuarios

La discusión obtenida permiten situar el IRB-GORRIÓN dentro del campo emergente de los modelos eco-epidemiológicos aplicados a sistemas agropecuarios, particularmente aquellos orientados a la vigilancia temprana basada en datos ambientales. En concordancia con lo planteado por Morin et al. (2013), la relación entre variables climáticas y dinámicas epidemiológicas no es lineal ni determinista, sino que depende de la interacción de múltiples factores en distintas escalas temporales. En este estudio, dicha complejidad se expresa en la identificación de ventanas críticas de riesgo asociadas a la convergencia de temperatura, humedad y precipitación.

Este hallazgo adquiere mayor relevancia en el contexto del cambio climático, donde se ha documentado un incremento en la variabilidad y la intensidad de los factores que condicionan la transmisión de enfermedades. Estudios recientes han señalado que las alteraciones climáticas no solo modifican la distribución de vectores, sino que también incrementan la probabilidad de interacciones biológicas que favorecen la emergencia de eventos epidemiológicos (Carlson et al., 2022; Rocklöv & Dubrow, 2020). En este sentido, el IRB-GORRIÓN se inscribe dentro de una nueva generación de herramientas que buscan anticipar estos procesos mediante el uso de datos en tiempo real.

A diferencia de enfoques tradicionales basados en promedios mensuales, los resultados confirman

que el uso de datos con alta resolución temporal permite capturar variaciones de corto plazo que resultan decisivas en la configuración del riesgo. Este comportamiento es consistente con la teoría de sistemas complejos, donde pequeñas fluctuaciones pueden generar cambios abruptos al superar ciertos umbrales críticos (Scheffer et al., 2001). Así, el modelo no solo reproduce patrones descritos en la literatura, sino que los operacionaliza en un sistema de monitoreo continuo con implicaciones prácticas para la vigilancia zoonosológica.

En relación con la biología de *Cochliomyia hominivorax*, los resultados coinciden con estudios clásicos que destacan el papel central de la temperatura y la humedad en el desarrollo del vector (Hall & Wall, 1995). Sin embargo, el presente estudio amplía esta perspectiva al evidenciar el papel de la precipitación como un factor detonador en escalas temporales cortas, así como al integrar variables sociotécnicas que tradicionalmente han sido excluidas de los modelos epidemiológicos. Este enfoque es coherente con investigaciones recientes que subrayan la necesidad de incorporar múltiples dimensiones —ambientales, biológicas y sociales— en el análisis de riesgos sanitarios (Mordecai et al., 2020).

Uno de los aportes más relevantes del estudio radica precisamente en esta integración sociotécnica. Desde la teoría del actor-red (Latour, 2005), el riesgo no puede entenderse como una propiedad inherente al sistema natural, sino como el resultado de un ensamblaje dinámico entre actores humanos, no humanos y dispositivos tecnológicos. En este marco, el IRB-GORRIÓN se configura como una arquitectura emergente de vigilancia eco-epidemiológica, donde la producción de conocimiento depende de la interacción entre

datos climáticos, prácticas de manejo ganadero y plataformas digitales.

No obstante, esta integración también introduce tensiones metodológicas. La dependencia de datos generados por actores locales, particularmente en variables como la presencia de heridas, plantea desafíos en términos de consistencia, estandarización y confiabilidad. Este problema ha sido ampliamente documentado en estudios de epidemiología veterinaria y vigilancia participativa, donde la calidad de los datos está mediada por factores sociales y organizativos (Stevenson, 2008).

Por otra parte, es importante enfatizar que el modelo desarrollado no debe interpretarse como un sistema predictivo determinista. En línea con enfoques contemporáneos en epidemiología y modelación climática, el IRB-GORRIÓN se posiciona como un modelo predictivo en fase exploratoria con validación preliminar, orientado a la estimación probabilística de condiciones favorables más que a la predicción directa de eventos de infestación. Esta distinción resulta fundamental para evitar interpretaciones reduccionistas y para reconocer la naturaleza inherentemente incierta de los sistemas socioecológicos.

Entre las principales limitaciones del estudio destaca la ausencia de datos sistemáticos sobre infestaciones confirmadas, lo cual restringe la posibilidad de aplicar metodologías de validación más robustas. Asimismo, la escala espacial limitada y la falta de variables directas sobre la densidad poblacional del vector representan áreas críticas de mejora. Estas limitaciones, sin embargo, no invalidan el modelo, sino que lo posicionan como un sistema en construcción que requiere ser

calibrado, ampliado y validado progresivamente.

En este sentido, se identifican varias líneas de investigación futura: (i) la ampliación de la base de datos mediante registros epidemiológicos sistemáticos, (ii) la incorporación de variables biológicas adicionales como grados-día y densidad del vector, y (iii) la calibración del modelo mediante técnicas de aprendizaje automático y análisis multivariado. Estas estrategias permitirán transitar de un modelo heurístico a un modelo empíricamente robusto, fortaleciendo su capacidad predictiva y su aplicabilidad en distintos contextos territoriales.

Finalmente, el IRB-GORRIÓN no debe entenderse como un modelo cerrado, sino como una plataforma en evolución que articula conocimiento científico, datos abiertos y participación comunitaria. Su principal contribución no radica únicamente en la predicción del riesgo, sino en la construcción de una infraestructura de vigilancia que permite anticipar, interpretar y gestionar fenómenos zoonosarios en contextos de alta complejidad.

CONCLUSIONES

La presente investigación demuestra que es posible avanzar hacia un modelo de vigilancia eco-epidemiológica territorial del gusano barrenador basado en la integración de datos agroclimáticos, variables biológicas y participación comunitaria. A través del desarrollo e implementación del Índice de Riesgo Barrenador GORRIÓN (IRB-GORRIÓN), se logró construir un instrumento operativo capaz de identificar condiciones ambientales favorables para la infestación por *Cochliomyiasis*, contribuyendo a la transición de

un enfoque reactivo hacia uno preventivo en la gestión zoonosaria.

Uno de los principales hallazgos es que el riesgo de infestación no se configura de manera lineal ni constante, sino a partir de la interacción dinámica de variables climáticas en ventanas temporales cortas. La evidencia obtenida a partir de series temporales diarias revela que los promedios mensuales tienden a ocultar picos críticos de riesgo, mientras que los análisis de alta resolución permiten identificar fases de transición, como el estado de “pre-brote”, caracterizado por la acumulación de condiciones favorables que preceden a eventos de infestación. Este resultado tiene implicaciones metodológicas relevantes, al subrayar la importancia de trabajar con datos en tiempo real y con modelos sensibles a la variabilidad temporal.

Asimismo, el estudio confirma que el clima, si bien es un factor determinante, no explica por sí solo la ocurrencia de infestaciones. La inclusión de la variable sociotécnica asociada a la presencia de heridas en el ganado pone de manifiesto que el riesgo es el resultado de una interacción entre condiciones ambientales y prácticas de manejo. En este sentido, el IRB-GORRIÓN no debe interpretarse como un predictor absoluto, sino como un indicador de presión ambiental que, en combinación con otros factores, puede detonar eventos críticos. Esta distinción es fundamental para evitar interpretaciones deterministas y para orientar adecuadamente la toma de decisiones.

Desde una perspectiva aplicada, el modelo desarrollado ofrece una herramienta concreta para la gestión del riesgo en sistemas ganaderos de pequeña escala. La capacidad de generar alertas en tiempo real permite a los productores anticipar

acciones preventivas, como la revisión sistemática del ganado y el tratamiento oportuno de heridas, reduciendo así la probabilidad de infestación y sus impactos económicos. Además, el uso de plataformas digitales para la difusión de alertas fortalece la comunicación y la coordinación entre actores, ampliando el alcance del sistema de vigilancia.

No obstante, el estudio también identifica limitaciones importantes que deben ser abordadas en futuras investigaciones. Entre ellas, destaca la ausencia de datos directos sobre la densidad poblacional del vector, así como la dependencia de información comunitaria para ciertas variables clave. Asimismo, la falta de validación sistemática con casos reales de infestación limita la capacidad de evaluar el desempeño del modelo de manera cuantitativa. Estas limitaciones no invalidan los resultados, pero sí subrayan la necesidad de continuar desarrollando el sistema mediante la incorporación de nuevas fuentes de datos y la mejora de los mecanismos de validación.

En términos teóricos, el IRB-GORRIÓN representa un aporte a la comprensión de los sistemas socioecológicos, al integrar dimensiones ambientales, biológicas y sociales en un marco analítico común. Su enfoque sociotécnico permite reconocer que la producción de conocimiento y la gestión del riesgo son procesos colectivos que involucran múltiples actores y escalas. En este sentido, el modelo no solo genera información, sino que también contribuye a la construcción de capacidades locales y a la articulación de redes de colaboración.

Finalmente, el estudio plantea la necesidad de avanzar hacia sistemas integrales de inteligencia

territorial que permitan abordar de manera simultánea diversos riesgos agroecológicos. La experiencia del IRB-GORRIÓN sugiere que es posible construir plataformas de monitoreo que integren distintos indicadores y que funcionen como herramientas para la toma de decisiones en contextos de alta incertidumbre. En un escenario marcado por el cambio climático y la creciente vulnerabilidad de los sistemas alimentarios, este tipo de enfoques resulta fundamental para fortalecer la resiliencia de las comunidades rurales y garantizar la sostenibilidad de la producción agropecuaria.

BIBLIOGRAFÍA

Becerra, E. G. F., Cortés, J. A., & Villamil, L. C. (2007). Ecología y epidemiología del gusano barrenador del ganado, *Cochliomyia hominivorax* (Coquerel, 1858). *Revista de Medicina Veterinaria*, (14), 37-49.

Carlson, C. J., Albery, G. F., Merow, C., Trisos, C. H., Zipfel, C. M., Eskew, E. A., Olival, K. J., Ross, N., & Bansal, S. (2022). Climate change increases cross-species viral transmission risk. *Nature*, 607(7919), 555–562. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04788-w>

Folke, C., Hahn, T., Olsson, P., & Norberg, J. (2005). Adaptive governance of social-ecological systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 30, 441–473.

García-Pereyra, J., De los Santos-Villalobos, S., González-Villarreal, S. E., García-Montelongo, M., Guzmán, M. D. J. B., & Chávez, A. N. L. (2025). El gusano barrenador del ganado

(Cochliomyia hominivorax): una revisión de su impacto en México y América Latina. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 29, ágs-221.

Hall, M. J. R., & Wall, R. (1995). Myiasis of humans and domestic animals. *Advances in Parasitology*, 35, 257–334.

Latour, B. (2005). *Reassembling the social: An introduction to actor-network-theory*. Oxford University Press.

Mordecai, E. A., Ryan, S. J., Caldwell, J. M., Shah, M. M., & LaBeaud, A. D. (2020). Climate change could shift disease burden. *Nature Climate Change*, 10(2), 113–122. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0666-4>

Morin, C. W., Comrie, A. C., & Ernst, K. (2013). Climate and dengue transmission: Evidence and implications. *Environmental Health Perspectives*, 121(11–12), 1264–1272. <https://doi.org/10.1289/ehp.1306556>

Pazos, R. F. (2024). El manejo del gusano barrenador del ganado en América Latina mediante la técnica del insecto estéril. *Organismo Internacional de Energía Atómica Boletín*, 65(2), 15.

Rocklöv, J., & Dubrow, R. (2020). Climate change: An enduring challenge for vector-borne disease prevention and control. *Nature Immunology*,

21(5), 479–483. <https://doi.org/10.1038/s41590-020-0648-y>

Rodríguez Diego, J. G., Olivares Orozco, J. L., Sánchez Castilleja, Y., & Arece García, J. (2016). El Gusano Barrenador del Ganado, *Cochliomyia hominivorax* (Diptera: Calliphoridae): un problema en la salud animal y humana. *Revista de Salud Animal*, 38(2), 120-130.

Salas, D. R., González, G. C., Almazán, C., Cortés, M. J. A. C., & Ponce, C. (2024). EL GUSANO BARRENADOR DEL GANADO.

Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J. A., Folke, C., & Walker, B. (2001). Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413(6856), 591–596. <https://doi.org/10.1038/35098000>

Stevenson, M. (2008). *An introduction to veterinary epidemiology*. University of Sydney.

Taylor, D. B., Moon, R. D., & Mark, D. R. (2016). Economic impact of stable flies (*Stomoxys calcitrans*) on dairy and beef cattle production. *Journal of Medical Entomology*, 53(1), 1–7. <https://doi.org/10.1093/jme/tjv176>

Weather Underground. (n.d.). *Datos meteorológicos de estación personal IOZUMB2* [Base de datos en línea]. Recuperado el 12 de abril de 2026, de <https://www.wunderground.com/dashboard/pws/IOZUMB2>