



CIENCIAS AGRARIAS Y DE LA PESCA

Artículo original de investigación

Virus influenza aviar. Alerta temprana de riesgos en la interfaz fauna silvestre, ganadería, humanos

Pastor Alfonso Zamora^{† 1,2} <https://orcid.org/0000-0003-3535-010X>

Lourdes Mugica Valdez^{3,4} <https://orcid.org/0000-0001-9667-7769>

Beatriz Delgado Hernández^{1,5} <https://orcid.org/0000-0002-5360-1921>

Damarys de las Nieves Montano Valle¹ <https://orcid.org/0000-0001-7238-948X>

Alejandro Rodríguez Ochoa^{3,6} <https://orcid.org/0000-0003-3889-5949>

Dunia Pineda Medina¹ <https://orcid.org/0000-0002-0227-2697>

Martin Acosta Cruz^{3,4} <https://orcid.org/0000-0002-5019-5315>

¹ Centro Nacional de Sanidad Agropecuaria. Mayabeque, Cuba

² Academia de Ciencias de Cuba. La Habana, Cuba

³ Facultad de Biología, Universidad de La Habana. La Habana, Cuba

⁴ Jardín Botánico Nacional, Universidad de La Habana. La Habana, Cuba

⁵ Faculté de Médecine Vétérinaire, Université de Montréal. Montréal, Canadá

⁶ Laboratorio de Ecología de Vida Silvestre, Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile. Santiago de Chile, Chile.

*Autor para la correspondencia: dnmv.09@gmail.com

RESUMEN

Editor

Lisset González Navarro
Academia de Ciencias de Cuba.
La Habana, Cuba

Traductor

Darwin A. Arduengo García
Academia de Ciencias de Cuba.
La Habana, Cuba

Introducción: Desde la perspectiva de Una Salud el contexto sanitario internacional señala una creciente necesidad de sistemas de vigilancia integrados y desarrollo de sistemas de alerta temprana de riesgos, para mitigarlos antes de su traducción en eventos. **Objetivo:** Identificar, desde la perspectiva de Una Salud, los principales riesgos asociados a los virus de la influenza aviar en Cuba en contribución al desarrollo de un sistema de alerta temprana.

Métodos: Se desarrollaron diversos estudios: Conocimientos, prácticas y actitudes de riesgos en cazadores cubanos; conectividad migratoria del Pato de la Florida; modelación de la transmisión del virus de la influenza aviar en la interfaz fauna silvestre, ganadería, humanos; simulación estocástica de propagación del virus de la influenza aviar en aves comerciales y demandas de vigilancia integrada del virus de la influenza aviar. **Resultados:** Los cazadores declararon incurrir en comportamientos de riesgos y al Pato de la Florida (*Spatula discors*) como la especie más frecuentemente cazada. La fecha de migración y la edad de los individuos influyeron significativamente en la composición de las plumas según investigación basada en isotopos estables de hidrógeno ($\delta^{2}H$) de donde se implica un origen más septentrional a medida que avanza la temporada migratoria. Los Consejos Populares con mayor riesgo de transmisión de especies domésticas a sus criadores fueron 15 (0,99 %) para anátidas; 45 (2,9 %) para otras aves domésticas y 39 (2,6 %) para cerdos. La simulación de propagación del virus de la influenza aviar en granjas comerciales reveló como factores más influyentes la falta de bioseguridad y restricción de movimiento, aunque se infirió posible contener la difusión si las acciones de control se iniciaran con menos de 3 días post-infección.

Conclusión: Se añade conocimiento a los peligros por virus de la influenza aviar en la interfaz fauna silvestre, ganadería, humanos que contribuyen al diseño e implementación de un sistema de alerta temprana de riesgos y vigilancia integrada de virus de la influenza aviar con potencial zoonótico.

Palabras clave: zoonosis; alerta temprana; peligro sanitario; reducción de riesgos; pandemia.

Avian influenza virus. Early warning risks at the wildlife-livestock-human interface in Cuba

ABSTRACT

Introduction: From the One Health perspective, the international health context points to a growing need for integrated surveillance systems and the development of early warning systems to mitigate risks before they translate into events. **Objective:** To identify, from the One Health perspective, the main risks associated with avian influenza viruses in Cuba as a contribution to the development of an early warning system. **Methods:** Several studies were developed: knowledge, practices and attitudes of risk in Cuban hunters; migratory connectivity of the Florida Duck; modeling of avian influenza virus's transmission at the wildlife-livestock-human interface; stochastic simulation of avian influenza viruses spread in poultry and integrated surveillance demands for avian influenza viruses. **Results:** Hunters reported engaging in risky behaviors and Blue-winged Teal (*Spatula discors*) as the most frequently hunted species. Migration date and age of individuals significantly influenced feather composition according to research based on stable hydrogen isotopes ($\delta^2\text{H}$) implying a more northern origin as the migratory season progresses. Consejos Populares with the highest spillover risk from domestic species to their caretaker were 15 (0.99%) for anatidae; 45 (2.9%) for other domestic birds and 39 (2.6%) for pigs. The simulation of avian influenza viruses spread in poultry farms revealed as the most influential factors the lack of both biosecurity and movement restriction, although it was inferred that it is possible to contain the spread if control actions are initiated less than three days post-infection. **Conclusion:** Added knowledge of avian influenza viruses hazards at the wildlife-livestock-human interface contributed to the design and implementation of an early warning system for risk and integrated surveillance of avian influenza viruses with zoonotic potential.

Keywords: zoonoses; early warning; health hazards; risk reduction; pandemic

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de alerta temprana eficaces ofrecen capacidad para generar y difundir información relevante sobre alerta para personas, comunidades y organizaciones amenazadas por un peligro, de forma que puedan prepararse y actuar oportunamente para reducir la posibilidad de daño o pérdida.⁽¹⁾ Tales sistemas constituyen indicadores clave del Marco estratégico de la Organización de las Naciones Unidas

para la Alimentación y la Agricultura (FAO) para 2022-2031, con el objetivo de fomentar resiliencia y sistemas agroalimentarios sostenibles.⁽²⁾ Las políticas de Cuba en esta dirección se implementan en consonancia con la Directiva 1/2022 para la gestión de la reducción del riesgo de desastre, entre los que se distinguen los de tipo sanitario.⁽³⁾

Desde la perspectiva de Una Salud la capacidad de los virus influenza A para transmitirse entre diferentes especies constituye una gran preocupación, asociada con eventos de reordenamientos del genoma viral, reforzada por 6 pandemias causadas por estos en los últimos 135 años.^(4,5) Desde finales de 2021 una situación panzootica explosiva sin pre-

cedentes ocasionada por el subtipo H5N1, clado 2.3.4.4b del virus de la influenza aviar altamente patógena (IAAP) afecta aves domésticas y silvestres, así como a algunos mamíferos terrestres y acuáticos, lo cual supone mayor peligro para la salud animal, la salud pública, la seguridad alimentaria y la biodiversidad.⁽⁶⁾ Tal situación renueva e incrementa la necesidad de mejor comprensión sobre la transmisión e impacto potencial de las infecciones con estos virus para mitigar los riesgos a ello asociados.

Un paso fundamental para mitigar peligros de enfermedades zoonóticas es una buena comprensión de los riesgos asociados. En este sentido los estudios sobre conocimientos prácticas y actitudes (CPA) relacionados con determinadas infecciones en las personas son esenciales para la prevención y el control exitosos de brotes e incluso de pandemias.⁽⁷⁾ Sin embargo, a pesar de que los cazadores de aves silvestres son posiblemente el estrato poblacional en contacto directo más estrecho y frecuente con los principales reservorios del virus de influenza aviar (VIA); los esfuerzos para definir los CPA en ellos han sido escasos a nivel mundial y principalmente limitados a Norteamérica, sin considerar la necesidad de estudios particulares por las posibles diferencias de comportamientos de riesgo entre países.

Es creciente la evidencia de que los virus de IAAP son endémicos en las aves silvestres acuáticas, lo cual agrega complejidad a la erradicación de la enfermedad y favorece el riesgo de ocurrencia en países conectados por rutas de aves migratorias.⁽⁸⁾ Cuba no solo es una importante zona de invernada para aves migratorias provenientes de Norteamérica, sino también un área de escala muy importante para aves que se desplazan a otras islas del Caribe o migran más al sur.⁽⁹⁾

Los estudios de conectividad migratoria pueden mejorar la predicción de los riesgos de circulación e introducción del VIA y facilitan la optimización de los sistemas de vigilancia y alerta rápida a escala regional.^(10,11) De hecho, basado en esta información, existen aplicaciones que mejoran la capacidad de decisión de los gestores de sanidad animal para prepararse y responder con antelación a potenciales epidemias de IAAP.⁽¹²⁾

Las poblaciones de aves domésticas en Cuba son notables y con genética propia lo cual le confiere importancia para la seguridad y soberanía alimentarias.⁽¹³⁾ Por similar razón puede ser considerable el impacto de la IAAP, que puede agravarse por la existencia de condiciones para su ocurrencia.⁽¹⁴⁾ La posibilidad no es solo teórica, como evidencia hubo un reciente evento de infección por virus IAAP H5N1 en aves de zoológico.⁽¹⁵⁾

Paradójicamente, a nivel internacional, suelen destinarse más recursos a la respuesta frente a emergencias, respecto a la prevención, aun cuando está demostrado que la inversión en reducción de riesgo o prevención es más costeable.⁽¹⁶⁾ En este

panorama puede influir la escasez de estudios sobre pronóstico de las consecuencias de brotes epidémicos en magnitud de pérdidas, que limiten la concientización sobre la importancia de la reducción de riesgo, e incluso la toma de decisiones sobre prioridades, cuando diversos peligros suelen "competir" por los recursos disponibles y en ocasiones limitados.

Si bien la vigilancia sanitaria, tanto en animales como en humanos, tradicionalmente se ha enfocado en la detección de eventos, es creciente la necesidad de un cambio de paradigma hacia la detección de riesgos, de forma que sustente el desarrollo de sistemas de alerta temprana.⁽¹⁷⁾ Cuba tiene implementado a nivel nacional un sistema de vigilancia de eventos de infección por VIA que, incluso ha sido optimizado.⁽¹⁴⁾ Sin embargo, el conocimiento sobre las posibilidades de traslocación del VIA en la interfaz fauna silvestre, ganadería y humanos resultaba insuficiente para establecer medidas de mitigación anticipadas basadas en evidencias. Para llenar esos vacíos se planificaron diversos estudios con el objetivo de identificar, desde la perspectiva de Una Salud, los principales riesgos asociados al VIA en Cuba, como contribución al desarrollo de un sistema de alerta temprana.

MÉTODOS

Conocimientos, prácticas y actitudes de riesgo por cazadores cubanos

Se diseñó un cuestionario semiestructurado que se validó con especialistas locales con conocimientos sobre la caza ($n = 3$) y un pequeño grupo de cazadores de aves silvestres ($n = 5$). Se encuestaron 403 cazadores cubanos de aves silvestres a los cuales no se les proporcionó ninguna información sobre la influenza aviar antes de entregarles el cuestionario. Las respuestas a la encuesta se procesaron por estadística descriptiva.

Conectividad migratoria del Pato de la Florida (*Spatula discors*)

Se recolectaron plumas de ejemplares del Pato de la Florida (BWTE) durante la temporada de caza en Cuba y basado en las características del plumaje del ala se identificó su sexo y edad. Las plumas primarias (P10; $n = 276$) se analizaron para determinar isotopos estables de hidrógeno ($\delta^2\text{H}$) en el Laboratorio para la Ciencia de Isótopos Estables de la Universidad Occidental, Ontario, Canadá.

Las probabilidades de transición de cada área de reproducción a Cuba se estimaron a partir de los datos de recuperación de anillos procedentes del Laboratorio de Anillamiento de Aves de América del Norte (www.pwrc.usgs.gov/bbl) de acuerdo al modelo de Burnham.⁽¹⁸⁾ Las estimaciones incluyeron 3 áreas de reproducción en Norteamérica.

Para establecer el origen de BWTE se estableció la distribución isotopos estables de hidrógeno ($\delta^2\text{H}$) para Norteamérica a partir de los valores esperados para las plumas ($\delta^2\text{Hf}$), mediante el paquete bbsBayes con modelos bayesianos jerárquicos y se construyeron mapas del área de origen de los individuos muestreados según Campbell *et al.*^(19,20) Teniendo en cuenta la variación esperada se calibró un *isoscape* de precipitación media en la estación de crecimiento ($\delta^2\text{Hp}$) basado en la ecuación 1:⁽²¹⁾

$$\delta^2\text{H}_f = -21.9 + 1.36 * \delta^2\text{H}_p \quad (1)$$

Para deducir la dinámica anual de la prevalencia del VIA en BWTE se consideraron las áreas de muda y nacimiento, así como las posibles rutas migratorias. Como fuente se emplearon datos de libre acceso del Programa nacional de vigilancia de la influenza aviar en aves silvestres del Servicio de inspección de sanidad animal y vegetal (APHIS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) y del Instituto Nacional de Alergias y Enfermedades Infecciosas (NIAID) de los Institutos Nacionales de Salud (NIH) mediante modelos de prevalencia predictiva.⁽²²⁾

Modelación de la transmisión del virus de influenza aviar en la interfaz aves silvestres, ganadería, humanos

El análisis de los datos y el desarrollo de los modelos se llevaron a cabo mediante lenguaje de programación R en la versión 4.3.0. Para la gestión de las capas espaciales se utilizó

el sistema de información geográfica QGis versión 3.28.3 en la proyección WGS 84 17N. Los parámetros y resultados se normalizaron entre 0 y 1 mediante la ecuación 2:⁽²³⁾

$$Z = X / \sum(X) \quad (2)$$

donde Z es el valor normalizado de la variable X.

Mediante adición ponderada se definió la importancia de los factores de riesgos asociados con la ocurrencia y transmisión del VIA. Esta ponderación semicuantitativa se basó en un análisis detallado de revisión de literatura y criterio de expertos.⁽²⁴⁾ Se estimó el riesgo relativo de transmisión de los VIA en la interfaz humano-animal-ambiente para aves y cerdos domésticos, mediante el desarrollo de sendos modelos de transmisión que consideraron las aves migratorias silvestres, como la fuente más probable de introducción del virus en Cuba (figura 1).

Se modificó y reescaló a nivel de Consejo Popular la ecuación de riesgo desarrollada por Hill *et al.* y se parametrizó el modelo para la transmisión del VIA a partir de aves silvestres acuáticas, como su principal reservorio, a aves domésticas o cerdos y de estos a humanos.⁽²⁵⁾ Se utilizó la función de distribución acumulativa empírica (ECDF, siglas del inglés) para cada parámetro en función de sus percentiles.

Simulación estocástica de la difusión de influenza aviar altamente patógena en aves comerciales

El estudio abarcó todo el país y la información se procesó en el formato de entrada de datos del modelo norteamericano de difusión de enfermedades infecciosas (NAADSM

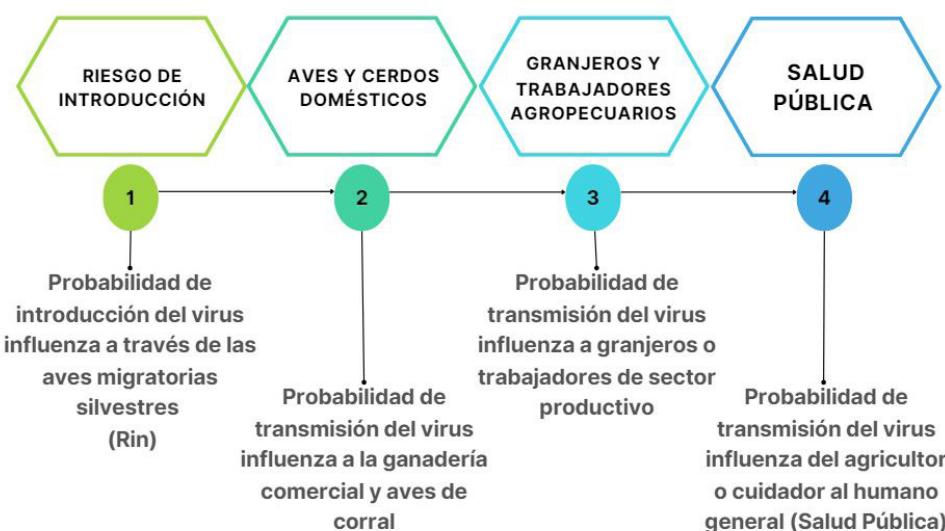


Fig. 1. Vías de transmisión del virus influenza para los modelos de estimación del riesgo en aves domésticas y cerdos domésticos

v.3.3.2).⁽²⁶⁾ Se definieron 3 niveles diferentes de bioseguridad (95, 50 y 10) % para evaluar la probabilidad de transmisión de la enfermedad. Las restricciones de movimiento se clasificaron en mayor y menor eficacia de la restricción, y se describió a través de una función lineal (x, y).

RESULTADOS

Conocimiento, prácticas y actitudes de riesgo por cazadores cubanos

De las 403 encuestas aplicadas a los cazadores 398 (98,76 %) fueron válidas; de las cuales 305 (76,63 %) fueron respondidas en su totalidad. Solo 1 de los encuestados fue del género femenino. El procesamiento de las encuestas arrojó que capturan 1,53 aves/día de caza durante 6 meses. De los 215 cazadores que afirmaron apresar patos 82 (38,14 %) señalaron al Pato de la Florida (*Spatula discors*) como la especie más capturada.

Los grupos de cazadores clasificados de acuerdo a la mediana de la edad resultaron jóvenes con menos de 50 años y viejos al rebasar esta edad. En cuanto a la experiencia en la actividad cinegética el punto de corte clasificadorio fue 17 años (novatos vs experimentados).

El análisis de proporciones de los factores de riesgo identificó 6 grupos como las variables más frecuentes a saber, las prácticas higiénicas personales (86 %; IC 95 %:81 %-88 %) y

de los utensilios de caza (85 %; IC 95 %:82 %-89 %), el contacto directo con el agua durante la caza (77 %; IC 95 %:73 %-81 %), conocer sobre influenza aviar (75%, IC 95 %:71-79%) y faenar aves silvestres en casa (74 %; IC 95 %:70 %-79 %). A su vez, alimentar a los animales domésticos con los restos de las aves capturadas (38 %; IC 95 %:33 %-43 %) y utilizar los utensilios de caza en labores domésticas (46 %; IC 95 %:40,5 %-50,6 %) se practicaron en menor proporción. El estudio sobre CPA reveló comportamientos en los cazadores cubanos de aves silvestres que se muestran en la figura 2.⁽²⁷⁾

Conectividad migratoria del Pato de la Florida (*Spatula discors*)

Durante la temporada de invierno se detectaron los valores más altos de δ2Hf (media: -111,9 %; CL: -115,5 % a -108,3 %), con una fuerte evidencia de diferencias con la temporada migratoria (media: -129,5 %; CL: -135,4 % a -123,9 %) (prueba de Mann Whitney, U = 6425; p < 0,001). En la temporada de migración todas las clases de sexo y edad exhibieron una mayor variación en los valores.

Basado en la probabilidad de transición estimada para Cuba las áreas de origen probable para BWTE, según los datos de recuperación de anillos, se limitaron a -950 longitud oeste. Los individuos muestreados durante la temporada migratoria en el oeste de Cuba mostraron como áreas más probables de muda o nacimiento las praderas y bosques de coníferas de

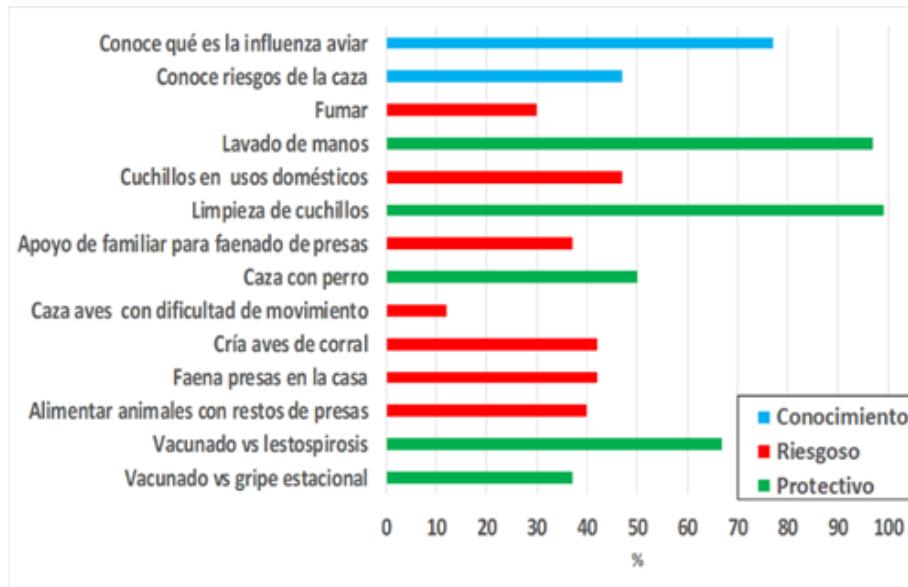


Fig. 2. Porcentajes de percepción de riesgo, medidas preventivas y actitudes de riesgo para la infección con virus de influenza aviar por cazadores cubanos de aves silvestres

los Estados Unidos y las praderas de Canadá (figura 3A). Por el contrario, los individuos muestreados durante la temporada de invierno en el centro de Cuba tuvieron sus orígenes más probables en áreas de pradera principalmente de los Estados Unidos (figura 3B).

El número de leyenda corresponde al número de individuos asignados a cada píxel con base en una razón de probabilidades de 2:1. Las ubicaciones de captura se indican con puntos rojos. El polígono delinea el área de reproducción de BWTE. ⁽²⁸⁾ La zona de muda o nacimiento más probable de los individuos muestreados durante la migración en el oeste de Cuba fue extensa y se localizó más al norte que los muestreados en la región central de Cuba durante el invierno. La importante variación isotópica observada en las muestras de la temporada migratoria, junto con una fuerte evidencia de diferencias con las muestras de la temporada de invernada, sugiere una amplia gama de posibles orígenes para los individuos de BWTE que utilizan Cuba como sitio de invernada o de escala en ruta hacia el resto del Caribe, América Central y América del Sur. Sin embargo, durante la temporada migratoria, el área probable de origen de las muestras correspondió a humedales en los bosques y praderas del centro-oeste de los Estados Unidos y el sur de Canadá, mientras durante la temporada de invierno, se limita principalmente a las regiones de pradera dentro de los Estados Unidos.

En el segmento estadounidense de la ruta migratoria del Misisipi se observó un aumento gradual en la proporción de positivos en agosto (semanas 31 a 35, proporción positiva media 0,02 a 0,09). Esta región mantuvo valores relativamente elevados hasta marzo durante la migración de primavera, y alcanzó su pico en diciembre (semana 50, proporción positiva media: 0,1; rango: 0,04-0,23). Se observa una ten-

dencia similar en la ruta migratoria central, aunque con proporciones positivas promedio aún más altas y un máximo en septiembre (semanas 31 a 35, proporción positiva media: 0,03 a 0,1). Estos valores elevados persistieron hasta aproximadamente mediados de marzo.

Modelación de la transmisión del virus de influenza aviar en la interfaz aves silvestres, ganadería, humanos

Los Consejos Populares con mayor riesgo de transmisión a partir las especies relevantes estudiadas a sus criadores (figura 4) fueron 15 (0,99 %) para las anátidas comerciales; 45 (2,9 %) para las aves domésticas y 39 (2,6 %) para los cerdos domésticos.

Simulación estocástica de la difusión de IAAP en aves comerciales

La interacción entre la bioseguridad y la restricción de movimientos o la bioseguridad y velocidad en la difusión del VIA fue significativa para un nivel de confianza del 99 %. Los escenarios con baja bioseguridad tuvieron un 57 % del total de casos positivos. En los escenarios de alto riesgo, hubo mayor propagación del VIA en unidades adyacentes, hecho que las ubica como regiones prioritarias para la reducción de riesgos. El peor escenario tuvo una proporción de 4,41 veces más animales infectados que el mejor escenario. Entre el escenario más probable y el peor, las diferencias son de unos 100 000 animales infectados. Sin embargo, en el peor escenario había tantos animales infectados que algunas unidades persistían en estado latente. Sin embargo, se estimó posible contener la propagación de la IAAP en el mejor escenario si la detección dentro de los 3 días postinfección y la primera la

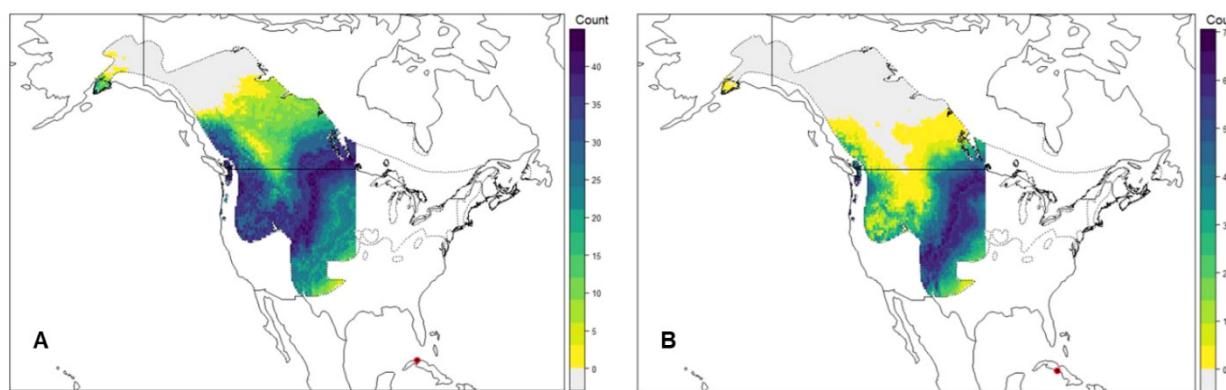


Fig. 3. Representación del probable origen del Pato de La Florida (BWTE) capturada en el oeste de Cuba durante la temporada de migración de 2021 (A) y el centro de Cuba durante la temporada de invierno 2020-2021

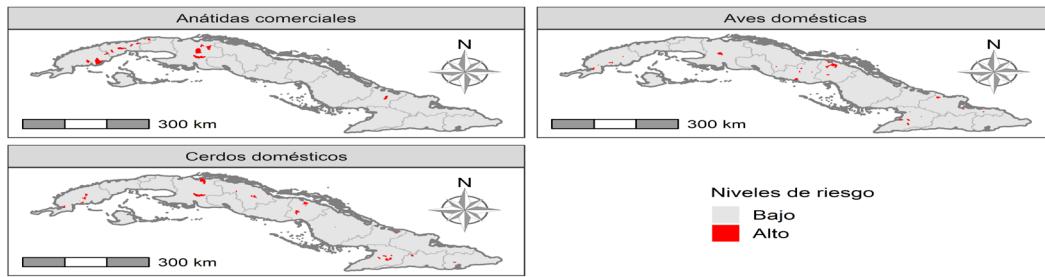


Fig. 4. Riesgo de transmisión del virus de influenza aviaria desde especies domésticas epidemiológicamente relevantes al criador

despoblación dentro de los 6 días, aunque en el peor escenario el comportamiento pudiera ser epidémico (figura 5).

DISCUSIÓN

La cantidad de personas involucradas en la cacería, ya sea recreativa o de subsistencia y el carácter directo y estrecho de su contacto con reservorios de VIA, ubica a los cazadores como el estrato poblacional con mayor riesgo de exposición a estos virus.⁽²⁷⁾ Tales riesgos pueden alcanzar importancia, incluso global, de combinarse el salto de la barrera de especie con adaptaciones del virus para transmitirse de

forma sostenida en una nueva especie, incluida la humana.⁽⁴⁾ Por consiguiente, los estudios locales en este sentido pueden tener contribución global.

La caracterización y esclarecimiento, por primera vez, de la importancia de factores de riesgo para la traslocación de patógenos en la interfaz humano-animal, relacionados con CAP de los cazadores cubanos, es de alto valor para perfeccionar estrategias de mitigación de los riesgos asociados a la exposición al VIA. La identificación del Pato de la Florida (*Spatula discors*) como la especie más frecuentemente cazada, que a su vez se reporta entre las de mayor prevalencia

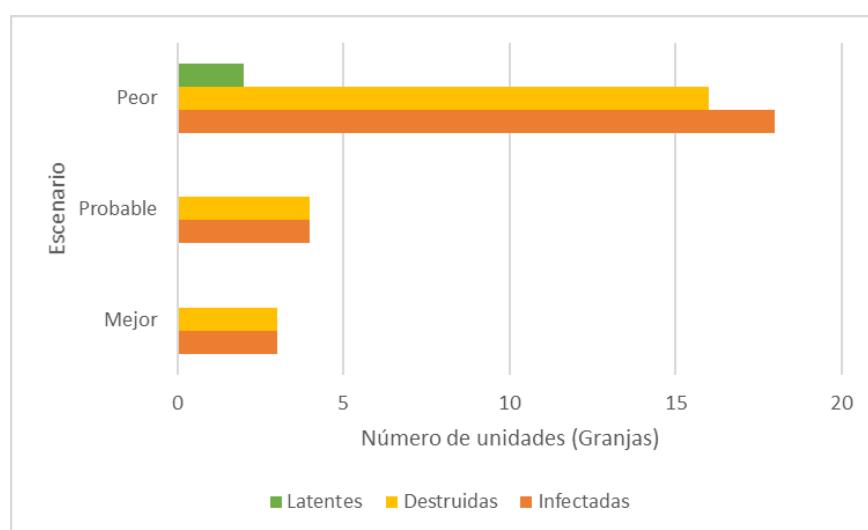


Fig. 5. Número esperado de unidades afectadas en diferentes escenarios debido a la incursión aleatoria del virus de influenza aviaria de alta patogenicidad

de infección por VIA a nivel mundial, unido al hecho de ser la especie migratoria invernal más común en Cuba, dentro de la familia Anatidae, que visita el país entre agosto y abril cada año también es relevante para estrategias de alerta temprana y reducción de riesgos.^(27,29) Se demostró la necesidad de desarrollar programas de divulgación técnica para la efectiva comunicación de los riesgos en la interfaz humano-animal-ambiente con enfoque de Una Salud.

Hasta la realización de este estudio se desconocía la estratificación de los riesgos con potencial epidémico en la interfaz humano-animal-ecosistema relacionados con la cinegética en Cuba.⁽²⁷⁾ La demanda de tal conocimiento se acrecienta porque predomina la caza de aves silvestres que constituyen el principal reservorio de virus influenza A, con capacidad demostrada para causar pandemias y panzootias.

El estudio de conectividad de BWTE identificó un patrón fenológico relacionado con la edad en la migración respecto a los orígenes de estos individuos.⁽³⁰⁾ El análisis de anillamiento, utilizado por primera vez para esta especie, permitió generar información sobre todo el rango de distribución de esta especie. En la región neotropical, los esfuerzos de vigilancia siguen siendo escasos, especialmente cuando se comparan con el monitoreo espaciotemporal y específico de la especie realizado en Norteamérica.⁽²⁹⁾ No obstante, la identificación de áreas prioritarias para monitorear la evolución o la incursión viral puede ayudar a capitalizar los recursos para la alerta temprana.

Las áreas de origen más probable, deducidas para BWTE, se alinearon con las regiones caracterizadas por la mayor densidad de parejas reproductoras de la especie, que abarcan desde el noreste de Iowa y las Dakotas hasta el sur de Manitoba, Saskatchewan y Alberta.⁽³¹⁾ En esta área de reproducción central, BWTE es una de las especies de pato más abundantes, mientras en las partes restantes de su rango de distribución las parejas se encuentran en densidades más bajas y en patrones irregulares.

El estudio de conectividad permite modular alertas de zonas nacionales con mayor riesgo de ocurrencia de infección por VIA, antes del arribo a Cuba de la especie migratoria más relevante para la introducción del agente, el Pato de la Florida (*Spatula discors*). Tales inferencias, mediante el empleo de valores isotópicos de hidrógeno ($\delta^{2}H$) de las plumas de vuelo, combinados con análisis de captura y recuperación de anillos, han sido escasas en la región neotropical y se aplicaron por primera ocasión para el Pato de la Florida. Se encontró evidencia convincente que indica que la fecha de migración y la edad de los individuos influyeron significativamente en la composición isotópica de las plumas con base en $\delta^{2}H_{\text{f}}$, expresada en que los individuos tienden a exhibir un origen más septentrional a medida que avanza la temporada migratoria.

La relativa estabilidad de los patrones de conectividad asegura la perdurabilidad de las alertas y sustenta planificación de reducción de riesgos a corto y mediano plazo. Por otra parte, la existencia de fuentes abiertas de datos sobre la detección del VIA en aves silvestres en Norteamérica permite ajustes necesarios a partir del monitoreo regular de esas fuentes. Los hallazgos también subrayaron la importancia crítica de la fase inicial de la migración otoñal para Cuba y sugieren enfocar los mayores esfuerzos de reducción de riesgos y vigilancia durante ese periodo. Asimismo, validan la noción de que los individuos utilizan predominantemente la ruta migratoria más cercana a sus zonas de reproducción. Específicamente para la población reproductora de las praderas, las rutas migratorias primarias se alinean con las rutas migratorias central y del Misisipi.

Para BWTE estar entre las primeras especies de patos en iniciar la migración, puede resultar en menor exposición a patógenos y, en consecuencia, muchos individuos llegan a regiones no reproductivas sin experiencia inmunológica previa.⁽³⁰⁾ Este fenómeno explicaría la prevalencia relativamente alta del VIA en esta especie durante la temporada de invierno en regiones como la Costa del Golfo y el Neotrópico.⁽³¹⁾ Todos estos hallazgos subrayan la importancia crítica de la fase inicial de la migración de otoño para Cuba. Durante esta fase los individuos tienden a ocupar áreas de muda al sur, lo que aumenta la probabilidad de carecer de experiencia inmunológica previa y, en consecuencia, aumenta la posibilidad de adquirir el virus durante el proceso de migración.

La modelación de la transmisión del VIA en la interfaz aves silvestres, ganadería, humanos representó un marco conceptual para la introducción y transmisión del VIA en Cuba, con flexibilidad para incorporar información en dependencia de reportes más específicos sobre las cepas emergentes, como puede ser la reciente adaptación y transmisión en vacas lecheras del clado 2.3.4.4b del subtipo H5N1 del VIA, sin perder capacidad para infectar otros hospederos, incluidos humanos.^(32,33) Esto estaría en consonancia con los preceptos de la alerta temprana y posibilitaría establecer medidas de reducción de riesgos, localmente definidas y de forma anticipada a la potencial exposición de especies susceptibles. Además, la modelación de la transmisión, incluyó al cerdo, especie de consideración por su potencial para facilitar reordenamiento entre virus influenza A y generar nuevos virus influenza con implicaciones para la salud pública.⁽³³⁾

La estratificación de las áreas de riesgo, en correspondencia con la menor estructura administrativa del país, proporciona mejores oportunidades a los decisores para la gestión de riesgos sanitarios mediante la asignación prioritaria de recur-

sos para la prevención y la alerta temprana basados en evidencias. Desde la perspectiva de Una Salud este estudio añade conocimiento a los escasos modelos existentes a nivel mundial.

El estudio de simulación proporcionó una primera aproximación de los escenarios potenciales de transmisión de IAAP en Cuba y la influencia de diversas estrategias de control en la contención efectiva de brotes. Las áreas con estrecha contingüidad de granjas evidenciaron que deben ser priorizadas en la asignación de recursos para la bioseguridad y la alerta temprana de la introducción del virus. Esto está en concordancia con estudios de brotes de pequeña y gran escala. ⁽³⁴⁾

A favor de concientizar a productores y otras partes interesadas está el efecto estimado en la contención de la difusión cuando la velocidad de detección fue inferior a 3 días. Esta predicción también está en concordancia con la efectividad de la detección temprana y sacrificio oportuno. ⁽³⁵⁾ Dado que la detección del patógeno depende de la capacidad y reacción humana ante la manifestación de signos clínicos, ilustró la necesidad de estrategias de concientización de los criadores que favorezcan la notificación voluntaria de sospechas y, en consecuencia, la adopción oportuna de medidas de control y reducción de riesgos. No obstante, son diversos los factores que afectan la notificación voluntaria. ⁽¹¹⁾

Disponer de conocimientos sobre el impacto que suponen las enfermedades es un requisito previo esencial para fijar objetivos y aumentar las inversiones en intervenciones destinadas a alcanzarlos. ⁽³⁶⁾ Por otra parte, la identificación y estratificación de riesgos gana valor cuando se trata de enfermedades transfronterizas de alto impacto como es el caso de la infección por VIA. ⁽¹¹⁾ En particular el potencial zoonótico y pandémico de los virus influenza en animales demanda prioridad y estrategias de vigilancia integrada con enfoque Una Salud, en lo cual se lograron avances mediante el empleo de métodos participativos. ^(5,2) En el caso estudiado se aportó conocimiento para un cambio de paradigma consistente en detectar y comunicar riesgos con predominio sobre la detección de eventos.

El estudio de patrones espaciotemporales de ensambles de aves acuáticas proporcionó evidencia cuantitativa de que la costa sur de Cuba, en su conjunto, es de importancia global para la conservación de especies de aves acuáticas migratorias, algunas de las cuales están en declive. ⁽²⁹⁾ Las dimensiones espaciales y temporales en que se realizó este estudio están en consonancia con la necesidad de enfoques a gran escala, largo plazo y de múltiples especies en este tipo de investigaciones. En este sentido aportó conocimiento para el monitoreo de poblaciones reconocidas como indicadores de calidad de hábitat y, por consiguiente, también tributa a la alerta temprana de degradación de ecosis-

temas con alta relevancia desde la perspectiva de Una Salud, la cual reconoce que la salud de los seres humanos, los animales domésticos y salvajes, las plantas y el ambiente en general (incluidos los ecosistemas) están estrechamente vinculados y son interdependientes. ^(37,1)

En más de un estudio se emplearon datos de diferentes fuentes que difieren en escalas espaciales y temporales, pero se pudo llegar a predicciones precisas. Esto fue posible por el continuo desarrollo de métodos innovadores de análisis con capacidad para identificar patrones en grandes conjuntos de datos, al tiempo que ubica los estudios en el contexto de la inteligencia epidémica. ⁽³⁸⁾ Esta integración contribuye al desarrollo de sistemas de alerta temprana que facilitan los esfuerzos de prevención y control de enfermedades.

De particular importancia pueden considerarse los estudios asociados a saltos de la barrera de especies como los que se favorecen por interacciones en las interfaces estudiadas. Además, del impacto directo si un patógeno se adapta a un nuevo hospedero, pueden transmitirse entre diferentes hospederos, al tiempo que pueden conformarse nuevos nichos ecológicos que aumenten el riesgo de persistencia del patógeno y nuevas exposiciones tanto para humanos como otros animales. ⁽³⁹⁾

Los estudios realizados, en su conjunto, identificaron y caracterizaron riesgos asociados al VIA en la interfaz fauna silvestre, ganadería, humanos con lo cual aportaron conocimientos relevantes para el desarrollo e implementación de un sistema de alerta temprana ante este peligro, la reducción de los riesgos asociados y el desarrollo de capacidades de resiliencia desde la perspectiva de Una Salud.

Conclusiones

Se añade conocimiento a los peligros por virus de la influenza aviar en la interfaz fauna silvestre, ganadería, humanos que contribuyen al diseño e implementación de un sistema de alerta temprana de riesgos y vigilancia integrada de virus de la influenza aviar con potencial zoonótico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Global technical consultation on the strategic framework for early warning of animal health threats [Internet]. FAO. Rome, Italy: FAO; 2024. 72 p. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd0466en>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Strategic Framework 2022-2031 [Internet]. Rome, Italy; 2021. Disponible en: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/29404c26-c71d-4982-a899-77bdb2937eef/content>
- Consejo de Defensa Nacional. Directiva 1/2022 "Para la gestión de la reducción del riesgo de desastre en la República de Cuba" [Internet]. Cuba: Gaceta Oficial No. 130 Ordinaria de 2022; 2022

- p. 42. Disponible en: <https://www.gacetaoficial.gob.cu/sites/default/files/goc-2022-0130.pdf>
4. Arruda B, Vincent Baker AL, Buckley A, Anderson TK, Torchetti M, Bergeson NH, et al. Divergent Pathogenesis and Transmission of Highly Pathogenic Avian Influenza A(H5N1) in Swine. *Emerg Infect Dis.* 2024;30(4):738-51.
 5. Monto AS, Fukuda K. Lessons From Influenza Pandemics of the Last 100 Years. *Clin Infect Dis.* 17 de agosto de 2019;70(5):951-7.
 6. Swayne D. E, Sims L, Brown I, Harder T, Stegeman A, Abolnik C, Delgado M, Awada L, Pavade G TG. Strategic challenges in the global control of High Pathogenicity Avian Influenza [Internet]. Paris; 2023. (90 SG/8). Disponible en: <https://www.woah.org/app/uploads/2023/05/a-90sg-8.pdf>
 7. Stel M, Banach N. Preventing Zoonoses: Testing an Intervention to Change Attitudes and Behaviors toward More Protective Actions. *Int J Environ Res Public Health.* 27 de octubre de 2023;20(21):6987.
 8. Lycett SJ, Pohlmann A, Staubach C, Caliendo V, Woolhouse M, Beer M, et al. Genesis and spread of multiple reassortants during the 2016/2017 H5 avian influenza epidemic in Eurasia. *Proc Natl Acad Sci.* 25 de agosto de 2020;117(34):20814-25.
 9. S. Manica LT, Acosta M, Castro R, Hernández Z, González A, et al. Spatio-Temporal Patterns of Waterbird Assemblages in Cuba's South Coast Wetlands: Conservation Implications. *Wetlands.* 11 de abril de 2020;40(2):407-19.
 10. van Toor ML, Avril A, Wu G, Holan SH, Waldenström J. As the duck Flies-Estimating the dispersal of low-pathogenic avian influenza viruses by migrating mallards. *Front Ecol Evol.* 4 de diciembre de 2018;6(DEC).
 11. Meckawy R, Stuckler D, Mehta A, Al-Ahdal T, Doebling BN. Effectiveness of early warning systems in the detection of infectious diseases outbreaks: a systematic review. *BMC Public Health.* 29 de noviembre de 2022;22(1):2216.
 12. Iglesias I, Kanankege K, Valencia EJ, Liu CJ, Blanco CE, Lim S, et al. DiFLUision: A new spatiotemporal early warning system for HPAI. *Int J Infect Dis.* marzo de 2022;116:S101.
 13. Oficina Nacional de Estadística e Información (ONEI). Anuario Estadístico de Cuba 2022. Edición 2023.Capítulo 9. Agricultura, Ganadería, Silvicultura y Pesca. [Internet]. 2023. Disponible en: https://www.onei.gob.cu/sites/default/files/publicaciones/2024-04/09-agropecuario-2022_0.pdf
 14. Montano-Valle D d/I Nieves, Peredo MI, Rodríguez SV, Fonseca O, Centelles Y, Ley O, Abreu Y, Delgado B, Capdevila Y, Regis-Santoro K, Quesada T, Peláez M AP. Influenza aviar. Oportunidades de mejora del sistema de vigilancia activa basado en riesgo en Cuba. *Rev Salud Anim.* 2020;42(3).
 15. World Organisation for Animal Health. Notificación Evento 4895. 2023 [citado 3 sep 2024]. Cuba-Influenza de tipo A de alta patogenicidad (Inf. por los virus de la) (aves que no sean de corral, incluyendo las silvestres) (2017) - Informe de seguimiento 10 [FINAL]. Disponible en: <https://wahis.woah.org/#/in-review/4895?fromPage=event-dashboard-url>
 16. Parker GW. Best practices for after-action review: turning lessons observed into lessons learned for preparedness policy. *Rev Sci Tech l'OIE.* 1 de agosto de 2020;39(2):579-90.
 17. Alahmari AA, Almuzaini Y, Alamri F, Alenzi R, Khan AA. Strengthening global health security through health early warning systems: A literature review and case study. *J Infect Public Health.* abril de 2024;17:85-95.
 18. Cohen EB, Hostetler JA, Hallworth MT, Rushing CS, Sillett TS, Marra PP. Quantifying the strength of migratory connectivity. *Methods Ecol Evol.* 2018;9(3):513-24.
 19. Edwards BPM, Smith AC. bbsBayes: An R Package for Hierarchical Bayesian Analysis of North American Breeding Bird Survey Data. *J Open Res Softw.* 20 de julio de 2021;9(1):1-17.
 20. Campbell CJ, Fitzpatrick MC, Vander Zanden HB, Nelson DM. Advancing interpretation of stable isotope assignment maps: Comparing and summarizing origins of known-provenance migratory bats. *Anim Migr.* 2020;7(1):27-41.
 21. Rodríguez-Ochoa A, Kusack JW, Mugica L, Cruz MA, Alfonso P, Delgado-Hernández B, et al. Migratory connectivity of Blue-winged Teal: risk implications for avian influenza virus introduction to Cuba. *Front Bird Sci.* 2024;3:1382139.
 22. Kent CM, Ramey AM, Ackerman JT, Bahl J, Bevins SN, Bowman AS, et al. Spatiotemporal changes in influenza A virus prevalence among wild waterfowl inhabiting the continental United States throughout the annual cycle. *Sci Rep.* 29 de julio de 2022;12(1):1-10.
 23. Montano Valle D de las N, Berezowski J, Delgado-Hernández B, Hernández AQ, Percedo-Abreu MI, Alfonso P, et al. Modeling transmission of avian influenza viruses at the human-animal-environment interface in Cuba. *Front Vet Sci.* 2024;11:1426989.
 24. Hill SC, Lee YJJ, Song BMM, Kang HMM, Lee EKK, Hanna A, et al. Wild waterfowl migration and domestic duck density shape the epidemiology of highly pathogenic H5N8 influenza in the Republic of Korea. *Infect Genet Evol.* 1 de agosto de 2015;34:267-77.
 25. Humphreys JM, Ramey AM, Douglas DC, Mullinax JM, Soos C, Link P, et al. Waterfowl occurrence and residence time as indicators of H5 and H7 avian influenza in North American Poultry. *Sci Rep.* 13 de diciembre de 2020;10(1):2592.
 26. Stevenson MA, Sanson RL, Stern MW, O'Leary BD, Sujau M, Moles-Benfell N, et al. InterSpread Plus: A spatial and stochastic simulation model of disease in animal populations. *Prev Vet Med.* 2013;109(1-2):10-24.
 27. Delgado-Hernández B, Mugica L, Acosta M, Pérez F, Montano D de las N, Abreu Y, et al. Knowledge, Attitudes, and Risk Perception Toward Avian Influenza Virus Exposure Among Cuban Hunters. *Front Public Health.* 2021;9:644786.
 28. BirdLife International. Sites (Important Bird Areas), Global IBA Criteria [Internet]. 2024 [citado 12 sep 2024]. Disponible en: <https://datazone.birdlife.org/site/ibacritglob>
 29. Dolinski AC, Jankowski MD, Fair JM, Owen JC. The association between SAa2,3Gal occurrence frequency and avian influenza viral load in mallards (*Anas platyrhynchos*) and blue-winged teals (*Spatula discors*). *BMC Vet Res.* 2020;16(1):430.
 30. Rohwer FC, Johnson WP, Loos ER. Blue-winged Teal (*Spatula discors*), version 1.0. En: Billerman SM, editor. *Birds of the World* [Internet]. Ithaca: Cornell Lab of Ornithology; 2020 [citado 12 Sep 2024]. Disponible en: https://doi.org/10.2173/bow_buwea.01
 31. González-Reiche AS, Morales-Betoulle ME, Alvarez D, Betoulle JL, Müller ML, Sosa SM, et al. Influenza A viruses from wild birds in Guatemala belong to the North American lineage. *PLoS One.* 2012;7(3):e32873.

- 32.Ly H. Highly pathogenic avian influenza H5N1 virus infections of dairy cattle and livestock handlers in the United States of America. *Virulence*. 2024;15(1):2363012.
- 33.Curran SJ, Griffin EF, Ferreri LM, Kyriakis CS, Howerth EW, Perez DR, et al. Swine influenza A virus isolates containing the pandemic H1N1 origin matrix gene elicit greater disease in the murine model. *Microbiol Spectr*. 2024;12(3):e0410123.
- 34.Pineda Medina D, Miranda Cabrera I, de las Nieves Montano Valle D, Delgado Hernandez B, Abreu Jorge Y, Alfonso P. Stochastic simulation of the spread of highly pathogenic avian influenza in Cuba. *Rev Salud Anim* [Internet]. 2023;45:e15. Disponible en: <https://cu-id.com/2248/v45e15>
- 35.Railey AF, Adamson D, Simmons HL, Rushton J. Economics of reducing response time to foreign-animal disease in the United States with point-of-care diagnostic tests. *Prev Vet Med*. 2024;230:106284.
- 36.Eloit M. Foreword. Global Burden of Animal Diseases. *Rev Sci Tech*. 2024;43:9-11.
- 37.Gaston KJ. Birds and ecosystem services. *Curr Biol*. 2022;32(20):R1163-6.
- 38.Arnik N, Interdonato R, Roche M, Teisseire M. An Evaluation Framework for Comparing Epidemic Intelligence Systems. *IEEE Access*. 2023;11:31880-901.
- 39.Markin A, Ciacci Zanella G, Arendsee ZW, Zhang J, Krueger KM, Gauger PC, et al. Reverse-zoonoses of 2009 H1N1 pandemic influenza A viruses and evolution in United States swine results in viruses with zoonotic potential. *PLoS Pathog*. 2023;19(7):e1011476.

Recibido: 28/11/2025

Aprobado: 28/12/2025

Beatriz Delgado Hernández, Damarys de las Nieves Montano Valle, Alejandro Rodríguez Ochoa, Dunia Pineda Medina, Martín Acosta Cruz

- Administración de proyecto: Pastor Alfonso Zamora
- **Software:** Beatriz Delgado Hernández, Alejandro Rodríguez Ochoa, Dunia Pineda Medina
- Supervisión: Pastor Alfonso Zamora, Lourdes Mugica Valdez, Martín Acosta Cruz
- Visualización: Beatriz Delgado Hernández, Alejandro Rodríguez Ochoa, Dunia Pineda Medina
- Redacción-borrador original: Beatriz Delgado Hernández, Damarys de las Nieves Montano Valle, Alejandro Rodríguez Ochoa, Dunia Pineda Medina
- Redacción-revisión y edición: Pastor Alfonso Zamora, Lourdes Mugica Valdez, Damarys de las Nieves Montano Valle, Martín Acosta Cruz

Financiamientos

Damarys Montano, realizó parte del trabajo en el Instituto de Salud Pública Veterinaria, Facultad Vetsuisse, Universidad de Berna. Esta estancia de investigación fue financiada por la Secretaría de Estado de Educación, Investigación e Innovación (SERI), a través del Banco Suizo Becas de Excelencia Gubernamental. El Consejo de Investigación de Noruega cubrió los costos de publicación del estudio de modelación de la transmisión, a través del Fondo editorial NVI Open Access.

Por otra parte, se recibió apoyo financiero para la investigación y publicación de los resultados del estudio de conectividad migratoria de BWTE proporcionado por Environment and Climate Change Canada y una beca para las ciencias naturales y la ingeniería Consejo de Investigación (NSERC) de Canadá (2017-04430), así como financiamiento por el Consejo (NSERC PGSD), la Provincia de Ontario (QEII-GSST) y la Universidad Occidental.

El estudio de CPA de cazadores cubanos, fue financiado por el proyecto 9483 del Programa Sectorial de Sanidad Animal y Vegetal del Ministerio de la Agricultura, Cuba.

Ninguno de los financieros tuvo rol en el diseño del estudio, la recopilación de datos, el análisis de datos, su interpretación o la redacción de los reportes de ellos derivados.

Cómo citar este artículo

Alfonso Zamora[†] P, Mugica Valdez L, Delgado Hernández B, Montano Valle DN, Rodríguez Ochoa A, Pineda Medina D **et al.** Virus influenza aviar. Alerta temprana de riesgos en la interfaz fauna silvestre, ganadería, humanos. *An Acad Cienc Cuba* [Internet] 2025 [citado en día, mes y año];15(3):e3215. Disponible en: <http://www.revistaccuba.cu/index.php/revacc/article/view/3215>

El artículo se difunde en acceso abierto según los términos de una licencia Creative Commons de Atribución/Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0), que le atribuye la libertad de copiar, compartir, distribuir, exhibir o implementar sin permiso, salvo con las siguientes condiciones: reconocer a sus autores (atribución), indicar los cambios que haya realizado y no usar el material con fines comerciales (no comercial).

© Los autores, 2025.

