

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE ENFERMERÍA Y NUTRICIÓN
POSGRADO EN SALUD PÚBLICA

Estimación de escenarios en el potencial de introducción, establecimiento y dispersión del agente causal de la Influenza Tipo “A”; como un riesgo a la Salud Pública en México; bajo la perspectiva de la Geointeligencia Sanitaria.

Por el Licenciado en Geografía Enrique Ibarra Zapata



San Luis Potosí S.L.P.

Agosto de 2018

Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Enfermería y Nutrición

Posgrado en Salud Pública



Estimación de escenarios en el potencial de introducción, establecimiento y dispersión del agente causal de la Influenza Tipo "A"; como un riesgo a la Salud Pública en México; bajo la perspectiva de la Geointeligencia Sanitaria.

Tesis

Para obtener el grado de Maestro en Salud Pública

Presenta:

Licenciado en Geografía Enrique Ibarra Zapata

Asesores:

Dr. Darío Gaytán Hernández
Director

Firma manuscrita en tinta azul de Darío Gaytán Hernández.

Dr. Gustavo Mora Aguilera
Coasesor

Firma manuscrita en tinta negra de Gustavo Mora Aguilera.

Dr. Miguel Ernesto González Castañeda
Coasesor

Firma manuscrita en tinta negra de Miguel Ernesto González Castañeda.

San Luis Potosí S.L.P.

Agosto de 2018

Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Enfermería y Nutrición

Posgrado en Salud Pública



Estimación de escenarios en el potencial de introducción, establecimiento y dispersión del agente causal de la Influenza Tipo "A"; como un riesgo a la Salud Pública en México; bajo la perspectiva de la Geointeligencia Sanitaria.

Tesis

Para obtener el grado de Maestro en Salud Pública

Presenta:

Licenciado en Geografía Enrique Ibarra Zapata

Sinodales:

Dr. Luis Eduardo Hernández Ibarra
Presidente

Firma manuscrita en tinta negra sobre una línea horizontal, con el nombre "Luis Eduardo Hernández Ibarra" escrito encima y la palabra "Firma" debajo.

MSP. Ma. Guadalupe Guerrero Rosales
Secretaria

Firma manuscrita en tinta azul sobre una línea horizontal, con el nombre "MSP. Ma. Guadalupe Guerrero Rosales" escrito encima y la palabra "Firma" debajo.

Dr. Darío Gaytán Hernández
Vocal

Firma manuscrita en tinta negra sobre una línea horizontal, con el nombre "Dr. Darío Gaytán Hernández" escrito encima y la palabra "Firma" debajo.

San Luis Potosí S.L.P.

Agosto de 2018

3. Resumen

El objetivo de la investigación fue estimar los escenarios de potencial probabilístico de introducción, establecimiento y dispersión del agente causal de la influenza tipo A, en México; tomado como fundamento las perspectivas de la Geointeligencia sanitaria e incorpora la epidemiología (biología, mecanismos de dispersión, etc.), que favorecen este tipo de virus representado en un contexto espaciotemporal.

Se realizó un estudio ecológico, transversal a través del uso de bases de datos espaciales (BDE) de la variables que potencializan el riesgo de introducción, establecimiento y dispersión del agente causal de la influenza tipo A altamente patógena, e involucro como elemento detonante un total de 1973 detecciones de influenza altamente patógena en el mundo, avalados por laboratorios oficiales de la Organización Mundial de la Salud y la World Organisation for Animal Health.

El potencial probabilístico de introducción involucro el concepto de contagio, el no. de eventos espaciales, el análisis de clusters asociados al riesgo para la salud pública; obteniendo las isócronas de riesgo sanitario y el modelo de similitud climática que permite estimar el escenario de riesgo de introducción, obteniendo que más de la mitad del territorio se encuentra en nivel alto de introducción de virus altamente patógenos con cerca del 70% de la población expuesta en escala nacional.

Por su parte, el potencial probabilístico de establecimiento representado en escala regional involucro la combinación lineal ponderada (en la importancia de las variables); la membresía difusa (en los requerimientos óptimos para establecimiento de este tipo de virus) y la estimación de pesos (a través del método Raitig); lo que permitió caracterizar el riesgo ambiental, natural y antrópico; lo que, evidencia que 18.47% del territorio nacional cuenta con un nivel de riesgo de establecimiento de medio, alto a muy alto; estimación respaldada con una r^2 de 0.84 y un índice de moran 0.787, lo que, refleja un modelado con alta agregación espacial del riesgo de establecimiento.

Además, en escala local la estimación del potencial probabilístico de dispersión permite evidenciar las áreas que representan riesgo de dispersión en las modalidades natural y antrópica de virus altamente patógenos considerando la epidemiología espacial de este tipo de virus, que mediante la interacción espacial se definen áreas puntuales de riesgo de dispersión en México en diez niveles de riesgo de dispersión de (0.0 a 0.9), resaltando que ante una detección es recomendable fortalecer las acciones de vigilancia epidemiológica en grupos vulnerables niños menores de 2 años y adultos mayores; además poner especial atención a personas que se encuentre habitualmente a sitios próximos a cuerpos de agua y granjas avícolas y aves traspatio.

El modelado geoespacial constituye una herramienta para la priorización y planificación de acciones, para dar soporte en la toma de decisiones, debido a que representan epidemiológica, espacial y temporalmente el riesgo a la salud pública ante enfermedades reemergente como el agente causal de los virus de influenza tipo A.

Con esta metodología es posible identificar o caracterizar el riesgo de enfermedades reemergentes definida en tres modalidades: el riesgo de introducción, el riesgo de establecimiento y el riesgo de dispersión conforme a las directrices del Reglamento Sanitario Internacional ante riesgo para la salud poblacional.

Es pertinente señalar que este tipo de estudios se puede presentar como una investigación transdisciplinar; debido a que puede aplicarse ante problemas de salud pública, salud animal, salud forestal e incluso sanidad vegetal.

Palabras clave: Influenza A, Análisis de riesgo, Epidemiología, Salud Pública, Sistemas de Información Geográfica, Mapa de riesgo, México.

Summary

The objective of the research was to estimate the scenarios of probabilistic potential of introduction, establishment and dispersion of the causative agent of influenza type A, In Mexico, taken as a basis the perspectives of the sanitary Geointeligencia and incorporates the epidemiology (biology, mechanisms of dispersion, etc.), that favor this type of virus represented in a space-time context.

An ecological, cross-sectional study was conducted through the use of spatial databases (BDE) of the variables that potentiate the risk of introduction, establishment and dispersion of the causative agent of highly pathogenic type A influenza, and involved a total detonating element of 1973 detections of highly pathogenic influenza in the world, endorsed by official laboratories of the World Health Organization and the World Organization for Animal Health.

The probabilistic potential of introduction involved the concept of contagion, the no. of spatial events, the analysis of clusters associated with irrigation for public health; obtaining the isochrones of sanitary risk and the model of climatic similarity that allows to estimate the risk scenario of introduction, obtaining that more than half of the territory is in high level of introduction of highly pathogenic virus with about 70% of the exposed population on a national scale.

On the other hand, the probabilistic potential of establishment represented on a regional scale involved the weighted linear combination (in the importance of the variables); the diffuse membership (in the optimal requirements for the establishment of this type of virus) and the estimation of weights (through the Raitig method); what allowed to characterize the environmental, natural and anthropic risk; what, evidences that 18.47% of the national territory has a risk level of establishment of medium, high to very high; estimated supported with an r^2 of 0.84 and an index of Moran 0.787, which reflects a modeling with high spatial aggregation of establishment risk.

In addition, on a local scale the estimation of the probabilistic potential of dispersion makes it possible to demonstrate the areas that represent risk of dispersion in the natural and anthropic modalities of highly pathogenic viruses considering the spatial epidemiology of this type of virus, which through spatial interaction define specific areas of risk of dispersion in Mexico in ten levels of risk of dispersion from (0.0 to 0.9), highlighting that before a detection it is advisable to strengthen the actions of epidemiological surveillance in vulnerable groups children under 2 years and older adults; also pay special attention to people who are usually located near water bodies and poultry farms and backyard birds.

The geospatial modeling is a tool for the prioritization and planning of actions, to give support in decision-making, because they represent epidemiologically, spatially and temporally the risk to public health in reemerging diseases as the causal agent of influenza viruses type A.

With this methodology it is possible to identify or characterize the risk of reemerging diseases defined in three modalities: the risk of introduction, the risk of establishment and the risk of dispersion according to the guidelines of the International Health Regulations for risk to population health.

It is pertinent to point out that this type of studies can be presented as a transdisciplinary investigation; because it can be applied to problems of public health, animal health, forest health and even plant health

Key words: Influenza A, Risk analysis, Epidemiology, Public Health, Geographic Information Systems, Risk map, Mexico.

4. Agradecimientos

Se extiende un agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONCYT; por el apoyo económico otorgado para la manutención en el periodo en que se realizó la presente investigación 2016-2018; así mismo a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, a la Facultad de Enfermería y Nutrición y al Posgrado en Salud Pública por las facilidades y aprendizaje en el transcurso de la preparación y formación de un salubrista de excelencia “el camino es largo pero existen buenos cimientos para lograr metas en pro de los problemas sanitarios del país”.

De igual forma se extiende el más sincero agradecimiento a los profesores del Posgrado en Salud Pública: quienes compartieron sus saberes, conocimientos y experiencias en el campo de la salud pública; por las reflexiones, el sudor y la semilla de compromiso que dejan en un servidor.

Finalmente y no menos importante a quien dirigió la presente investigación, Dr. Gaytán Hernández, Dr. Mora Aguilera y Dr. González Castañeda; así como a los lectores y Sinodales Dr. Hernández Ibarra, MSP. Guerrero y L.A. Zacarías de la Rosa que contribuyeron para realizar y consolidar la investigación que a continuación se desarrolla.

Dedicatoria

Principalmente para una persona muy importante y especial "**Faa**" por tu apoyo incondicional en el cumplimiento de mis metas profesionales y personales, los consejos, el amor, los aportes técnicos y metodológicos, "*eres lo máximo y la perfecta compañera*"; SIEMRE JUNTOS..."

Así mismo a mis papas, hermanos y sobrinos por estar en las buenas y las malas apoyándome siempre...

5. Índice

Contenido

4. Agradecimientos	8
Dedicatoria	9
5. Índice	10
Índice de cuadros	11
Índice de figuras	12
Anexos	13
6. Introducción	14
7. Planteamiento del problema.	16
7.1. Justificación.....	18
7.2. Pregunta de Investigación	20
8. Hipótesis	22
9. Objetivos	22
9.1 Objetivo general	22
9.2 Objetivos específicos	23
10. Marco teórico	23
10.1 Marco Legal y normativo	30
11. Metodología (materiales y métodos)	33
11.1 Tipo de estudio.....	34
11.2 Diseño metodológico	34
11.3 Límites de espacio y tiempo	34
11.4 Universo o población	35
11.5 Muestra.....	35
11.6 Criterios de estudio.....	35
11.7. Variables	36
11.8 Instrumento	40
11.9 Procedimientos	40
11.9.1 Potencial Probabilístico de Introducción “Ppi”	41
11.9.2 Potencial Probabilístico de establecimiento “Ppe”	45
11.9.3 Potencial probabilístico de dispersión “Ppd”	47
11.9.4 Análisis estadístico.	49
	10

12. Consideraciones éticas y legales.....	51
13. Resultados.....	52
14. Discusión	75
15. Conclusiones y recomendaciones.....	79
16. Referencias bibliográficas.....	81
17. Anexos.....	92
18. Artículo No.1: Revista Panamericana de Salud Pública.....	99
Escenario e riesgo de introducción del agente causal de la influenza tipo A en México.	99
19. Artículo No. 2: Revista Saude Pública	123
Modelado geoespacial del riesgo de establecimiento de la influenza de alta patogenicidad en México.	123

Índice de cuadros

<i>Tabla1.Operacionalización de variables implicadas en el modelado de riesgo en el potencial probabilístico de introducción del agente causal de la influenza tipo A en México.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla2. Operacionalización de variables implicadas en el modelado de riesgo de Potencial probabilístico de dispersión del agente causal de la influenza tipo A en México.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla3. Operacionalización de variables implicadas en el modelado de riesgo de potencial probabilístico de dispersión del agente causal de la influenza tipo A en México.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 4 Modelo de Potencial Probabilístico de Introducción del agente causal de la influenza tipo “A” en México (Ppi)**</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 5 Modelo de Potencial Probabilístico de Establecimiento del agente causal de la influenza tipo “A” en México (Ppe) **</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 6 Modelo de Potencial Probabilístico de Dispersión del agente causal de la influenza tipo “A” en México (Ppd) **</i>	<i>75</i>

Índice de figuras

<i>Figura 1. Diseño Conceptual de la metodología desarrollada.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 2: Visualización del modelo de conectividad en la estimación de las isócronas de riesgo sanitario en el potencial probabilístico de introducción de la IAP en México.</i>	
<i>2a) Visualización espacial de los nodos de interés: 1,973 ubicaciones en el periodo 2014-2015 las cuales son representadas mediante los valores de latitud y longitud.....</i>	<i>53</i>
<i>2b) Asociación espacial entre los nodos de interés, representado en 3, 2014,849 isoclineas que permiten determinar las Isócronas de Riesgo Sanitario (Is-RS) en el Ppi.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 3. Isócronas de Riesgo Sanitario en el Potencial Probabilístico de Introducción de la influenza altamente patógena 2015-2016.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4. Modelo de máxima entropía de la influenza altamente patógena 2015-2016... </i>	<i>57</i>
<i>Figura 5. Rutas intercontinentales de aves migratorias 2015.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 6. Modelos de Similitud Climática (Maxent) en México y Diagrama de la curva de operación del receptor “ROC”</i>	<i>60</i>
<i>Figura 7. Variables que potencializan el riesgo de establecimiento natural (a) y antrópico (b) del agente causal de la influenza tipo A en México.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 8. Variables que potencializan el riesgo de dispersión natural (c) y antrópico (d) del agente causal de la influenza tipo A en México.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 9. Potencial Probabilístico de Introducción “Ppi” (1er periodo “septiembre/marzo” norte a sur).....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 10. Potencial Probabilístico de Introducción “Ppi” (2do periodo “abril/agosto” norte a sur).....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 11. Potencial Probabilístico de Introducción del agente causal de la influenza tipo A en México.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 12. Modelado espacial de variables que potencializan el riesgo de establecimiento natural (a) y antrópico (b) del agente causal de la influenza tipo A en México.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 13. Modelado espacial de variables que potencializan el riesgo de establecimiento natural (a) y antrópico (b) del agente causal de la influenza tipo A en México.....</i>	<i>71</i>

Anexos

<i>Anexo 1 Oficio SENASICA-SAGARPA.....</i>	<i>56</i>
<i>Anexo 2 Carta de No conflicto de intereses</i>	<i>57</i>
<i>Anexo 3 Carta de aprobación del Comité Académico de Salud Pública.....</i>	<i>59</i>
<i>Anexo 4 Carta de Aceptación del Comité de Ética en Investigación de la FEyN.....</i>	<i>60</i>

6. Introducción

Algunas referencias de la asociación entre las Ciencias de la Salud con la disciplina Geográfica, se tienen documentadas en diferentes épocas, por ejemplo en (1624-1689); Thomas Sydenham propone la corriente higienista que prestó una singular atención al medio natural y su posible relación con las enfermedades.

Para la segunda mitad del siglo XVIII se comienzan a publicar los primeros trabajos acerca de la Geografía Médica, los cuales ejercieron una favorable influencia en la medicina de la época; e inclusive para 1854 se atribuye el nacimiento de la Epidemiología moderna con la investigación sobre la epidemia de cólera en Londres (John Snow); destacando rasgos distintivos basados en la ingesta de agua insalubre y sus repercusiones en la salud humana, considerado el ejemplo clásico del uso de los mapas en la salud.

Posteriormente durante el siglo XIX e inicios del XX la Geografía Médica ha estado presente en numerosos estudios, realizados por profesionales de la salud (Médicos, Epidemiólogos, Enfermeras, etc.).

Y hasta finales del siglo XX e inicios del XXI se integra el componente espacial a los principales problemas de salud en el mundo, con las denominadas Tecnologías de Información Geográfica "TIG", que han suscitado cambios en la forma de entender, enfrentar y atender problemas en Salud, básicamente derivado de la integración de nuevos enfoques, tendencias, perspectivas u orientaciones que giran en torno al avance tecnológico y a la espacialidad de los fenómenos sanitarios.

En este sentido la complejidad de los problemas en Salud Pública en el mundo actual, hace que se perciba como un poliedro de muchos y cambiantes lados que justifican la variedad de enfoques o perspectivas con las que se deben abordar problemas sanitarios [1]; como la medicina social, la salud comunitaria, la investigación participativa y como se propone en la presente investigación en particular la Geointeligencia Sanitaria en la estimación de escenarios de eventos agudos de Salud Pública como la posible afectación del agente causal de la influenza tipo "A" en México.

Es importante señalar que la presente investigación propone una metodología que involucra la perspectiva del componente espacial y de la epidemiología del agente causal de la influenza tipo “A”, (bajo un enfoque transdisciplinario¹ y multidisciplinario²), y se aborda desde la visión de la Geointeligencia; ya que, científicamente se encuentra documentado que algunas cepas de la influenza tipo “A” pueden ocasionar afectaciones al ser humano con altas tasas de mortalidad; incluso para 2017 la *Organización Mundial de la Salud* (OMS) señala dos tipos de influenza altamente patógena detectada en seres humanos H5N1 y H7N9, con una tasa de mortalidad de 27% y 60% respectivamente. Lo cual se considera un evento agudo de Salud Pública, y se define como cualquier brote o situación rápidamente cambiante que puede tener consecuencias negativas para la salud humana, por lo que, requiere evaluación y acciones inmediatas [2].

En este sentido los virus de influenza tipo A se perciben como un grave problema para la población mundial por el potencial pandémico que representan, ya que de acuerdo con la *World Organisation for Animal Health* (OIE) 2017; es una enfermedad compleja y con múltiples brotes en aves de corral que han tenido graves repercusiones en los medios de subsistencia y el comercio internacional; ya que, algunos subtipos como H5N1 y H7N9, han causado infecciones graves en humanos, inclusive para finales de 2016, se identificó el subtipo H5N8, en varias regiones del mundo, incluyendo Europa y América, así como Asia y Oriente Medio.

Por ello el interés de incorporar nuevos enfoques en forma de abordar, comprender y atender enfermedades de índole zoonótico, e incluso de acuerdo con la OIE (2017); de cada 5 nuevas enfermedades humanas que aparecen cada año tres son de origen

¹ Abarca varias disciplinas “Es la forma de organización de los conocimientos, donde los métodos que han sido utilizados con éxito dentro de una disciplina, se transfieren a otra, introduciéndolos en ella sobre la base de una justificación”

² Involucra el conocimiento varias disciplinas cada una aportando desde su espacio al tema en cuestión.

animal; Y al menos un 75% de los agentes patógenos de las enfermedades infecciosas emergentes del ser humano (incluida la influenza) son de origen animal.

En este sentido la presente investigación incorpora el enfoque de la Geointeligencia en virtud de lo señalado por la OMS y la OIE con miras hacia <<Una *sola sanidad*>>; concepto introducido a comienzos de la década del año 2000, resumido en pocas palabras como una noción conocida desde hace más de un siglo, a saber que la salud humana y la sanidad animal son interdependientes y están vinculadas a los ecosistemas en los cuales coexisten.

Las enfermedades de origen animal a las que el hombre es sensible, como la influenza, y otras zoonosis, representan riesgos mundiales para la salud pública; puesto que existen reservorios naturales y antrópicos, así como los mecanismos de dispersión que favorecen la propagación de las mismas, ya que estos riesgos o problemas de salud se incrementan con la globalización, el cambio climático y por comportamiento humano, lo que multiplica las oportunidades para que los patógenos colonicen nuevos territorios y evolucionen bajo nuevas formas [8]; como riesgos potenciales para integridad humana.

7. Planteamiento del problema.

Los virus de influenza (de baja y alta patogenicidad) se encuentran presentes en todo el mundo, sin embargo los altamente patógenos de subtipos H5 y H7 se han aislado ocasionalmente en aves en silvestres en Europa y otras regiones del planeta, registrando focos en algunas zonas de Pennsylvania, Estados Unidos de América, en los años 1983-1984. [9].

De igual forma para 2003 se registraron focos de H5N1 en varios países del Sureste Asiático donde hoy en día se considera la región endémica de la enfermedad, ya que se encuentra presente todo durante todo el año.

En este sentido existen referencias de la OIE que virus de baja patogenicidad pueden mutar o convertirse en altamente patógenos, lo que potencializa el riesgo a la Salud

Pública, y más aún porque este tipo de virus se pueden encontrar en diferentes animales con los que el ser humano interactúa (patos, pollos, cerdos, caballos, entre otros...) [3].

Este tipo de virus han sido aislados a partir de más de 100 especies diferentes de aves, la mayoría de ellos en virus de baja incidencia patógena, y ocasionalmente se ha detectado altamente patógena [4]; en este sentido los virus de la influenza tipo "A" específicamente los altamente patógenos están asociados con epidemias y pandemias humanas; ya que pueden recombinarse hasta en 144 posibles subtipos según glicoproteína de superficie mediante la combinación de las 16 Hemaglutininas (H) y las 9 Neuraminidasas (N) que los conforman [14], incluso existen referencias que los 16 subtipos de Hemaglutininas se perpetúan en las aves silvestres acuáticas con un comportamiento cíclico anual (estacional) en el que intervienen numerosas especies migratorias [5].

Al respecto y como referencia fundamental en la dispersión de los virus de influenza tipo A existen publicaciones que señalan que algunos de los movimientos migratorios de aves implican miles de millones de individuos que realizan trayectos que se extienden a grandes distancias, a menudo vuelos intercontinentales (Kranstauber *et al*; 2016) [6]; e incrementando el riesgo de dispersión Prosser *et al.*; (2016) señala que las aves acuáticas silvestres (familia Anatidae: patos y gansos entre otros) son transmisores secundarios de la influenza altamente patógena y los principales reservorios de virus de influenza aviar de baja patogenicidad [7]; cuya interacción puede potencializar el riesgo para la salud pública asociada a una posible recombinación.

Sin embargo existen publicaciones que evidencian que la interacción de la triada patógeno / hospedero / ambiente, incrementan el riesgo para la salud pública como lo señaló Jiménez C. (2013); que indica que los virus tipo "A" son marcadamente variables y heterogéneos; pues cuentan con una gran capacidad de adaptación lo que determina su patogenicidad, es decir, la capacidad de causar enfermedad en el hospedero incluyendo al ser humano [5], lo que potencializa el riesgo para la Salud Pública, asociado espacialmente a los mecanismos de dispersión natural y antrópica como se aborda en la presente investigación.

En este sentido la interacción de los virus del agente causal de la influenza tipo “A” representan un motivo de preocupación para la Salud Pública global por el potencial pandémico que representan y además, que puede tener graves repercusiones en la salud poblacional, la economía local, e incluso el comercio internacional.

7.1. Justificación

De acuerdo con la OIE (2016) el 60% de las enfermedades humanas infecciosas son de origen zoonótico, además, al menos un 75% de los agentes patógenos de las enfermedades infecciosas emergentes del ser humano son de origen animal, e incluso, y de 5 nuevas enfermedades humanas que aparecen tres son consideradas zoonosis [8]. Como es el caso del agente causal de la Influenza tipo A; lo anterior se sustenta en publicaciones que señalan que las aves silvestres son de los principales medios de propagar las cepas altamente patógenas, por ejemplo, en el periodo 2005-2006 se presentaron brotes del subtipo H5N1 a través de rutas intercontinentales de aves a lo largo de Asia, Europa, Medio Oriente y África [10].

Inclusive de acuerdo con Ward *et al.*, (2009) las pruebas que apoyan esta hipótesis incluyen algunos casos científicamente comprobados como la existencia de un brote de influenza descubierto en aves silvestres en el Lago Qinghai (al oeste de China) en mayo de 2005; así como algunos brotes en Turquía, Rumania y Ucrania durante el último trimestre de 2005; de igual forma la infección de un gran número de cisnes y otras aves silvestres en Europa Occidental en la primavera de 2006 [10]; Regiones en donde se han detectado cepas altamente virulentas con un alto potencial pandémico.

Específicamente la influenza altamente patógena A (H5N1) infectó por vez primera al ser humano en 1997, durante un brote de gripe aviar registrado en la región de Hong Kong (China); de donde se propagó hacia Europa y África; produciendo millones de casos de infección en animales, varios cientos de casos humanos y la muerte de muchas personas [2]; con repercusiones graves en los modos y medios de vida de las personas, puesto

que se consideran acontecimientos impredecibles que traen consecuencias sanitarias, económicas y sociales en un contexto global.

Más recientemente entre 2014 y 2015 se reportaron brotes en 16 países con algunos casos esporádicos de H5, H7 y H9 en seres humanos, y más común aún se han detectado casos de influenza altamente patógena atribuidos a la circulación entre aves de corral en Asia y Medio Oriente, generalmente causando neumonía grave con aproximadamente el 16% de mortalidad en aves [11].

En este sentido la presente investigación se justifica debido a que la OIE en 2016 señaló que, es sumamente importante poner en práctica sistemas de detección y alerta temprana, con una vocación hacia la prevención en el marco de una estrategia eficaz frente a la influenza tipo A; así como una apropiada preparación ante un foco eventual.

Por lo que la investigación propuesta aborda la problemática desde la perspectiva de la Geointeligencia con un sustento normativo y legal señalado más adelante; así mismo incorpora elementos de alto riesgo conforme al Código Sanitario para los Animales Terrestres de la OIE entre los que se destaca:

- a) La caracterización de los focos altamente patógenos en escala macro, a través de la ocurrencia y prevalencia de los mismos; de acuerdo a información oficial de laboratorios del Sistema Mundial de Vigilancia y Respuesta a la Gripe (SMVRG) de la OMS, así como laboratorios oficiales de la OIE; quienes reportan la aparición de brotes con características de potencial pandémico; lo cual representa la caracterización de la denomina área de fuente de inóculo en la presente investigación.
- b) La caracterización de las diferentes rutas migratorias y sitios de reunión de aves migratorias “Áreas de Conservación de Aves”; lo que caracteriza la estimación del potencial probabilístico de introducción a México; y
- c) La ubicación de las “Unidades de Producción Avícola” en México, considerándose como posibles fuentes inóculo de los virus altamente patógenos, y en la presente

investigación se complementa con el riesgo antrópico en potencial probabilístico de establecimiento y dispersión.

Lo anterior se sustenta con las directrices de la OMS, en donde señala que debe existir información y servicios en materia de vigilancia frente a una pandemia, evaluación de riesgos y un sistema de alerta [12], lo cual es el fin de la presente investigación al estimar el potencial probabilístico de introducción, establecimiento y dispersión del agente causal de los virus de influenza tipo A en México, representados en un contexto espacial y temporal; con un sustento epidemiológico reflejado en denominados mapas de riesgo sanitarios, en una versión impresa y digital con miras a soportar la toma de decisiones.

7.2. Pregunta de Investigación

Derivado de lo anterior resulta la pregunta de investigación:

¿Cuáles son los escenarios de riesgo para la salud pública por la de introducción, establecimiento y dispersión del agente causal de la Influenza tipo “A” en México desde el punto de vista de la Geointeligencia?

Para dar respuesta a las cuestiones que guían la investigación mediante la metodología propuesta se obtendrán como resultados dos vertientes que reflejan componente espacial y temporal del riesgo sanitario del agente causal de la influenza tipo A, a través de evidenciar: ¿el dónde?; es decir espacialmente ubicar los lugares o sitios con mayor aptitud de introducción, establecimiento y dispersión de la influenza en México; así como evidenciar ¿Cuánto? Resaltando la población expuesta en territorio nacional en escala (estatal y municipal); evidenciando los resultados mediante coberturas o mapas digitales que pueden fortalecer la toma de decisiones en materia sanitaria; incluyendo la salud pública y sanidad animal, como un medio preventivo.

El estudio se trabaja en diferentes escalas donde se involucran variables que inciden o potencializan en el riesgo sanitario del agente causal de la Influenza tipo A en virtud de los modelos propuestos, que a continuación se describen:

- a) El potencial probabilístico de introducción (Ppi): Considera la fuente de inóculo Estados Unidos y Centroamérica bajo el principio geográfico de proximidad; ya que

en años recientes han existido ocurrencia de focos de cepas altamente patógenas; de igual forma y en asociación espacial con las rutas de aves migratorias señaladas por Kranstauber *et al.*, 2015; en la publicación “*Global aerial flyways allow efficient travelling*”, donde realiza un seguimiento espacial de las especies y la definición de las rutas intercontinentales de aves migratorias.

b) El potencial probabilístico de establecimiento (Ppe): que involucra el modelado de similitud climática o Máxima Entropía que permite modelar las condiciones ambientalmente favorables para el establecimiento del patógeno para su establecimiento en México; que de acuerdo con Elith *et al.*, (2011), Phillips y Dudik, (2008), es una medida de similitud de los ambientes en cada pixel a los pixeles donde la especie ha sido observada; Y se puede considerar como una aproximación a la distribución potencial, inclusive publicaciones recientes muestran matemáticamente que este modelado es equivalente a un proceso de Poisson Puntual estimado con los puntos del background adecuadamente ponderados (Fithian & Hastie 2012) [13] y (Royle *et al.*, 2012) [14]. Y se robustece con las variables de las Áreas de Conservación de Aves de la “CONABIO”, las Unidades de Producción Avícola del “INEGI”.

c) El Potencial probabilístico de dispersión (Ppd): mediante el cual se otorga peso a las variables que inciden o potencializan la dispersión o movilización del patógeno; la dispersión natural de cepas altamente patógena; es decir; la epidemiología de la enfermedad; así como el factor antrópico (donde coadyuva el ser humano) que puede favorecer la dispersión en territorio nacional; a través de la incorporación de coberturas espaciales (archivos Shape File) como: La densidad poblacional del “INEGI”, la red nacional de carreteras del “INEGI-IMT” y el transito promedio nacional del “IMT-SCT”.

De acuerdo a la metodología espacial que se desarrolla es pertinente señalar que toda la información antes mencionada para el análisis esta geográficamente referida o georeferenciada, es de carácter oficial respaldada por instituciones públicas y es de uso libre, ya que, su consulta se realiza en páginas web, o sitios de Geoinformación como lo

son: Organización Mundial de la Salud, World Organisation for Animal Health, Instituto Nacional de Estadística e información Geográfica, Comisión Nacional de Biodiversidad, Instituto Mexicano del Transporte SCT, etc. De igual forma y para fortalecer el modelado que se desarrolla se integran publicaciones científicas en que señalan las variables que inciden o incrementan el riesgo para Salud Pública.

Los resultados expuestos tienen la finalidad de fortalecer la toma de decisiones en materia sanitaria, puesto que la visión transdisciplinaria que permea el estudio ofrece como resultado coberturas digitales del riesgo que facilitan las acciones ante problemas que ponen en riesgo la sanidad en el país; lo anterior se sustenta en el oficio B00.01.04.05963 de SENASICA-SAGARPA con fecha de 22 de junio de 2016; donde se hace referencia “A la consolidación del uso de tecnología geoespacial, Sistemas de Información Geográfica, servidores de mapas e información georeferenciada para dar soporte a la toma de decisiones en materia de Sanidad Vegetal”. Ver en anexo 1 (que para estos fines se ha omitido parte de su contenido).

8. Hipótesis

Con el enfoque de la Geointeligencia Sanitaria es posible estimar escenarios de riesgo en la introducción, establecimiento y dispersión de enfermedades zoonóticas como lo es la influenza tipo “A” altamente patógena.

9. Objetivos

Derivado de lo anterior y para dar soporte a la investigación se plantea un objetivo general y tres objetivos específicos que a continuación se describen:

9.1 Objetivo general

Estimar los escenarios de riesgo de introducción a México del agente causal de la influenza tipo A considerando datos globales y definiendo el área de fuente de inóculo; Así como los escenarios de establecimiento y dispersión en territorio nacional desde el punto de vista de la geointeligencia sanitaria.

9.2 Objetivos específicos

Realizar una evaluación espacio temporal de la superficie en riesgo de introducción a México del agente causal de la Influenza tipo “A” considerando para definir la fuente de inóculo el principio geográfico de proximidad y con un soporte epidemiológico.

Identificar espacial y temporalmente la superficie en riesgo de establecimiento en México de la Influenza tipo “A” desde el punto de vista de la Geointeligencia Sanitaria.

Identificar la superficie en riesgo de dispersión en México de la Influenza tipo “A” desde el punto de vista de la Geointeligencia sanitaria haciendo énfasis en la relación tiempo/lugar /persona.

10. Marco teórico

La disciplina geográfica ha tratado de definir su objeto de estudio con base en términos como territorio, espacio, paisaje, región o lugar, cada uno con un sustento epistemológico³, sin embargo; en esencia se soporta por un mismo propósito entendido como estudiar, analizar, entender y reflexionar el conjunto de relaciones que el ser humano establece en su contexto espacial caracterizado por ambientes biofísico-naturales y sociales como parte esencial del lugar donde se vive, por lo que se puede entender como una ciencia relacional o integradora en la búsqueda de alternativas a problemas variados; como es el caso de la salud pública.

Por ejemplo alrededor de 1970 se propone un enfoque integrador capaz de borrar las fronteras entre las disciplinas geográficas y el bienestar humano; denominada la Geografía del bienestar [15].

³ Se dedica al estudio de la estructuración y fundamentación de los conocimientos científicos es decir, trata de encontrar la naturaleza del corpus de conocimiento de una ciencia en particular o de la forma en que se construyen conocimientos al interior de las ciencias, su validez y legitimidad.

Los antecedentes teóricos más notables que relacionan las disciplinas Geográficas y las Ciencias de la Salud se reconocen en la Antropogeografía de Frederick Ratzel (1948) y la Geografía Humana de Vidal de la Blache (1922).

Sin embargo, no es hasta que Maximilian Sorre incorpora los conceptos de género de vida, de ecúmene⁴ y complejos patógenos, interpretando las enfermedades y las muertes como tema o aspecto central de la Geografía o Ecología Humana, trazando primeros fundamentos de la Geografía Médica [16]; vigentes hasta hoy en día.

En este sentido los términos de Geografía Médica y Geografía de la Salud se conciben como *“Una antigua perspectiva y una nueva especialización”* [17], puesto que aportan el conocimiento geográfico, métodos y técnicas a la investigación en salud, en la perspectiva de la prevención de enfermedades [18].

De esta forma la importancia de la Geografía Médica, se concreta al constituirse en Lisboa la Comisión de Geografía Médica en 1949 y su posterior informe presentado en 1952 en aras de impulsar su desarrollo; Y no es hasta cuarenta años después, en el Congreso de la Unión Geográfica Internacional celebrado en Washington, que se modifica el nombre de esta Comisión por el de Ambiente-Salud y Desarrollo [19]

Por lo que la Geografía Médica o Geografía de la Salud, se divide en dos principales campos de investigación como los señalo Iñiguez, en 1998:

- La Nosogeografía o Geografía Médica tradicional, encargada de la identificación y análisis de patrones de distribución espacial de enfermedades; y
- La Geografía de la atención médica o de salud, ocupada en la distribución y planeamiento de componentes infraestructurales y de recursos humanos del Sistema de Atención Médica.

De esta forma se entrelazan las disciplinas Geográficas y las Ciencias de la Salud con miras al fortalecimiento de entender los procesos de salud-enfermedad, privilegiando al

⁴ Conjunto de la tierra habitada por la humanidad y la que es apta para ello.

espacio mediante la articulación del ¿Dónde?, ¿Cuándo?, ¿Quiénes? y ¿Con quién más?; fortaleciendo los principios básicos de la Geografía.

La primera cuestión metodológica que enfrenta esta dualidad en el conocimiento y la interpretación del proceso salud-enfermedad es la definición de las fuentes de información que permiten decidir las unidades y escalas de observación de los procesos, [19] ya que, las fuentes de información son el eje rector en los estudios de los procesos de salud-enfermedad.

Sin embargo es importante señalar que los cambios en el pensamiento de la Geografía Médica o de la Salud se ha ido robusteciendo en el paso de los años fortaleciendo sus orientaciones, bases epistemológicas y sustentos metodológicos; incluso, de acuerdo con Oropeza y Díaz; estos cambios se han modificado desde la descripción, pasando por análisis e interpretaciones teóricas hasta el empleo de modelos matemáticos y estadísticos, los cuales se enfrentan en la actualidad a una nueva realidad, el desarrollo tecnológico [21]; es decir la implementación de Geotecnologías al fortalecimiento de la toma de decisiones en materia de Salud Pública.

Dicho enfoque surge a partir de 1960 a 1990 con los denominados Sistemas de Información Geográfica (SIG), donde su función principal se basa en las relaciones de la información espacial de los objetos con los atributos temáticos de los mismos, lo que posibilita realizar análisis a través del procesamiento de datos con la finalidad de obtener mayor información, construir modelos cartográficos, simulaciones, tendencias y escenarios.

Lo cual se robustece con tendencias multidisciplinarias con las denominadas Tecnologías de la Información Geográfica (TIG); formadas por un conjunto de técnicas y métodos clásicos y modernos en torno a la Cartografía (lectura, interpretación y elaboración de mapas), Fotointerpretación, Teledetección y los SIG; así como los conceptos necesarios para interpretar o elaborar las expresiones gráficas del conocimiento espacial [21] en torno a problemas de la relación salud-enfermedad.

En este sentido los fenómenos ocurridos en el territorio y sus relaciones se describen en términos de espacio / tiempo; involucrando la propiedad geométrica de los fenómenos; ya que, se encuentran estrechamente ligada a los modelos conceptuales en el área de conocimiento espacial en este caso con la incorporación del paradigma Geográfico a los problemas de salud; mediante el uso y apropiación de las TIG a problemas sanitarios, como lo es el agente causal de la influenza tipo A ; ya que en años recientes metodológicamente han permitido soportar la captura, almacenamiento, recuperación, transformación, análisis, modelado y presentación de datos espaciales para la resolución de problemas de planificación y gestión del territorio y en este caso de problemas de Salud Pública.

Ya que en las problemáticas de salud asociadas al territorio existe un componente fundamental “El espacio geográfico”; donde *“El espacio es localizable, diferenciado y cambiante”* (Oliver Dolfus; 1983); además, según Milton Santos (1997) el espacio es una creación de la sociedad, que se sirve de él y lo interviene; y al incluir los conceptos de localización, distancia, movilidad y organización espacial; surge la noción del *Espacio Geográfico*, que parte de la premisa de *“identificar la naturaleza del espacio y encontrar las categorías de análisis que permitan estudiarlo”*; en este caso en la estimación de escenarios de riesgo en salud pública a consecuencia de la Influenza tipo “A” altamente patógena; donde un componente fundamental es la Epidemiología; la cual debe ser claramente usada como una guía primaria para las políticas sanitarias⁵ basadas en la prevención [22]

En este sentido el Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018; señala dos estrategias que puede fortalecer el enfoque de la Geointeligencia Sanitaria para identificar, prevenir y contrarrestar riesgos y amenazas de seguridad nacional como lo es la influenza tipo “A”; específicamente mediante la interconexión de bases de datos para el acceso legítimo a información (en este caso georeferidas o georreferenciadas), así como en la

⁵ La política sanitaria es la forma de gobierno mediante la cual se rige la sociedad, se regula, para la búsqueda del bien común en relación con la salud de los ciudadanos

identificación, prevención, desactivación y contención de riesgos y amenazas a la seguridad nacional [23].

La perspectiva que guía esta investigación se fundamenta en lo que señaló Buzai (2011); <<*Una nueva visión del espacio geográfico*>>; donde los modelos presentan un impacto en el modo de ver y comprender la realidad en el análisis espacial digital, lo que se puede considerar un nuevo paradigma denominado “la Geointeligencia” [24]; donde la Geografía como disciplina básica provee conceptos para el desarrollo Geo tecnológico y la geotecnología devuelve estos conceptos mediatizados a través de su tratamiento digital, para soportar la toma de decisiones, en este caso ante problemas remergentes de salud.

Es importante señalar que la base es el análisis espacial; el cual se centra en el estudio de manera separada de los componentes del espacio, definiendo sus elementos constitutivos y la manera como éstos se comportan bajo ciertas condiciones, mediante un conjunto de métodos y técnicas que buscan comprender la dinámica del espacio; ello con base en los principios básicos de la Geografía descritas a continuación:

- El principio de localización consiste en ubicar el lugar exacto de un hecho o fenómeno geográfico tomando en cuenta algunos aspectos espaciales como: latitud, longitud, altitud, límites, superficie; dicho principio fue postulado por Federico Ratzel (1844-1904); al considerar las relaciones existentes entre el espacio geográfico y la población, al relacionar la historia universal del ser humano con las leyes naturales en el denominado espacio vital.
- El principio de descripción consiste en dar a conocer las características de un hecho o fenómeno geográfico que queramos estudiar, involucrando tiempo, lugar y persona, y fue postulado por Vidal de la Blanche.
- El principio de comparación o analogía radica en establecer semejanzas y diferencias entre el hecho o fenómeno geográfico que estemos estudiando con otro que se ubica en otras latitudes del planeta; dicho principio fue desarrollado por Karl Von Ritter y Vidal de la Blanche, quienes propusieron el estudio geográfico

como una herramienta para establecer todo un conjunto de interrelaciones entre el medio físico y los seres vivos en el que habitan.

- El principio de causalidad fue formulado por Alexander Von Humboldt; explica los fenómenos buscando el porqué de las cosas, resaltando la conexión de fenómenos y que lo origina en relación con el espacio; se basa en la experimentación y utilizará un método empírico-inductivo, que parte de la experimentación de hechos concretos para terminar con fórmulas o principios generales lo que permite identificar el porqué de la ocurrencia de un hecho o fenómeno geográfico otorgando carácter científico a la Geografía.
- El principio de actividad fue propuesto por Jean Brunhes, el cual señala que todo se encuentra en constante transformación, teniendo como agentes transformadores al hombre o a la naturaleza.
- El principio de conexión o relación igual que el anterior fue propuesto por Jean Brunhes, el cual señala que todo hecho o fenómeno geográfico debe ser estudiado como un todo y no de forma aislada, es decir incorpora un enfoque integrador.

Cabe señalar que dichos principios se interrelacionan y asocian con los componentes básicos de la Epidemiología que de acuerdo con la OMS; soportan el estudio de la distribución y los determinantes de estados o eventos (en particular de enfermedades) relacionados con la salud y la aplicación de estudios al control de enfermedades y otros problemas de salud.

Es decir estudia los procesos de salud enfermedad; como fenómeno de grupo, con el objetivo de proporcionar datos sobre las decisiones a adoptar para la prevención o control de la enfermedad a partir de elementos como la frecuencia, distribución, incidencia y la prevalencia descritos a continuación:

- La frecuencia que se entiende como el número de repeticiones por unidad de tiempo del fenómeno que se estudia, es decir, el cada cuando ocurre el evento.

- La distribución, que se puede entender como el reparto de elementos en torno al problema; involucrando las cuestiones como: ¿Quiénes?, ¿Cuándo?, ¿Dónde?
- La incidencia, es el número de casos nuevos de una enfermedad en una población determinada y en un periodo determinado.
- La prevalencia se entiende como el número total de los individuos que presentan un atributo o enfermedad en un momento o durante un periodo dividido por la población en ese punto en el tiempo o en la mitad del periodo.

Es importante señalar que los determinantes sociales en salud son fundamentales en la metodología desarrollada, que de acuerdo con la OMS; son las circunstancias en que las personas nacen, crecen, viven, trabajan y envejecen, incluido el Sistema de Salud, ya que, esas circunstancias son el resultado de la distribución del dinero, el poder y los recursos a nivel mundial, que depende a su vez de las políticas de estado [25], en este caso identificando y seleccionando variables que de manera directa pueden incidir en el riesgo potencial de introducción establecimiento y dispersión del agente causal de la influenza tipo A en territorio nacional.

Ya que de acuerdo con la Organización Panamericana de la Salud (OPS); la buena salud no solo se basa en intervenciones médicas sino que involucra estilos de vida, influenciados por fuerzas sociales, económicas y políticas, que son fundamentales y determinantes en el proceso de salud-enfermedad [26].

De igual forma es pertinente resaltar que los resultados de la investigación contarán con un respaldo Geoestadístico, siendo base fundamental en el modelado espacial; ya que la Geoestadística es una rama de la Geografía Matemática que se centra en los conjuntos de datos de la superficie terrestre, conocidos o estimados en base a datos espaciales o espacio-temporales.

Por lo que mediante regresión geográficamente ponderada (RWG), y el índice de Moran se incorpora la base matemática de la estadística espacial, la cual es la reunión de un conjunto de metodologías apropiadas (de índole geoespacial) para el análisis de datos que corresponden a la medición de variables aleatorias en diversos sitios o áreas (es

decir agregaciones espaciales de sitios o *Clusters*) de una región determinada que puede representar un riesgo de establecimiento o dispersión del agente causal de la influenza tipo A en México.

De manera general se puede decir que la estadística espacial trata con el análisis de la relación, a través de un proceso estocástico $\{Z(\mathbf{s}) : \mathbf{s} \in D\}$, en el que $\mathbf{s} \in \mathbb{R}^d$ representa una ubicación en el espacio euclidiano dimensional, $Z(\mathbf{s})$ es una variable aleatoria en la ubicación \mathbf{s} y \mathbf{s} varía sobre un conjunto de índices $D \subset \mathbb{R}^d$ [38]

De acuerdo con Giraldo la aplicación de la Geoestadística es un campo emergente, sin embargo, existen innumerables ejemplos en los que se ha utilizado esta técnica en estudios ambientales con el ánimo de predecir fenómenos espaciales, prácticamente a partir del *boom* de los Sistemas de Información Geográfica en la década de los 90s del siglo pasado.

Donde la columna vertebral del análisis geoestadístico es la determinación de la estructura de Autocorrelación entre la base de datos espacial (BDE), y su uso en la predicción a través del modelado espacial con base en el diseño de la estimación de los escenarios de potencial probabilístico de introducción, establecimiento y dispersión del agente causal de la influenza tipo A, mediante la evaluación espacial multicriterio (EEMC).

10.1 Marco Legal y normativo

La vigilancia de las enfermedades, como se define en la XXI Asamblea Mundial de la Salud de 1968, es la "recopilación sistemática y el uso de información epidemiológica para la planificación, ejecución y evaluación del control de las enfermedades transmisibles"; por lo que se puede entender como el uso de la información para la acción (prevención).

En este sentido los sistemas de vigilancia de enfermedades están siendo utilizados por la OMS, los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades, y una serie de

dependencias nacionales, estatales y locales [27] como fortalecimiento a la toma de decisiones en materia de problemas emergentes y reemergentes de salud.

Inclusive la OMS y la OIE recomiendan que debe existir una coordinación intersectorial en el control de la enfermedad en sanidad animal como la primera medida para reducir el riesgo para el ser humano, por ello, es importante que las acciones de prevención y control, tanto en el sector animal como en salud humana, se lleven a cabo de manera coordinada y concertada, donde se establezcan y/o fortalezcan mecanismos ágiles de intercambio de información que faciliten la toma coordinada de decisiones con beneficios sanitarios [28].

Por lo que la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF), la OMS y la OIE en colaboración con el Banco Mundial y la Coordinación del Sistema de las Naciones Unidas para la Gripe (UNSIC) publicaron en 2008 un documento estratégico titulado: *Contributing to One World, One Health*; a strategic Framework for Reducing Risks of Infectious Diseases at the AnimalHuman-Ecosystems Interface* (Marco estratégico para reducir los riesgos de las enfermedades infecciosas en la interfaz entre animales, seres humanos y ecosistemas. Contribución a “Un mundo, una salud”; donde señala: *Los principios de Manhattan*; que reconocen el vínculo entre la salud humana, el animal doméstico y la vida silvestre, y la amenaza que representa la enfermedad para las personas, sus alimentos, economías y la biodiversidad esencial para mantener ambientes saludables y ecosistemas funcionales; en la denominada Medicina Global (que parte de los preceptos que no existen límites entre especies).

De esta forma legalmente la problemática abordada en esta investigación se sustenta en el Reglamento Sanitario Internacional (RSI) que es un instrumento jurídico internacional de carácter vinculante para 194 países, entre ellos todos los Estados Miembros de la OMS; el cual tiene por objeto ayudar a la comunidad internacional a prevenir y afrontar riesgos agudos de salud pública susceptibles de atravesar fronteras y amenazar a poblaciones de todo el mundo [29], como lo es el agente causal de la influenza tipo A.

El RSI, entró en vigor el 15 de junio de 2007, obliga a los países a reforzar sus medios actuales de vigilancia y respuesta sanitarias para poder detectar, notificar y controlar los eventos sanitarios; involucrando que todo riesgo en salud pública sea notificado en tiempo y forma [29], con la finalidad de hacer del mundo un lugar más seguro.

De igual forma a nivel nacional existe un sustento legal que fundamenta la presente investigación en el desarrollo y elaboración de la estimación de escenarios de riesgo del agente causal de la influenza tipo A; sustentada en Ley General de Salud en el Artículo 3º; Título Quinto; Capítulo II. Enfermedades Transmisibles, Artículo 134; así como en la Norma Oficial Mexicana NOM-017-SSA2-2012, Para la vigilancia epidemiológica, de igual forma en los lineamientos para la Vigilancia Epidemiológica de Influenza publicada por el Grupo Técnico Interinstitucional del Comité Nacional para la Vigilancia Epidemiológica (CONAVE-SINAVE); entre los aspectos que se retoma de lo antes citado se consideran como ejes rectores los siguientes:

- Consolidar las acciones de protección, promoción de la salud y prevención de enfermedades;
- Reducir los riesgos que afectan la salud de la población en cualquier actividad de su vida y
- Garantizar el control de emergencias en salud, desastres de seguridad en salud.

De esta forma el enfoque espacial - epidemiológico de la Geointeligencia Sanitaria, permite la integración, manejo, análisis y desarrollo de alternativas para fortalecer la toma de decisiones mediante la estimación de escenarios de potencial de introducción, establecimiento y dispersión del agente causal de la influenza tipo A en territorio nacional.

De acuerdo con la OMS los procesos de salud/enfermedad se pueden abordar a través de diferentes enfoques, como lo es la Geointeligencia Sanitaria; ya que la salud ambiental está relacionada con todos los factores físicos, químicos y biológicos externos de una persona, es decir, que engloba factores ambientales que podrían incidir en la salud; y se basa en la prevención de las enfermedades y en la creación de ambientes propicios para

la salud [30]; Y además la metodología desarrollada integra variables de índole antrópico que pueden potencializar la dispersión de la influenza tipo A en territorio nacional.

11. Metodología (materiales y métodos)

El componente metodológico de la presente investigación parte del sustento epistemológico de la Geografía y su análisis espacial, así como el aporte de la Epidemiología con el análisis de las poblaciones; como una búsqueda de alternativas preventivas a los problemas graves de salud como lo es la influenza tipo “A”; y se soporta con la visión y enfoque de la geointeligencia.

La geointeligencia es un concepto avalado por el Centro GEO (CONACYT) en (2015); el cual se refiere a la explotación y análisis avanzado de datos obtenidos por sistemas de colección de información geoespacial sobre características y eventos espacio temporales; con el objeto de localizar objetos y acontecimientos así como de discernir su significado bajo un enfoque transdisciplinario dirigido a los tomadores de decisiones [31].

En este sentido la metodología integra el concepto de «*Una sola salud*» introducido y desarrollado a comienzos de la década del año 2000, resumiendo en pocas palabras una noción conocida desde hace más de un siglo, a saber que la salud humana y la sanidad animal son interdependientes y están vinculadas a los ecosistemas en los cuales coexisten; e involucra un enfoque como un planteamiento colaborativo global para comprender los riesgos que deben afrontar la salud humana y la sanidad animal, respecto a los animales domésticos o silvestres, y los ecosistemas, haciendo uso de las normas intergubernamentales de la OMS; de la OIE y de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF); así como de bases de datos espaciales de índole antrópico, geofísico y epidemiológico, una visión transdisciplinaria considerando los componentes tiempo / lugar / persona[4].

De esta forma se robustece y enfoca el concepto Geointeligencia con miras hacia entenderse como un eje integrador que posibilita la capacidad de estimar escenarios de riesgo espacial y temporalmente de problemas de salud pública como lo es la influenza

tipo “A”; resultado la aquí denominada Geointeligencia Sanitaria, que permea la presente investigación.

11.1 Tipo de estudio

La presente investigación es un estudio ecológico cuantitativo a partir del uso de bases datos espaciales (geográficamente referidas), los cuales se consideran la base para la estimación de escenarios de riesgo de introducción, establecimiento y dispersión del agente causal de la influenza tipo A.

11.2 Diseño metodológico

Se trata de una investigación transversal; ya que en la estimación de escenarios de riesgo en la introducción, establecimiento y dispersión de la influenza tipo “A” en territorio nacional se basa en una sola medición de la variables georreferenciadas que mediante diferentes geoprocesos⁶ se estima el riesgo en salud pública; sin embargo es pertinente señalar que la metodología posee la bondad “temporal “que al existir nuevos datos se puede actualizar el modelado espacial y con ello existir una variación espaciotemporal de las zonas de riesgo.

11.3 Limites de espacio y tiempo

La presente investigación involucra tres escalas de resolución espacial, representadas por los modelos de introducción, establecimiento y dispersión de la influenza tipo A como un riesgo para la salud pública, descritos a continuación:

El potencial probabilístico de introducción involucra datos globales, un total de 1973 detecciones de influenza altamente patógenas, considerados datos oficiales avalados por la OIE y la OMS; además, el potencial probabilístico de establecimiento considera las áreas óptimas para que se establezcan este tipo de virus en territorio nacional y

⁶ Son operaciones que implican la manipulación de datos con componentes espaciales; caracterizado por elementos como: input (parámetros de entrada), procesamiento (simple o complejo) y output (parámetros de salida, habitamente en forma de capa de dato) es decir: Información + Herramientas= Nueva Información.

finalmente el potencial probabilístico de dispersión involucra los mecanismos de dispersión natural y antrópicos que pueden favorecer a la diseminación de las cepas de influenza tipo A de baja y alta patogenicidad en la República Mexicana.

Y en cuanto a los límites de tiempo se considera información oficial no más antigua al año 2015, ya que la finalidad es evidenciar el riesgo de la influenza altamente patógena a la salud pública, a partir de información actual.

11.4 Universo o población

El universo o población utilizada en la estimación de escenarios de riesgo de introducción, establecimiento y dispersión considera todas las detecciones oficiales de influenza altamente patógena en el mundo, y territorialmente involucró la superficie nacional.

11.5 Muestra

La metodología propuesta no incluye muestra determinada; ya que por la vocación de la Geointeligencia Sanitaria es necesario integrar el total de los datos disponibles para la estimación de escenarios de riesgo sanitario, en una base de datos espacial (BDE).

11.6 Criterios de estudio

La BDE se procesa, manipula y visualiza a través de los sistemas de computo ArcGIS-V10.1, QGI- V.2.18. y GeoDa-V.1.12 donde se realizan diferentes geoprosesos, que se entienden como una serie de análisis basados en el procesamiento de información geográfica, mediante un conjunto de herramientas y mecanismos que permiten la combinación y secuencia de operaciones mediante modelos espaciales [36].

Dichas operaciones involucran análisis de vecindad, conexión y auto correlación espacial de las variables y criterios que inciden en la estimación del riesgo en salud pública ante el agente causal de la influenza tipo “A” altamente patógena como un riesgo para la salud pública.

Donde el análisis de los datos se analiza con base en la primera ley Geográfica de Tobler (1970), que establece que *«Todas las cosas están relacionadas entre sí, pero las cosas más próximas en el espacio tienen una relación mayor que las distantes»*.

11.7. Variables

En la estimación de los escenarios de potencial probabilístico de introducción, establecimiento y dispersión del agente causal de la influenza tipo “A” altamente patógena, se incorporan e integran variables con estrecha relación epidemiológica a los procesos de salud enfermedad de este tipo de virus; donde resaltan elementos importantes como el área fuente de inóculo (área de posible dispersión hacia México), asociando los principios geográficos de ubicación, proximidad y conectividad; resaltando los criterios de frecuencia, distribución y determinantes que influyen en el potencial pandémico de la influenza.

De igual forma se incorporan variables como rutas de aves migratorias, áreas de conservación de aves (AICAS) caracterizado el riesgo natural; las unidades de producción avícola (UPA) que caracterizan el riesgo antrópico y el modelo de similitud climática que representa el riesgo ambiental; en la estimación del riesgo de establecimiento.

Así mismo se caracteriza el riesgo de dispersión en las modalidades de riesgo natural y antrópico, asociando espacialmente las variables de cuerpos de agua y el tránsito promedio diario anual, considerados los medios epidemiológicos que pueden facilitar la dispersión de cepas de este tipo de virus.

Las variables antes mencionadas se analizan mediante algunos geoprocesos como el análisis de redes (Network); a través del cual es posible resaltar la asociación de mecanismos de dispersión con origen / destino, en asociación con la evaluación espacial multicriterio EEMC; con variables que potencializan el riesgo en salud pública como la densidad poblacional y rutas vehicular lo cual será reflejado en las Áreas Geoestratégicas Básicas AGEBS [37]; lo cual se refleja y caracteriza en las siguientes tablas de operacionalización de variables, donde señala la escala de análisis según el escenario de introducción, establecimiento y dispersión:

Tabla 1. Operacionalización de variables implicadas en el modelo de potencial probabilístico de introducción (Ppi).

	Variables	Definición conceptual	Definición Operacional	Indicadores	Tipo	Unidad de medida	Rango de valores
Potencial de Introducción	Fuente de Inoculo	Se entiende como área o lugar de prevalencia de la Influenza altamente patógena.	Es la medición de los indicadores ambientales a partir de la localización precisa (latitud y longitud) de los sitios donde se ubican los casos positivos para su extrapolación espacial.	1 Temperatura media anual. 2 Rango de temperatura media diurna 3 Isotermalidad 4 Estacionalidad de temperatura 5 Temperatura máxima del mes más cálido. 6 Temperatura mínima del mes más frío. 7 Rango de temperatura anual 8 Temp media del trimestre más húmedo. 9 Temp media del trimestre más seco 10 Temp media del trimestre más cálido. 11 Temp media del trimestre más frío. 12 Precipitación anual. 13 Precipitación del mes más húmedo. 14 Precipitación del mes más seco. 15 Estacionalidad de precipitaciones 16 Precipitación del trimestre más húmedo. 17 Precipitación del trimestre más seco. 18 Precipitación del trimestre más cálido. 19 Precipitación del trimestre más frío.	Numéricos	La unidad de medición es el pixel de información (1km ² de resolución espacial) en format raster	Muestra valores de pixel que van de: 0.1 como valor más bajo al 0.9 como valor más alto
	Rutas de Aves migratorias	Son trayectorias que siguen las aves en su migración, que suelen ser anuales o estacional.	Es la medición de áreas de influencia de las trayectorias de Origen / Destino de aves migratorias	involucra 2 indicadores temporales: 1 de abril a agosto 2 de septiembre a marzo	Numéricos	La unidad de medición es el pixel de información (resolución en función del valor euclidiano)	Muestra valores de pixel que van de: 0.1 como valor más bajo al 0.9 como valor más alto

Tabla 2. Operacionalización de variables implicadas en el modelo de potencial probabilístico de establecimiento (Ppe).

	VARIABLES	Definición conceptual	Definición Operacional	Indicadores	Tipo	Unidad de medida	Rango de valores
Potencial de establecimiento	Fuente de inóculo						
	Rutas de aves migratorias						
	Potencial de introducción	Áreas de Importancia para la Conservación de Aves "AICAS"	Son áreas protegida determinada al que se le ha otorgado alguna medida de protección legal a fin de mantener o preservar sus valores, ya sean características o formaciones naturales, de patrimonio cultural o la biota.	Es la medición de entidades poligonales que dividen el espacio disponible y lo asignan a las entidades más cercanas, de cualquier tipo de ave migratoria	Se representan por mapa de calor para evidenciar la aglomeración de las mismas.	Numérico	La unidad de medición es el píxeles (resolución en función del valor euclidiano)
Unidades de Producción Avícola		Son establecimientos donde se producen, procesan, manejan, movilizan o comercializan aves de corral y los productos y subproductos derivados de las mismas.	Es la medición espacial de la aglomeración de unidades de producción; a través del modelo de densidad hotspot	Se representan por mapa de calor para evidenciar la aglomeración de las mismas.	Numérico	La unidad de medición es el pixel (resolución en función del valor euclidiano)	Muestra valores de pixel que van de: 0.1 como valor más bajo al 0.9 como valor más alto

Tabla 3. Operacionalización de variables implicadas en el modelo de potencial probabilístico de dispersión (Ppd).

	Variables	Definición conceptual	Definición Operacional	Indicadores	Tipo	Unidad de medida	Rango de valores	
Potencial de introducción	Fuente de inóculo							
	Rutas de aves migratorias							
	Áreas de Importancia para la Conservación de Aves "AICAS"							
	Unidades de Producción Avícola							
Potencial de establecimiento	Potencial de dispersión	Cuerpos de Agua	Son las extensiones de agua que se encuentran por la superficie terrestre tanto naturales como artificiales	Es la medición euclidiana de los cuerpos de agua, respecto a su ubicación espacial de determinados elementos.	Indicador de densidad "hotspot" o análisis de punto caliente	Numérico	La unidad de medición es el píxeles (resolución en función del valor euclidiano)	Muestra valores de pixel que van de: 0.1 como valor más bajo al 0.9 como valor más alto
		Rutas Vehiculares	Son un camino, vía o carretera que une diferentes lugares geográficos y que le permite a la personas desplazarse de un lugar a otro.	Es la medición del área de influencia del flujo vehicular	Indicador de densidad mediante el Modelo de trayectoria "line density"	Numérico	La unidad de medición es el píxeles (resolución en función del valor euclidiano)	Muestra valores de pixel que van de: 0.1 como valor más bajo al 0.9 como valor más alto
		Densidad Poblacional	Es una medida de distribución de población de un país o región, que es equivalente al número de habitantes dividido entre el área donde habitan. Indica el número de personas que viven en cada unidad de superficie.	Es la medición de la densidad poblacional	Indicador de densidad mediante "hotspot" o análisis de punto caliente	Numérico	la unidad de medición son píxeles habitantes /km ²	Muestra valores de pixel que van de: 0.1 como valor más bajo al 0.9 como valor más alto

11.8 Instrumento

Por la naturaleza de la presente investigación no se elaboran instrumentos para la recolección de información; sin embargo se elabora una base de datos espacial (BDE), que se puede entender como es un sistema administrador de bases de datos que maneja datos existentes en un espacio con características espaciales, es decir, involucra datos de latitud, longitud y altitud (Georeferencia).

De acuerdo con el *Environmental Systems Research Institute* (ESRI 2015); una BDE se puede entender como una colección de datos organizados de tal manera que sirvan para una o varias aplicaciones en el entorno de los Sistemas de Información Geográfica; involucrando la asociación de dos componentes principales: datos espaciales (ubicación geográfica) y atributos o datos no espaciales (características de un hecho o fenómeno geográfico); en este caso basados en la epidemiología del agente causal de influenza tipo A altamente patógena.

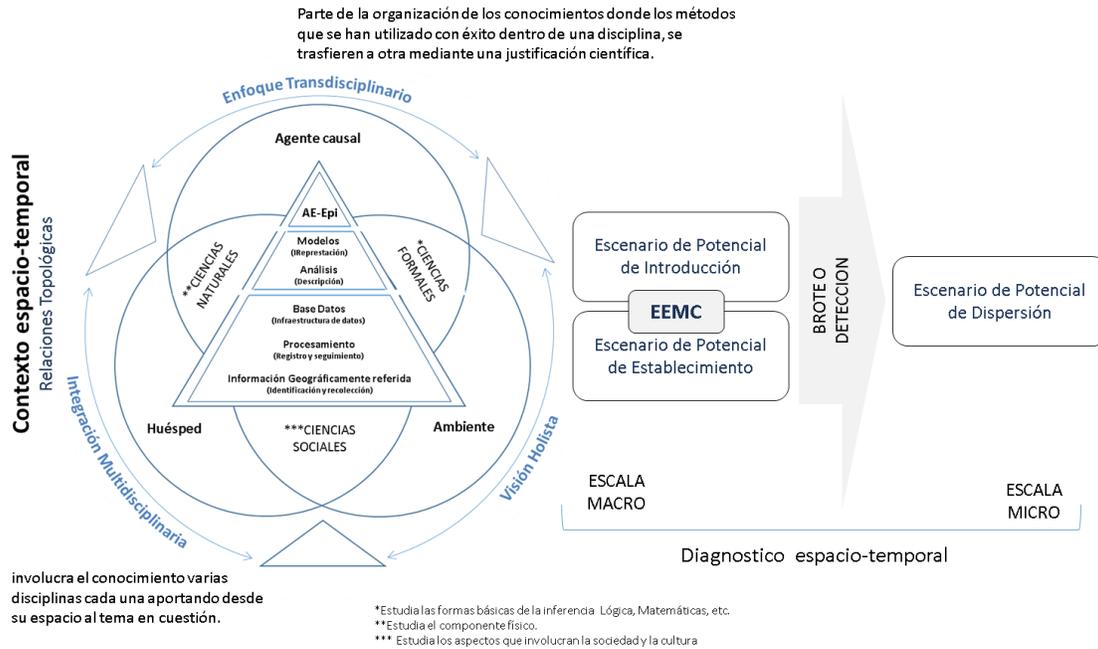
11.9 Procedimientos

Los principales procedimientos de la investigación se centran en el análisis espacial y se desarrollan mediante la evaluación espacial multicriterio (EEMC); la cual se basa en la ponderación y compensación de variables que van a influir de manera positiva (aptitud) o negativa (impacto) sobre la actividad objeto de decisión y que deben ser clasificada y jerarquizada previamente según Molero (2007).

La EEMC involucra el componente espacial dentro su proceso de análisis, esto significa la presencia de datos con valores geográficos y cartográficos; y se entiende como un proceso que combina y procesa datos geográficos (entrada) para obtener una evaluación de los datos geográficos respecto a un problema de decisión (salida); señalado por Chuvieco; (1994).

En este caso bajo la visión integradora de Geointeligencia Sanitaria con sus fundamentos transdisciplinarios y multidisciplinarios reflejados en el siguiente diagrama:

Figura 1.- Diseño Conceptual de la metodología desarrollada.



Fuente: Elaboración Propia tomando como base la Centro Geo-CONACYT 2015.

Los procedimientos realizados en la presente investigación se desarrollaron en tres etapas correspondientes a la estimación de los escenarios de introducción, establecimiento y dispersión del agente causal de la influenza tipo A como un riesgo a la salud pública en México, los cuales son descritos a continuación:

11.9.1 Potencial Probabilístico de Introducción “Ppi”

Se consideró la primera etapa e involucró la recolección de información en escala global, a partir de la obtención de información “datos” de las detecciones de casos positivos de influenza tipo A; Cabe señalar que son datos oficiales de la OMS y la OIE; que se encuentran respaldados por laboratorios oficiales con un diagnóstico positivos; dicha información se obtiene de las páginas web <http://apps.who.int/gho/data/?theme=main> y <http://www.oie.int/es/sanidad-animal-en-el-mundo/web-portal-sobre-la-influenza-aviar/>

Esta información contiene datos vitales para analizar mediante el enfoque de la Geointeligencia Sanitaria entre los que se destaca: latitud, longitud, identificador, fecha de detección del caso, serotipo, estatus, país entre otros.

Una vez obtenida la información prosiguió un proceso de homologación de datos de ambas fuentes oficiales (OMS, OIE); y se obtuvo una base de datos espacial única (BDE); para identificar, manejar y procesar datos reflejados en el territorio; ya que es información georeferenciada, se consideró insumo vital en la metodología desarrollada para identificar la fuente de inóculo a través del algoritmo de Máxima Entropía, en la caracterización del área fuente de inóculo.

Dicho algoritmo permitió identificar las áreas que cuentan con características ambientales semejantes a los sitios donde se identificaron los casos positivos en todo el mundo entre 2015 y 2016, los cuales se reflejaron mediante una cobertura espacial (geográficamente referida); tomando como referencia los indicadores ambientales de Bioclim (2016). <http://www.worldclim.org/bioclim>

El algoritmo de Máxima Entropía utiliza una técnica que combina estadística y métodos bayesianos, cuyo propósito es estimar distribuciones de probabilidad a partir de la información ambiental [39], a través de los indicadores bioclimáticos de los cuales derivan de los valores mensuales de temperatura y precipitación con el fin de generar los indicadores significativos.

Cabe señalar que el modelado de Máxima Entropía empleado en el “Ppi” es respaldado por evidencias científicas e integradas por la Geointeligencia Sanitaria mediante la EEMC, ya que este modelado ha sido utilizado ante problemas semejantes como lo reflejan estudios publicados por *Xu, Cao, Wang y Kan (2016) en Identifying environmental risk factors of cholera in a coastal area with geospatial technologies* [32]; donde se aplica el algoritmo de Máxima Entropía en la delimitación de las áreas óptimas para el cólera en China; considerando las detecciones precisas y los 19 indicadores ambientales, soportando la toma de decisiones en la vigilancia epidemiológica del Cólera en dicho país.

De igual forma existe un respaldo científico señalado por *Skog et al., (2014) en Spatiotemporal characteristics of pandemic influenza* [33], en donde se identifican los patrones espacio temporales de la gripe pandémica con base en las variables climáticas del algoritmo de Máxima Entropía en la caracterización el periodo epidémico de la influenza altamente patógena en Suecia.

Los indicadores bioclimáticos de Bioclim son un conjunto de base de datos global de información ambiental en formato raster (una retícula de información para cada indicador), son coberturas con una resolución espacial de 1 km²; las cuales se definen por su abreviatura y se denomina de la siguiente forma:

1. TMA Temperatura media anual.
2. RTM Rango de temperatura media diurna (media mensual de (Temperatura. Máxima - Temperatura. Mínima)).
3. ISO Isotermalidad (RTM/RTA)*100.
4. EST Estacionalidad de temperatura (desviación estándar *100).
5. TMC Temperatura máxima del mes más cálido.
6. TMF Temperatura mínima del mes más frío.
7. RTA Rango de temperatura anual (TMC-TMF).
8. TCH Temperatura media del trimestre más húmedo.
9. TCS Temperatura media del trimestre más seco.
10. TCC Temperatura media del trimestre más cálido.
11. TCF Temperatura media del trimestre más frío.
12. PPA Precipitación anual.
13. PMH Precipitación del mes más húmedo.
14. PMS Precipitación del mes más seco.
15. ESP Estacionalidad de precipitaciones (coeficiente de variación).
16. PCH Precipitación del trimestre más húmedo.
17. PCS Precipitación del trimestre más seco.
18. PCC Precipitación del trimestre más cálido.
19. PCF Precipitación del trimestre más frío.

Sin embargo, para robustecer el Ppi es pertinente incorporar mediante los principios geográficos de relación y conectividad; la variable de rutas intercontinentales de aves migratorias, ya que de acuerdo con fuentes científicas las aves migratorias juegan un papel importante en la dispersión de la influenza de baja y alta patogenicidad.

Por lo que se integró de la variable de rutas de aves migratorias, según la investigación realizada en el Laboratorio de Ornitología de Cornell en Alemania, realizada por *Kranstauber et al., (2016) Global aerial flyways allow efficient travelling* [6]; estudio que evidencia el comportamiento estacional de aves migratorias en América, donde además, recomienda sus resultados como insumo en el análisis de riesgo en la dispersión de la influenza de baja y alta patogenicidad.

En dicha investigación se estima las rutas y los nodos de origen- destino de las aves migratorias con potencial de dispersar los virus de influenza tipo “A” con una definición espacial y temporal, evidenciando tres indicadores temporales los cuales serán la referencia temporal del comportamiento del Ppi de agente causal de la influenza en periodos de tiempo claramente definidos:

1. Septiembre / Marzo.
2. Abril / Agosto.

Por lo anterior, se asocian topológicamente las variables que definen el Ppi; involucrando área de fuente de Inoculo y rutas de aves migratorias, sin embargo, es pertinente señalar que aunque se trate de un modelo de similitud climática global, solo se considera las superficies terrestres próximas al país, debido a que geográficamente es el área más próxima que representa un riesgo latente para territorio nacional.

Para robustecer el ¿Por qué?; el territorio más cercano al país se considera la fuente de inoculo y no otra porción del continente u otra región del mundo, es porque en años recientes se han presentado detecciones prevalentes en este territorio como lo señala *Malik y Abdalla (2016) en Mapping the impact of air travelers on the pandemic spread of (H1N1) influenza*, donde señalaron que durante 2009 se presentaron 204 decesos de personas a consecuencia de cepas de influenza

altamente patógenas del virus H1N1, con muertes humanas en los siguientes estados y las muertes ocurridas en cada uno de ellos: Arizona (4), California (76), Connecticut (7), Florida (14), Illinois (13), Maryland (3), Massachusetts (6), Michigan (7), Minnesota (3), Nevada (3), New Jersey (16), New York (29), Pennsylvania (4), Texas (10), Washington (4) y Wisconsin (5) [42].

Cabe señalar que el resultado de Ppi se refleja en coberturas debidamente jerarquizadas en su definición mediante un índice de potencial de introducción con valores que van de 0.1 a 0.9; y su representación espacial.

11.9.2 Potencial Probabilístico de establecimiento “Ppe”.

Esta segunda etapa de la investigación involucró las coberturas resultantes del Ppi, debido a que este modelado estimó las áreas susceptibles a la introducción de cepas de baja y alta incidencia patógena en virtud de la epidemiología o comportamiento de la influenza tipo A.

Además, en complemento para estimar el Ppe se consideró el modelado de Máxima entropía o similitud climática en escala nacional, caracterizado como el riesgo ambiental que favorece el establecimiento de este tipo de virus; debido a que existen algunas publicación que señalan determinante la persistencia viral en el medio ambiente los cuales se han llevado a cabo en climas meridionales fríos [40].

Así mismo se integran las variables que representan el riesgo natural y el riesgo antrópico, caracterizados por las áreas de conservación de aves y las unidades de producción avícola respectivamente; debido a que existen referencias científicas que evidencia la importancia de estas variables en la caracterización del riesgo de establecimiento de este tipo virus, ya que:

- Los virus de la influenza tipo A altamente patógena pueden sobrevivir en los fómites o excremento de aves por lo menos 35 días a 4° C.
- Los virus influenza altamente patógena pueden sobrevivir en el ambiente de una planta avícola hasta 5 semanas (Webster et al 1978 en FAO 2016).

- Los virus pueden permanecer infectivos en aguas de lagos hasta 4 días a 22° C y más de 30 días a 0° C (Webster et al 1978 en FAO 2016).
- Los virus influenza aviar pueden ser aislados de aguas de lagos en donde las aves acuáticas están presentes (Hinshaw et al 1979 en FAO 2016).

Por otro lado, es conveniente resaltar el Ppe se sustenta científicamente porque, existe una preocupación mundial por el dinamismo en la recombinación de este tipo de virus (por mutación de serotipos); ya que, puede derivar en que se produzca un nuevo virus de fácil transmisión entre las personas, capaz de enfermar a las personas, las aves y otros animales, con un alto potencial pandémico; además que los virus de la gripe tipo A están presentes en todo el mundo en una gran variedad de hospederos incluido el ser humano [41].

De esta forma los procesos metodológicos que sustentan la estimación en el Ppe se abordan mediante la lógica booleana y el álgebra de mapas; que analizan, jerarquizan y dan una respuesta de salida espacial de las variables que caracterizan el riesgo de establecimiento, con base en las premisas geográfica de ubicación y conectividad a través de relaciones topológicas de las variables antes descritas.

El Ppe se considera el modelo cartográfico de riesgo en salud pública en escala regional (nacional) involucra el “Ppi” en la definición y creación de escenarios de las áreas con aptitud al establecimiento del agente causal de la Influenza tipo “A” en territorio nacional considerando los factores antrópicos, geofísicos y epidemiológicos.

Este modelo de “Ppe” se sustenta en algunas investigaciones científicas como lo reaalizada por *Zhang, Shen, Ma, Jiang, Feng y Shankar (2015) en su publicación; Cluster of human infections with avian influenza A (H7N9) cases: a temporal and spatial analysis* [34] donde analiza los Clúster o aglomeración de sitios donde se presentaron infecciones humanas con casos de influenza aviar altamente patógena H7N9 considerando el análisis espacial como método de análisis de riesgo.

De igual forma se consideró la publicación de *Fang et al., (2013) Mapping Spread and Risk of Avian Influenza A (H7N9) in China*, [35] donde demostró datos

importantes del riesgo antrópico de focos de influenza altamente patógena en China, señalando que los mercados de aves de corral vivos, la densidad de población humana, los cultivos de riego, las áreas urbanas, la humedad relativa y la temperatura contribuyen significativamente a la aparición de infección humana con el virus H7N9.

De igual forma se toman consideraciones para abordar la problemática semejante a la investigación de *Belkhiria et al.*, 2016; *Application of Species Distribution Modeling for Avian Influenza surveillance in the United States considering the North America Migratory Flyways*, en la que propone utilizar mapas de idoneidad para la influenza aviar de baja patogenicidad para identificar áreas con alto riesgo de brotes de influenza altamente patógena.

Lo cual evidencia y sustenta el uso y agregación de variables de diferente índole en la estimación de los escenarios de riesgo ante la influenza altamente patógena a partir de un enfoque espacial.

11.9.3 Potencial probabilístico de dispersión “Ppd”

Finalmente se desarrolla el potencial probabilístico de dispersión que se considera la escala local e involucra la cobertura resultante delimitadas por el “Ppe”; que se integran en la estimación de las áreas de riesgo de dispersión en territorio nacional, es decir, evidencia de manera espacial y temporal las áreas en riesgo de dispersión considerando las variables como: riesgo natural (sitios de paso y alimento de aves migratorias) y el riesgo antrópica (las vías de comunicación y la densidad poblacional).

En la caracterización del riesgo natural se consideran los cuerpos de agua naturales (ríos y lagos), debido a que se pueden considerar importantes en la dispersión de la influenza de baja y alta patogenicidad; ya que son el destino de aves migratorias de Canadá, Estados Unidos y Centro América; de acuerdo con la FAO (2016); La migración de las aves acuáticas, (origen/destino) representa el mayor riesgo de transporte del virus de la influenza tipo “A”; ya que territorialmente se pueden

entender como una compleja red de movilización de nodos de origen destino debido a que las diferentes rutas se superponen geográficamente [40].

Además existen reportes de la FAO (2016); que señalan que un componente importante ante la prevención de una epidemia de Influenza tipo “A” es la identificación de los patrones migratorios, épocas y lugares de origen destino de las aves migratorias; lo cual se desarrollaron previamente en la estimación del Ppi y el Ppe.

Por lo que en esta etapa se complementa con la evaluación del riesgo considerando que el contacto estrecho entre aves migratorias y las aves de corral que permiten potencializar un punto de ingreso para este patógeno [40], lo cual se puede cuantificar con la integración de la cobertura de densidad poblacional y sus relaciones topológicas con el resto de las variables y mediante la asociación espacial de las variables que potencializan la posible dispersión de estos virus.

Lo anterior se realizará a través del Algebra de mapas mediante la inclusión o exclusión y asignación de pesos a las variables e indicadores que potencializan el riesgo de establecimiento y dispersión de virus este tipo de virus.

Robusteciendo esta asociación espacial la FAO (2016) señala que si la infección se produce en aves de corral, es probable que ocurra en áreas en donde se congregan aves acuáticas silvestres y en donde las aves de corral no son mantenidas en gallineros que las aíslen de ellas, de igual forma señala que la transmisión del virus se puede producir por agua contaminadas o a través del contacto directo entre aves silvestres y las aves de corral [40].

En este sentido es conveniente resaltar que de acuerdo con la FAO (2016); La sobrevivencia de los virus de influenza se prolonga en aerosoles con una baja humedad relativa y baja temperatura, mientras que las bajas temperaturas y los altos niveles de humedad prolongan su sobrevivencia en el excremento o fómites de las aves migratorias.

Cabe señalar que toda la información utilizada en esta investigación es de dominio público y respaldado por las instituciones que la administran, y a su vez es utilizada

y sustentada en evidencias científicas presentadas en diferentes artículos realizados en el mundo acerca de temas epidemiológicos, espaciales y de salud pública en torno al riesgo inminente que representan los virus de influenza tipo A.

11.9.4 Análisis estadístico.

Cabe señalar que la estimación de escenarios de Ppi, Ppe y Ppd, incorporaron un modelado robusto que integró el componente espacial, el componente epidemiológico y un sustento estadístico; ya que los modelos estadísticos tradicionales pueden mostrar problemas de especificación cuando no consideran la presencia de autocorrelación espacial en los datos [54].

Se obtienen tres escenarios de Ppi, Ppe y Ppd del agente causal de la influenza tipo A en México, considerados variables dependientes para realizar las regresiones geográficamente ponderadas (GWR); y como variable exploratoria se considera la densidad poblacional bajo el supuesto que los virus de influenza tipo A pueden afectar a cualquier persona; sin embargo existen grupos vulnerables para desarrollar complicaciones por influenza: los niños menores de 5 años, adultos mayores y mujeres embarazadas; además grupos étnicos parecen tener un riesgo más alto de presentar complicaciones por la influenza [52].

Caber señalar que se estimaron la GWR y el cálculo del índice de Moran; porque consideran explícitamente el componente espacial de los datos, incorporando en su ecuación el valor de la geoposición; debido a que tienen ventajas importantes que justifican su empleo [54]; en estudios de salud por ejemplo:

- a) Este modelado permite moverse desde una perspectiva global a un análisis local del problema (de lo general a lo particular), obteniendo un mayor grado de detalle y precisión (Lloyd, 2010).
- b) Permiten la posibilidad de estimar coeficientes de determinación locales para cada unidad espacial a partir de los valores de un conjunto de observaciones vecinas, permite conocer la forma en que se combinan localmente las variables de

la regresión para obtener el “ajuste específico” en una localización (Fotheringham *et al.*, 2002). Ppe/densidad poblacional y Ppd/ densidad poblacional.

c) Facilita explorar la estructura espacial del modelo, es decir, medir el grado de dependencia espacial presente en el modelo pudiendo ser positiva o negativa, o detectar clústers (Anselin, 1988), de riesgo de establecimiento y dispersión de virus tipo A en México.

d) Al proveer resultados específicos para cada localización, éstos pueden ser usados como evidencias para apoyar políticas públicas o toma de decisiones en materia sanitaria (incluyendo la salud pública y la sanidad animal); por eso con frecuencia estas técnicas son de índole geoespacial “basadas en el lugar”.

Por lo que de manera general la incorporación de técnicas de estadística espacial (GWR e índice de Moran) en análisis de lugar/ tiempo/ persona o problemas de salud pública, como en los modelos de predicción el Ppe y Ppd supone claras ventajas sobre el empleo de métodos estadísticos tradicionales [54]; ya que, incorporar el componente espacial para fortalecer la toma de decisiones en materia de salud pública; además la GWR que permite identificar la heterogeneidad y variación espacial de las variables [55]; en la estimación de escenarios de riesgo potencial de establecimiento y dispersión de virus tipo A en México.

Sin embargo hay que tener en cuenta que estos modelos pretenden crear una representación idealizada de la realidad a fin de destacar algunas de sus propiedades [56]; además hay que recordar que “los modelos no transmiten toda la verdad sino sólo una parte útil y comprensible de la misma” [57],[55]; representada y sustentada técnica y científicamente.

Además, el sustento estadístico se basa en el Análisis Exploratorio de Datos Espaciales, lo cual se define como una colección de técnicas que permiten describir y visualizar distribuciones espaciales, identificar lugares o valores atípicos y describir patrones de asociación e interacción espacial [58].

12. Consideraciones éticas y legales.

La presente investigación busca coadyuvar en la toma de decisiones en materia de prevención a consecuencia de la influenza altamente patógena en territorio nacional, evidenciando epidemiológica, espacial y temporalmente las áreas que poseen mayor riesgo en tres vertientes la posible introducción, establecimiento y dispersión de la misma.

En este sentido el Reglamento Sanitario Internacional (RSI) señala en el Título II “*Información y Respuesta de Salud Pública*” en el Artículo 5 y tema Vigilancia señala: Que cada Estado desarrollará, reforzará y mantendrá, la capacidad de detectar, evaluar eventos de riesgo para salud pública asociado a enfermedades reemergentes como la influenza tipo A altamente patógena.

De igual forma el RSI en el Artículo 12 para la “*Determinación de una emergencia de salud pública de importancia internacional*”; señala que se debe considerar: los principios científicos así como las pruebas científicas disponibles y otras informaciones pertinentes; para evidencia el riesgo que esta representa, en este caso la influenza altamente patógena.

E inclusive en el Marco de Preparación para una Gripe Pandémica de la OMS en el apartado de Capacidad de vigilancia de la gripe 6.6.1, señala que se debe implementar la participación en la evaluación del riesgo de pandemia y la respuesta; así como desarrollo de la capacidad de investigación en relación con la gripe de alta patogenicidad.

En el ámbito nacional el Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Investigación para la Salud en el Título Primero, Artículo 3 inciso III señala que la investigación para la salud comprende el desarrollo de acciones que contribuyan a la prevención y control de los problemas de salud; de igual forma en el inciso IV señala que se debe integrar el conocimiento y evaluación de los efectos nocivos del ambiente en la salud.

De igual manera en el Título sexto; apartado Información para la Salud Capítulo único Artículo 104. Señala que “La Secretaría de Salud y los gobiernos de las entidades federativas, en el ámbito de sus respectivas competencias, y de conformidad con la Ley de Información Estadística y Geográfica y con los criterios de carácter general que emita la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, captarán, producirán y procesarán la información necesaria sobre el estado y evolución de la salud pública. La información se referirá, fundamentalmente, a los siguientes aspectos: I. Estadísticas de natalidad, mortalidad, morbilidad e invalidez; y los II. Factores demográficos, económicos, sociales y ambientales vinculados a la salud, en este caso a la influenza tipo “A” altamente patógena.

13. Resultados.

El modelo cartográfico sanitario en el potencial probabilístico de introducción (Ppi), establecimiento (Ppe) y dispersión (Ppd) estima la posibilidad de introducción, establecimiento y dispersión de un agente patógeno (de interés para la salud pública), a un área geográfica o territorio determinado mediante la correlación de elementos como la biología del patógeno, las condiciones óptimas, los mecanismos de dispersión así como factores naturales o antrópicos que favorecen su movilidad de hacia nuevos territorios; como en este caso el agente causal de influenza tipo A, el cual posee la capacidad de recombinarse en hasta 144 posibles cepas de influenza de baja patogenicidad e influenza de alta patogenicidad; que puede afectar al ser humano [9].

En primera instancia se realizó la representación espacial de las detecciones ocurridas de influenza altamente patógena en el periodo de estudio; con un total de 1,973 detecciones; las cuales se asocian e interrelacionan bajo la perspectiva del análisis exploratorio de datos espaciales resaltando el principio geográfico de localización en relación directa con los principios epidemiológicos de distribución y frecuencia, ya que, de acuerdo con referencias científicas se debe considerar todas las detecciones ocurridas en el periodo de estudio así como todos los subtipos aislados [41].

Para de esta forma obtener el modelo de conexidad de los sitios de detecciones basados en métodos geoespaciales para estimar las medidas de tendencia central y las medidas de varianza, las cuales permiten delimitar territorialmente superficies a través de la denominada área de influencia [41]; que geoestadísticamente se representan a través un nodo de interés (México) y nodos de origen (todas las detecciones); representado bajo la siguiente formula:

$$Dg = (((\sum((dni/nO1)+(dni/nO2)+(dni/nO3)+\dots+\dots+(dni/nO1972)+(dni/nO1973))+((dnO1/nO1)+(dnO1/nO2)+(dnO1/nO3)+\dots+\dots+(dnO1/nO1972)+(dnO1/nO1973))+((dnO1973/nO1)+(dnO1973/nO2)+(dnO1973/nO3)+\dots+\dots+(dnO1973/nO1972)+(dnO1973/nO1973)/N))/N))). \text{ Donde;}$$

Dg: Distancia general

d: Distancia

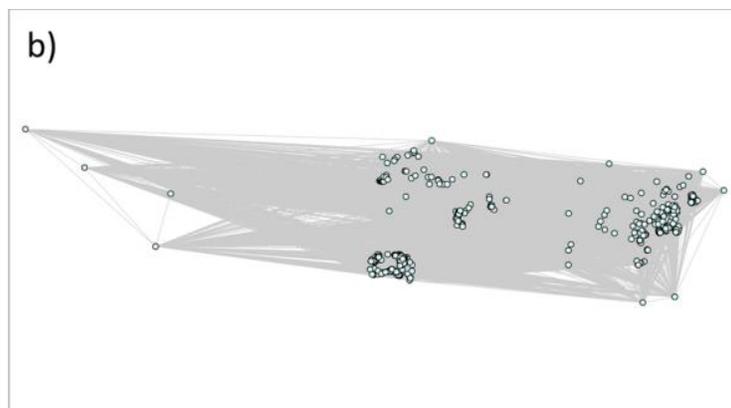
ni: Nodo de interés

nO: Nodo de origen

N: número total de detecciones

Figura 2.- Visualización del modelo de conexidad en la estimación de las isócronas de riesgo sanitario en el potencial probabilístico de introducción de la IAP en México





a) Visualización espacial de los nodos de interés: 1,973 ubicaciones en el periodo 2014-2015 las cuales son representadas mediante los valores de latitud y longitud.

b) Asociación espacial entre los nodos de interés, representado en 3, 2014,849 isocronas que permiten determinar las Isócronas de Riesgo Sanitario (Is-RS) en el Ppi.

Mediante la geoestadística, se permite describir la continuidad espacial de cualquier fenómeno territorial; por lo que utiliza funciones para modelar la variación espacial y con ello interpolar en el espacio en el valor de la variable en sitios no muestreados. [42][43] denominado espacio euclidiano.

Cabe señalar determinación de las Isócronas de Riesgo Sanitario (Is-RS) se basa en los principios geográficos de asociación espacial y relaciones topológicas; las cuales representan estadísticamente las distancias entre las detecciones de influenza que fungen como nodos de riesgo en un contexto espacial; es decir, la incidencia y frecuencia de las detecciones las cuales se asocian a la ubicación espacial de sitios con presencia de la enfermedad, con la finalidad de identificar las áreas territorialmente definidas como fuente de inóculo.

De esta forma se obtiene la representación de las Is-RS tomando como base la técnica de estadística clásica de análisis de la relación (varianza: media) [61]; con crecimiento exponencial; por lo que mediante el software QGIS se calculan los valores de medida de tendencia central (media: 6,825 km), y el valor de varianza

(desviación estándar: 6,277 km); a través de los cuales se estima la Is-RS, mediante la siguiente formula:

$$Is-RS = (d \text{ med} - \text{desvest})^x \text{ donde:}$$

Is-RS: Isócronas de Riesgo Sanitario

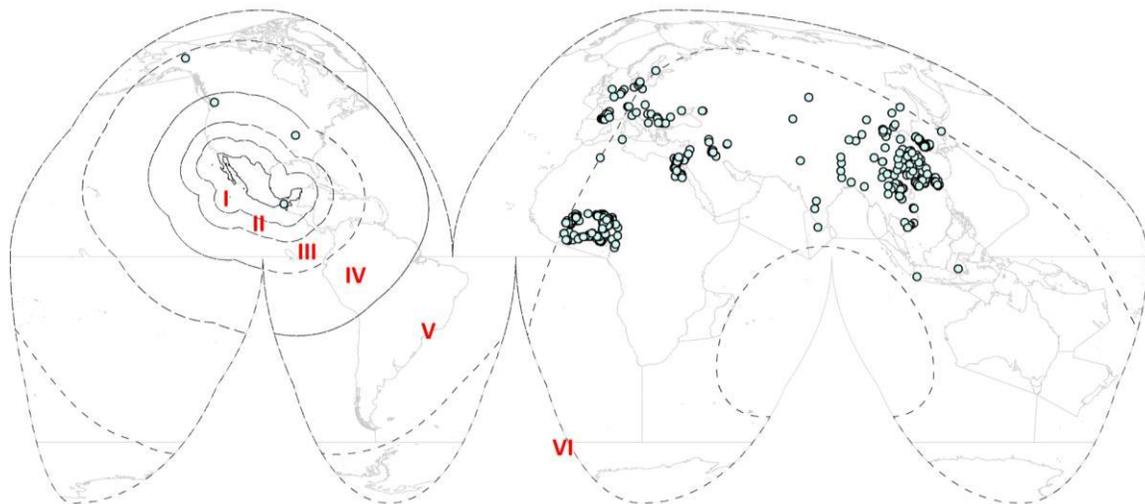
d med: Distancia Media

desvest: Desviación estándar

x: Crecimiento exponencial

Obteniendo como resultado con una distancia inicial estimada de 548 km y su crecimiento exponencial, es decir las Is-RS para la influenza, representada por una red de conectividad de entre los nodos de interés; lo que establece una distancia media ponderada como una imaginaria referencial mediante el cálculo de la estadística clásica de análisis de la relación, como se muestra a continuación.

Figura 3.- Isócronas de Riesgo Sanitario en el Potencial Probabilístico de Introducción de la influenza altamente patógena 2015-2016.



Fuente: Elaboración propia con datos de la Organización Mundial de la Salud OMS y World Organization for Animal Health OIE.

Como resultado del modelado se obtienen 6 Is-RS en una escala global, sin embargo aludiendo al principio geográfico de proximidad bajo la primera ley de Tobler o principio de autocorrelación que señala que “Todas las cosas están relacionadas entre sí, pero las cosas más próximas en el espacio tienen una relación mayor que las distantes”; se determina como área fuente de inóculo únicamente las primeras cuatro Is-RS, como el primer componente en la estimación del Ppi de la influenza en México; en decir territorialmente se identifica un área de influencia de 2,192 km (Figura 3).

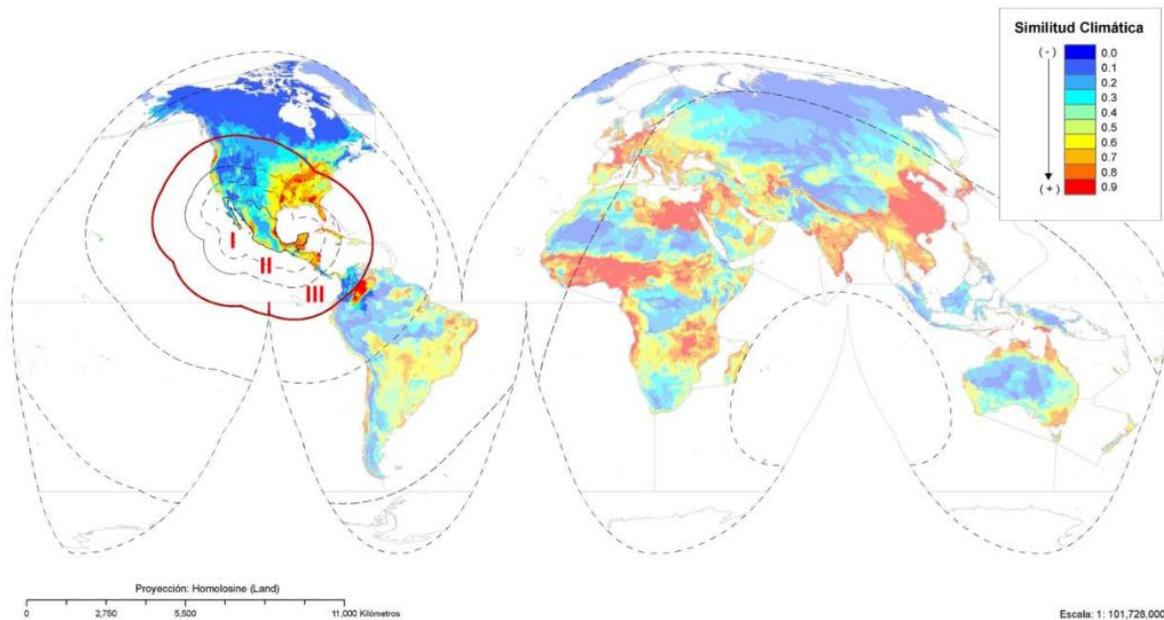
En complemento de la estimación del área denominada fuente de inóculo se trabajó con el modelo de nicho ecológico a través del algoritmo de máxima entropía; para entender la ecología viral del agente causal de la influenza tipo A [3]; Ya que de acuerdo con diferentes autores [45] [60] es un algoritmo que permite evidenciar espacialmente las áreas o superficies que poseen condiciones ambientales semejantes a donde se han realizado las detecciones de influenza tipo A.

Este modelado permitió predecir la idoneidad del medio ambiente para la especie como una función de las variables ambientales y se puede entender como una medida de similitud de los ambientes en cada pixel o área respecto a los pixeles o áreas donde la especie ha sido detectada la influenza tipo A.

Por lo que ello se considera como una aproximación a la distribución potencial de la influenza tipo A, y estadísticamente considera un método para la evaluación de errores de predicción en modelos de presencia / ausencia, con base en el análisis del área bajo la curva o análisis ROC a través de la correlación de 21 variables ambientales (Bioclim) en la definición de las áreas de confort el agente causal de la influenza tipo A.

Lo anterior se sustenta técnica y científicamente debido a que de acuerdo con investigaciones globales el modelo Maxent es un algoritmo el cual posee gran efectividad en estimar áreas semejantes ambientalmente hablando; e incluso ha sido de gran utilidad en la estimación de escenarios de nicho ecológico de diferentes especies e incluso de influenza de alta patogenicidad, en el sureste asiático [39] [32].

**Figura 4.- Modelo de máxima entropía de la influenza altamente patógena
2015-2016**

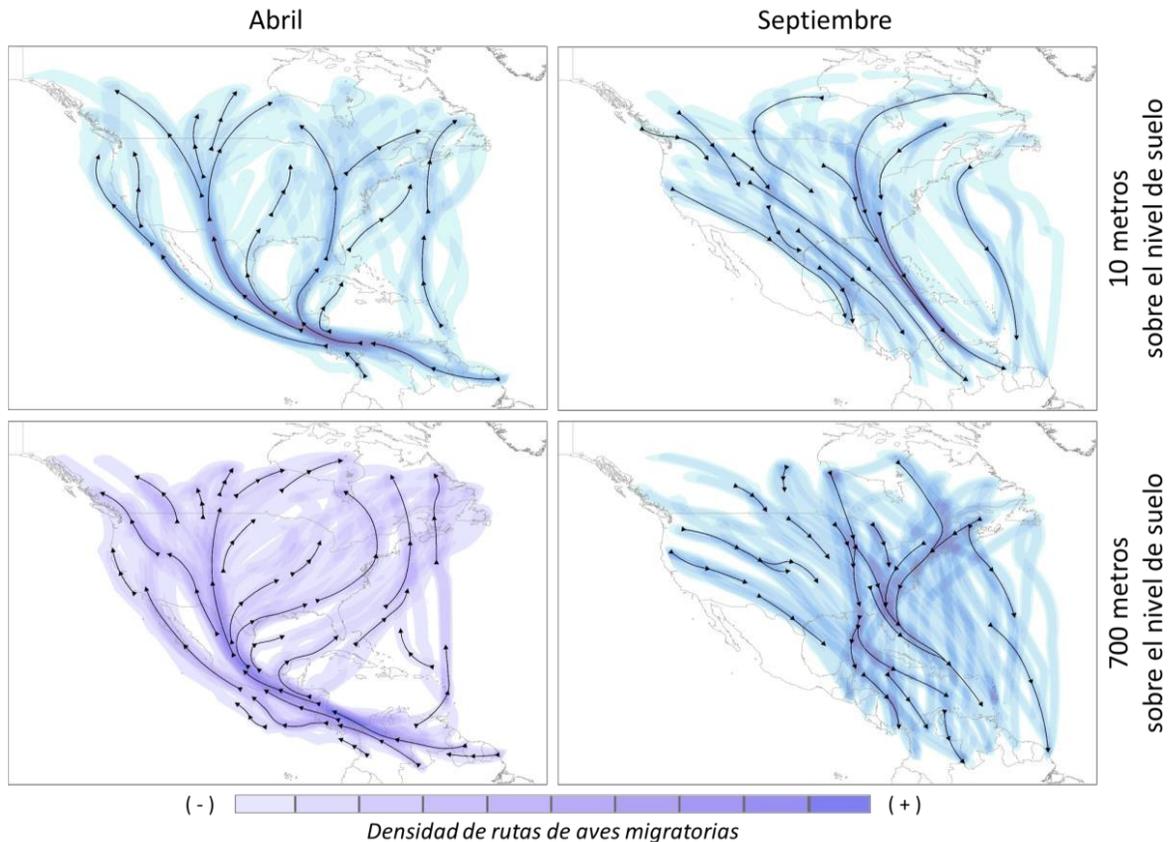


Fuente: Elaboración propia con datos de la Organización Mundial de la Salud OMS y World Organization for Animal Health OIE.

Para robustecer la estimación del Ppi se incorporó la variable que favorece la dispersión del agente causal de la influenza tipo A en escala global; ya que de acuerdo con diferentes autores las aves migratorias fungen como uno de los principales mecanismos de dispersión del patógeno como riesgo tanto a la sanidad animal como a la salud pública [49] [59].

Por lo que se toma como referencia la publicación de Kranstauber *et al.*, (2015); donde se identifican las rutas intercontinentales de aves migratorias definidas en virtud del vuelo y trayectoria, las cuales se delimitaron por sensores GPS (Global Position System), y por interés del Ppi se clasifican en virtud de sus características espaciales:

Figura 5.- Rutas intercontinentales de aves migratorias 2015.



Fuente: Elaboración propia con datos de Global aerial flyways allow efficient travelling. B. Kranstauber, R. Weinzierl, M. Wikelski, and K. Safi. Department for Migration and Immuno- Ecology Max Plank Institute for Ornithology 78315 Radolf- zell, Germany. Department of Biology, University of Konstanz, Konstanz; Germany. *Ecology Letters*, (2015) 18:1338–1345. DOI: 10.1111/ele.12528.

a) Temporalmente: se identifican dos periodos septiembre con trayectorias de norte a sur y abril de sur a norte.

b) Altitudinalmente: se identifican dos alturas extremas a 10 metros sobre nivel de suelo y 700 metros sobre nivel de suelo; que representan el rango de altitudes donde se observa la mayor parte de la migración en estudios con radar [51].

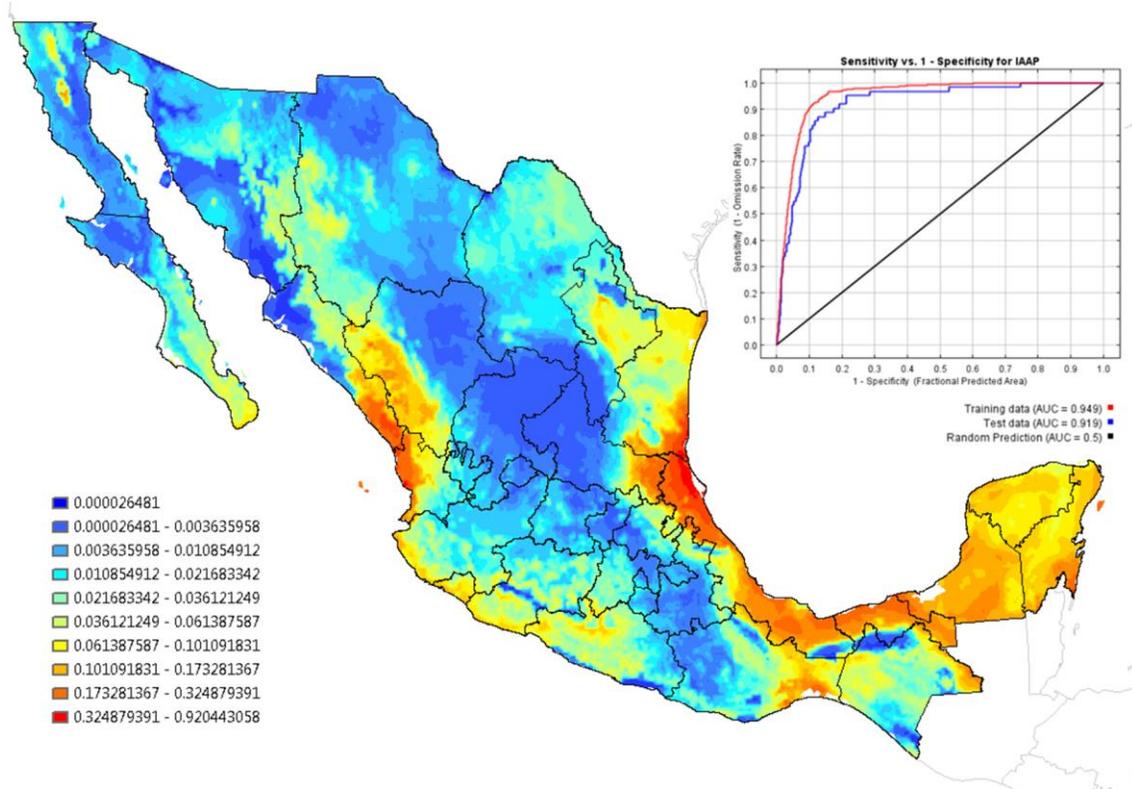
Lo que permite determinar una variable espaciotemporalmente tangible en dos vertientes la primera caracterizada en un 1er periodo de septiembre / marzo y longitudinalmente de (Norte a Sur) y un 2do periodo abril / agosto y longitudinalmente de Sur a Norte (Figura 5).

En la definición del Ppi se introduce el análisis exploratorio de datos espaciales (AEDE), a través del cual se realizan operaciones como el análisis de diferencias espaciales entre unidades territoriales definidas en el modelado del Ppi del agente causal de la influenza tipo A en territorio nacional y sus relaciones de topología geoespacial a través de las relaciones entre los diferentes elementos espaciales: fuente de inóculo, modelo de máxima entropía y rutas intercontinentales de aves migratorias, mediante la asociación topológica de nodo/punto; asociación topológica de red/arco/línea y topología de polígono.

Posteriormente se estimó el Ppe, que involucró el Ppi y 21 variables que potencializan el riesgo de establecimiento; definiendo el modelo de similitud climática en escala nacional el cual se elaboró mediante el algoritmo de máxima entropía a través de la asociación espacial de variables macro ambientales en la definición de áreas óptimas para el establecimiento del agente causal de la influenza tipo "A" en México.

Espacialmente el modelo representa las áreas en tonalidades frías o azules las cuales son las que representan las superficies con la aptitud baja y por el contrario, las áreas en tonalidad roja o colores cálidos son áreas donde ambientalmente es factible una distribución potencial de la especie representada en un índice de similitud climática que va de 0.0 a 0.9 respectivamente.

Figura 6.- Modelo de Similitud Climática (Maxent) en México y Diagrama de la curva de operación del receptor “ROC”



Fuente: Elaboración propia con datos de la Organización Mundial de la Salud OMS y World Organization for Animal Health OIE.

Cabe señalar que el modelo de Ppe identifica áreas con menor y mayor similitud climática [59]. Además estadísticamente resulta modelo robusto, derivado del análisis del area bajo la curva ROC, el cual cuenta con un valor de 0.923; es decir el punto de corte es alto entre especificidad y sensibilidad, ya que se aproxima al valor 1, que de acuerdo a referencias científicas cuanto más se aproxime la curva azul a la esquina superior izquierda, mejor es el modelo para predecir las presencias de los datos del modelado (Figura 6).

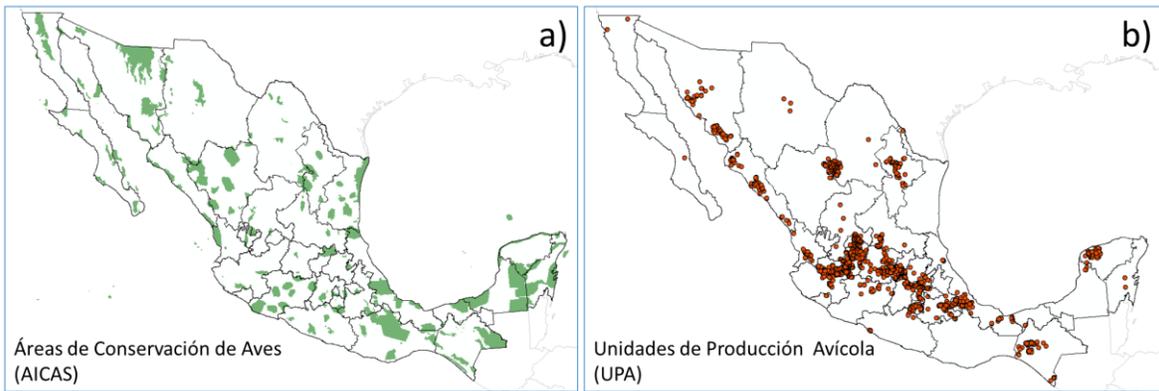
Así mismo para robustecer el modelo de Ppe incorpora dos coberturas geográficamente referidas las cuales permiten estimar el establecimiento del agente causal de la influenza tipo A en territorio nacional:

- a) Las Áreas de Conservación de Aves (AICAS), que se definen como áreas protegidas a las que se les ha otorgado alguna medida de protección legal a fin de mantener o preservar sus valores, ya sean características o formaciones naturales de patrimonio cultural o la biota; para fin de la estimación del Ppe se define como una entidad poligonal que caracteriza un espacio determinado en función de los sitios de alimentación o reposo de aves migratorias.
- b) Las Unidades de Producción Avícola (UPA), definidas como establecimientos donde se producen, procesan, movilizan y se comercializan aves de corral y los productos y sub productos derivados de las mismas; cuyo fin es proporcionar la medición espacial de la aglomeración de las mismas.

De esta forma se logra robustecer el Ppe con dos variables que incrementan el establecimiento del agente causal de la influenza tipo A; ya que las AICAS evidencian el riesgo natural de dispersión, es decir, son los sitios donde hacen escalas las aves migratorias y por otro lado las UPA potencializan el riesgo de dispersión antrópica ya que según la FAO en 2012 existieron brotes de influenza de alta patogenicidad (IAAP) del subtipo H7N3, en tres granjas avícolas de postura comercial de los municipios de Tepatitlán y Acatic, en Jalisco,(región principal productora de huevo a nivel nacional), donde se implementó el Dispositivo Nacional de Emergencia de Sanidad Animal [52].

En este sentido la estimación del Ppe incorpora dos variables que incrementan el riesgo físico y antrópico de la dispersión del agente causal de la influenza tipo A.

Figura 7.- Variables que potencializan el riesgo de establecimiento natural (a) y antrópico (b) del agente causal de la influenza tipo A en México.



Fuente: a) Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad 2015 b) Instituto Nacional de Estadística e Informática INEGI 2015.

Donde es fundamental incorporar una visión epidemiológica mediante el álgebra de mapas y la evaluación espacial multicriterio (EEM) identificando en riesgo de establecimiento en territorio nacional; ya que es de vital importancia una adecuada planificación de la atención sanitaria a través de modelos predictivos que permitan evaluar las áreas de riesgo de establecimiento de la IAP con una visión preventiva; y así mismo buscar estrategias de respuesta ante un riesgo en Salud Pública, basado en modelos de simulación para formular políticas, que permitan tomar decisiones en torno a problemas graves en la salud pública [53].

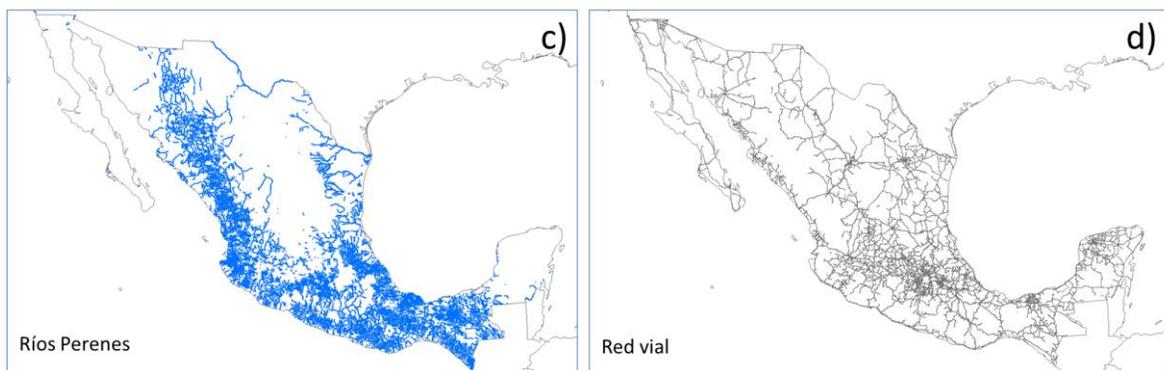
Finalmente se estima el Ppd el cual permite evidenciar el riesgo de dispersión del agente causal de la influenza tipo A considerando elementos que coadyuvan la dispersión en territorio nacional

- a) Los cuerpos de agua son extensiones de agua que se encuentran por la superficie terrestre y pueden ser perenes (que mantienen agua por todo el año) o intermitentes (que solo llevan a aguan en tiempo de lluvias).

- b) La red vial involucra las carreteras que unen diferentes lugares geográficos los que permiten el desplazamiento de personas y mercancías en territorio nacional, a través del tránsito promedio diario anual

Lo que permite evaluar e incorporar al modelado los posibles medios de dispersión del agente causal de la influenza tipo A; en las modalidades natural: mediante la trayectoria y flujo de agua corriente como sitio de alimentación o reposo de aves migratorias y antrópica por la movilidad vehicular estimada por el instituto Mexicano del transporte IMT; mediante datos georeferenciados de tránsito promedio diario anual en México.

Figura 8.- Variables que potencializan el riesgo de dispersión natural (c) y antrópico (d) del agente causal de la influenza tipo A en México.



Fuente: c) Instituto Nacional de Estadística e Informática INEGI 2015 b) Instituto Nacional de Estadística e Informática INEGI e Instituto Mexicano del Transporte IMT 2015.

Cabe señalar que la estimación de escenarios de riesgo, incorporan un modelado robusto que integra el componente espacial, el componente epidemiológico y un sustento estadístico; ya que los modelos estadísticos tradicionales pueden mostrar problemas de especificación cuando no consideran la presencia de autocorrelación espacial en los datos [62].

Se obtienen tres escenarios de Ppi, Ppe y Ppd del agente causal de la influenza tipo A en México, considerados variables dependientes para realizar las regresiones geográficamente ponderadas (GWR); y como variable exploratoria se

considera la densidad poblacional bajo el supuesto que los virus de influenza tipo A pueden afectar a cualquier persona; sin embargo existen grupos vulnerables para desarrollar complicaciones por influenza: los niños menores de 5 años, adultos mayores y mujeres embarazadas; además grupos étnicos parecen tener un riesgo más alto de presentar complicaciones por la influenza [52].

Caber señalar que se estimaron GWR y el cálculo del índice de Moran; porque consideran explícitamente el componente espacial de los datos, incorporando en su ecuación el valor de las coordenadas geográficas; debido a que tienen ventajas importantes que justifican su empleo [62]; en estudios de salud:

- Permiten moverse desde una perspectiva global a un análisis local del problema, obteniendo un mayor grado de detalle y precisión (Lloyd, 2010).
- Permiten la posibilidad de estimar coeficientes de determinación locales para cada unidad espacial a partir de los valores de un conjunto de observaciones vecinas, permite conocer la forma en que se combinan localmente las variables de la regresión para obtener el “ajuste específico” en una localización (Fotheringham *et al.*, 2002). Ppi/densidad poblacional; Ppe/densidad poblacional y Ppd/ densidad poblacional
- Facilita explorar la estructura espacial del modelo, es decir, medir el grado de dependencia espacial presente en el modelo -pudiendo ser positiva o negativa-, o detectar clústers de datos (Anselin, 1988).
- Al proveer resultados específicos para cada localización, éstos pueden ser usados como evidencias para apoyar políticas o tomas de decisiones locales; por eso con frecuencia estas técnicas son llamadas “basadas en el lugar”.

Por lo que de manera general la incorporación de técnicas de estadística espacial (GWR e índice de Moran) en análisis de lugar/ tiempo/ persona o problemas de salud pública, como en los modelos de predicción el Ppi, Ppe y Ppd supone claras ventajas sobre el empleo de métodos estadísticos tradicionales [62]; ya que, incorporar el componente espacial para fortalecer la toma de decisiones en

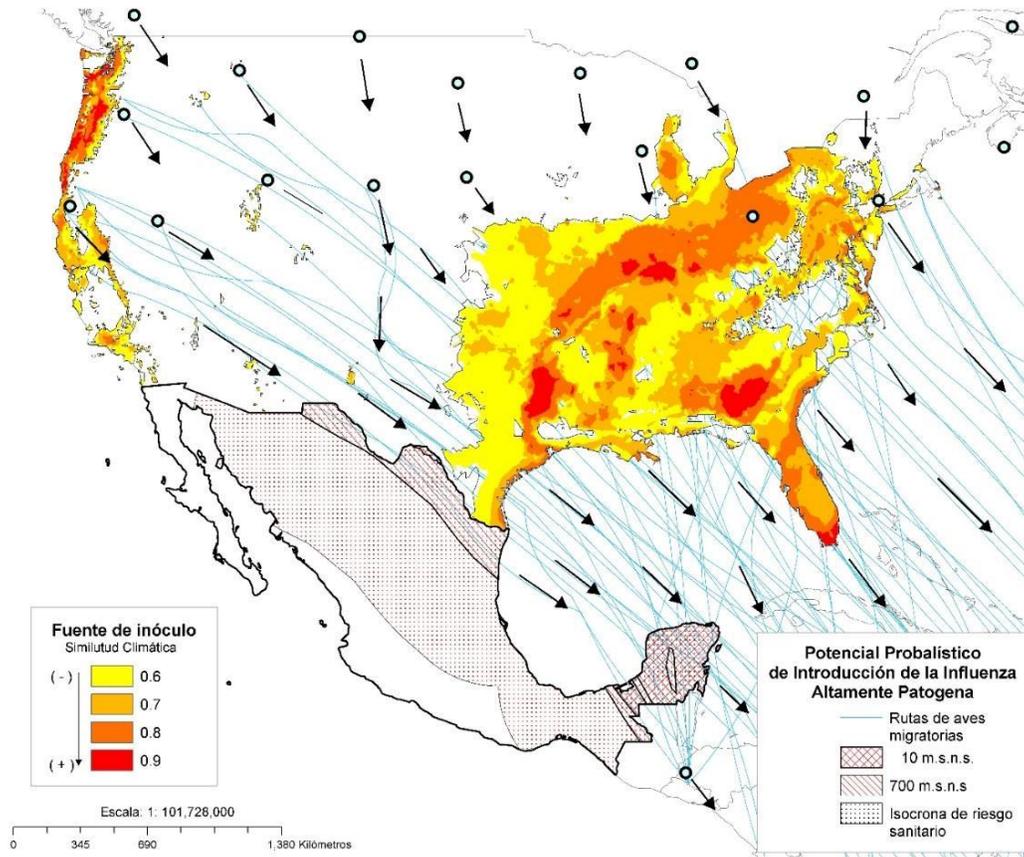
materia de salud pública; además la GWR que permite identificar la heterogeneidad y variación espacial del riesgo estimado [55].

Sin embargo, hay que tener en cuenta que estos modelos pretenden crear una representación idealizada de la realidad a fin de destacar algunas de sus propiedades [63]; además, hay que recordar que “los modelos no transmiten toda la verdad sino sólo una parte útil y comprensible de la misma” [57] [55].

Además el sustento estadístico se basa en el AEDE, el cual se entiende como una colección de técnicas que permiten describir y visualizar distribuciones espaciales, identificar lugares o valores atípicos y describir patrones de asociación espacial [64], denominados clusters de riesgo.

El Potencial probabilístico de introducción estimó dos escenarios de riesgo de introducción de influenza tipo A en México con características espacio temporales que potencializan el riesgo de Ppi.

**Figura 9.- Potencial Probabilístico de Introducción “Ppi”
(1er periodo “septiembre/marzo” norte a sur)**



Fuente: elaboración propia con base en metodología desarrollada

1. El periodo de septiembre/marzo marcado por una introducción potencial de norte a sur, donde se considera como fuente de inóculo la costa oeste de Estados Unidos y de mayor extensión de la Costa Oeste hacia la mitad del territorio, donde se identifica alto índice de similitud climática; lo que clasifica 3 porciones en riesgo a la introducción del agente causal de la influenza tipos A en territorio nacional, descritas a continuación (Figura 9):

a) La porción de muy alta aptitud a la introducción es ubicada en la Península de Yucatán, así como una pequeña porción al norte de Coahuila que representa 6.78% del territorio nacional donde se concentra 3.51% de la población.

b) Así mismo se identificó la porción que representa una aptitud alta al establecimiento del agente causal de la influenza tipos, estando que comprende 0.25% del país que abarca desde Chiapas hasta Sonora donde se concentra el 0.06% de la población y

c) Se identificó una tercera porción con aptitud media al establecimiento en la Península de Baja California y una porción de la Costa del Pacífico del Oeste de Oaxaca hasta Sinaloa, siguiendo la línea costera; cuantificando una superficie que representa el 9.19% del territorio nacional con el 3.67% de la población de acuerdo con datos oficiales de la encuesta intersensal de INEGI 2015.

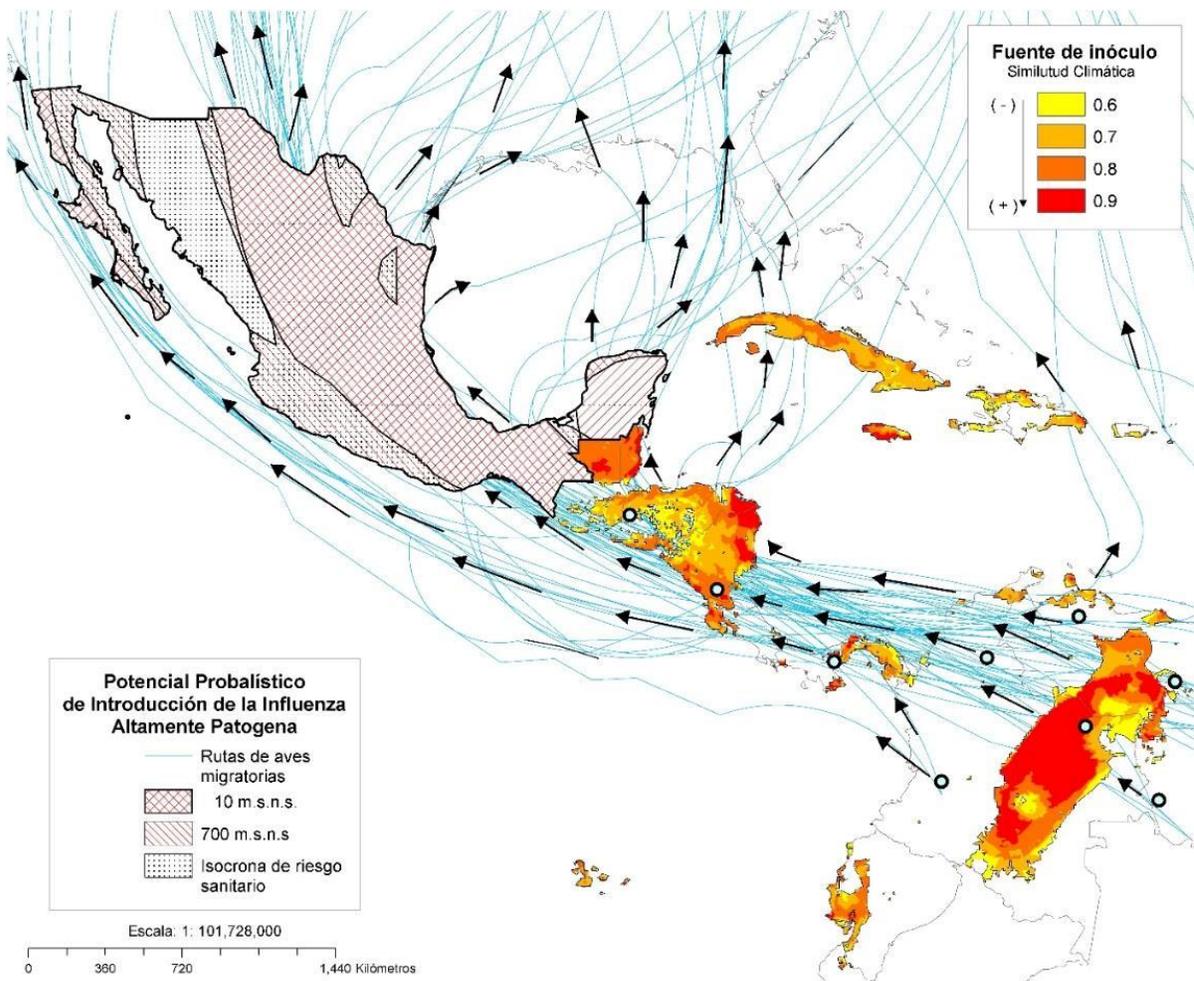
2. El segundo escenario representa el periodo de abril/agosto marcado por una posible introducción potencial de sur a norte, donde se considera como fuente de inóculo algunas porciones Centro América, El Caribe y de países como Ecuador, Colombia, Venezuela, Guyana y Surinam; donde el modelo de máxima entropía evidencia que existe altos índices de similitud climática; Evidenciando tres regiones en riesgo sanitario al Ppi de la IAP en el país (Figura 10):

d) La primera de muy alta aptitud desde Chiapas hasta Chihuahua pasando por el Istmo de Tehuantepec y la Costa del Golfo de México y dos pequeñas porciones en la costa de la Península de Yucatán y en la costa de la Península de Baja California hacia el Océano Pacífico que representa el 56.6% del país y donde se concentra el 32.48% de la población.

e) De igual forma se evidencia una segunda porción que abarca parte de la Península de Yucatán costa de Quintana Roo, costa del Pacífico de Oaxaca a Nayarit, Península de Baja California y Sonora en el Mar de Cortés que representa el 5.97% del país con el 0.96% de la población; y

f) Finalmente se ubica una tercera región en Sonora, Chihuahua, Sinaloa y norte de Nayarit que representa el 20.93% del territorio nacional con el 37.49% de la población total de acuerdo con datos oficiales de INEGI.

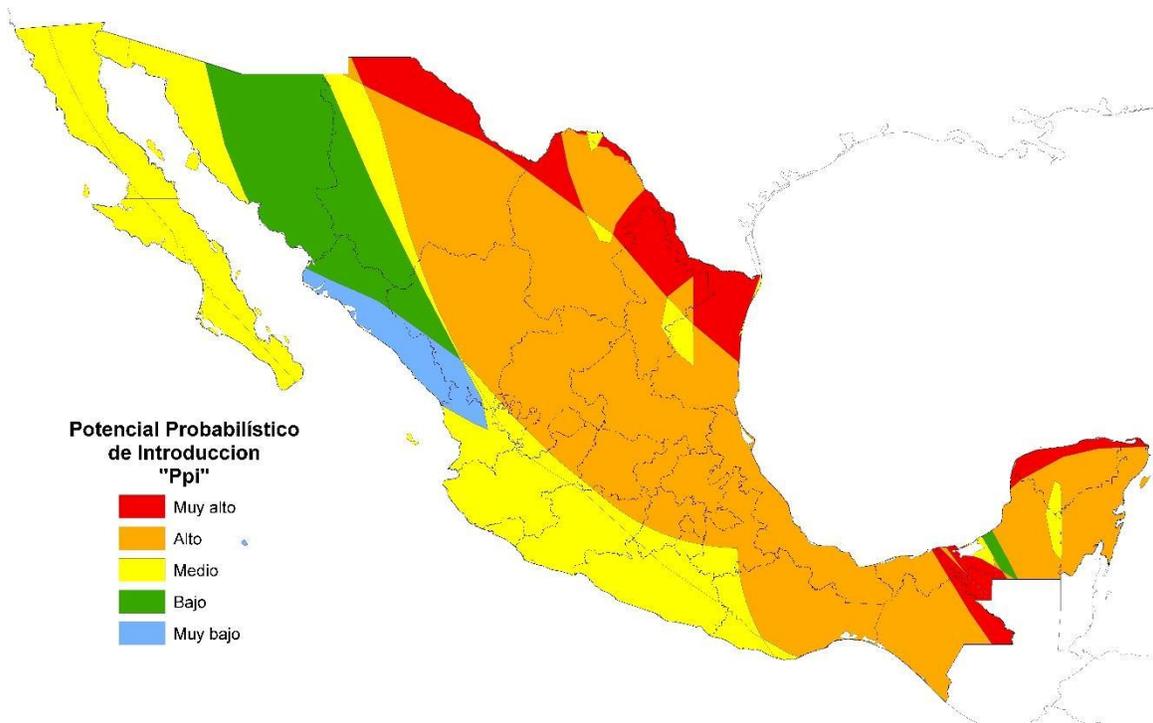
**Figura 10.- Potencial Probabilístico de Introducción “Ppi”
(2do periodo “abril/agosto” norte a sur)**



Fuente: elaboración propia con base en metodología desarrollada

Finalmente a través AEDE (interacción espacial) se estima el Ppi que evidencia las superficies que representan el mayor riesgo sanitario para el establecimiento del agente causal de la influenza tipo A, como riesgo para la salud pública representado en una escala regional a nivel país; donde se estima la población y territorio expuesto por cada rango de Ppi de muy alto, alto medio, bajo y muy bajo representado en porcentajes reflejado en la figura (11).

Figura 11.- Potencial Probabilístico de Introducción del agente causal de la influenza tipo A en México



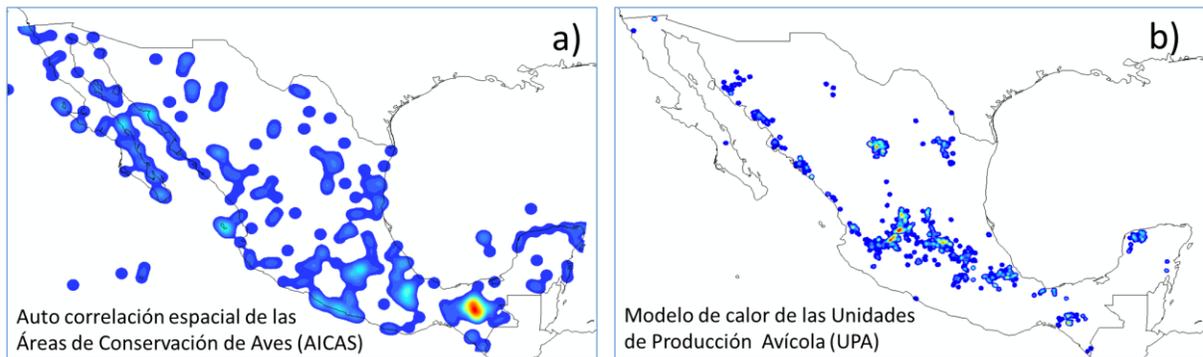
	Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Muy bajo	Total
Superficie expuesta (% de territorio nacional)	8.66	50.59	26.14	11.30	3.31	1,953,851
Población expuesta (% de población nacional)	4.74	69.77	20.22	2.71	1.06	112,336,538

Fuente: Elaboración propia con base en la metodología propuesta.

Posteriormente en la estimación del Ppe se considera como insumo base el Ppi y se realiza una auto correlación espacial con las variables de áreas de conservación de aves (AICAS) y Unidades de producción avícola (UPA), representando el riesgo natural y el riesgo antrópico, respectivamente.

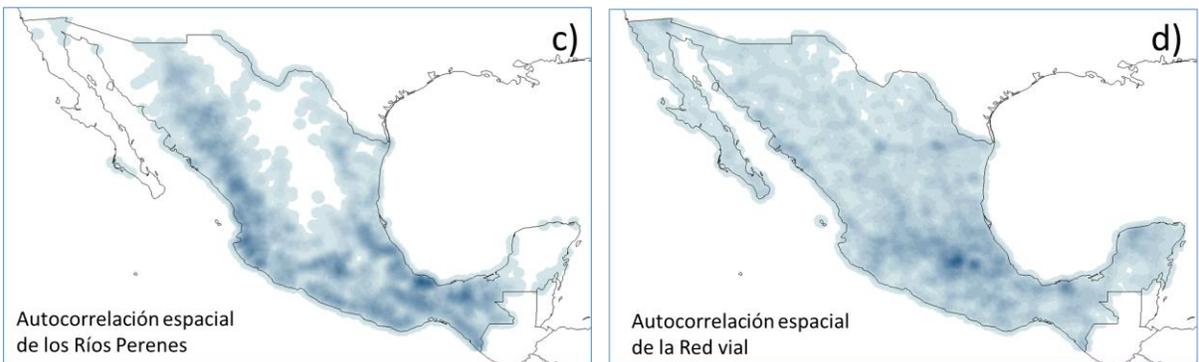
En la caracterización de las variables que potencializan el establecimiento del agente causal de la influenza tipo A, se representa mediante un modelo de densidad espacial para evidenciar el área de influencia de los catalogados como riesgo natural y antrópico (Figuras 12 y 13).

Figura 12.- Modelado espacial de variables que potencializan el riesgo de establecimiento natural (a) y antrópico (b) del agente causal de la influenza tipo A en México.



Fuente: a) Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad 2015 b) Instituto Nacional de Estadística e Informática INEGI 2015.

Figura 13.- Modelado espacial de variables que potencializan el riesgo de establecimiento natural (a) y antrópico (b) del agente causal de la influenza tipo A en México.



Fuente: a) Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad 2015 b) Instituto Nacional de Estadística e Informática INEGI 2015.

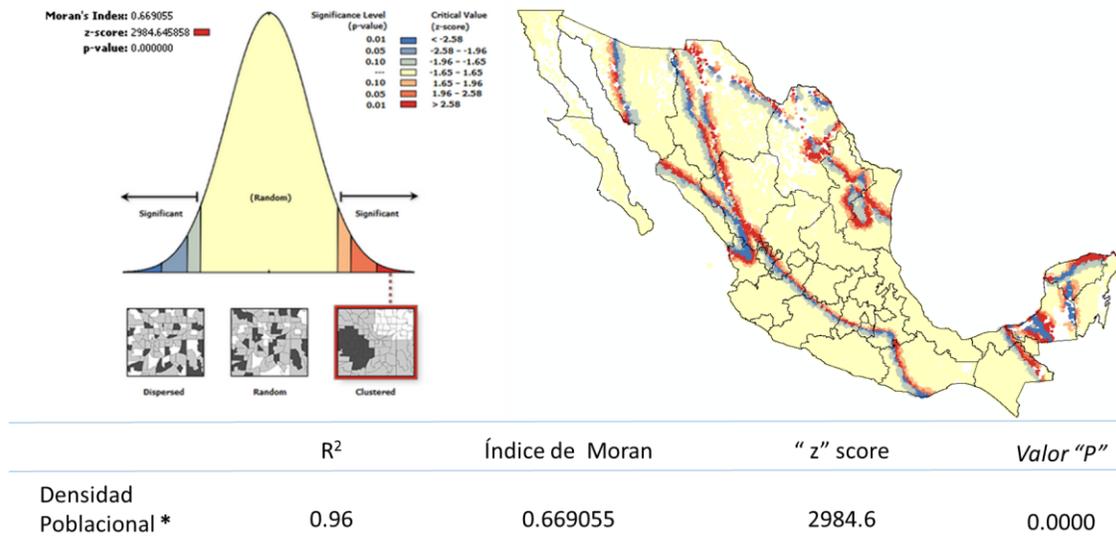
De esta forma se estimó el cociente espacial de potencial probabilístico de dispersión definido por una técnica para analizar la concentración y distribución espacial de riesgo de establecimiento natural y antrópico en México; lo que permite identificar patrones riesgo y a su vez proporcionan una medida que ayuda a identificar si un patrón riesgo es desproporcionadamente alto o bajo en una ubicación en particular, caracterizando la aglomeración del riesgo de dispersión (Figura 12 y 13).

En este sentido y como soporte al modelado espacial se evalúa geoestadísticamente el escenario de riesgo de influenza tipo A en México; a través del cálculo GRW e índice de Moran, lo que permite evidenciar la distribución espacial de la estimación del riesgo mediante la interpretación de la R^2 (*r cuadrada*) a nivel local, así mismo permitió realizar un análisis espacial de las elasticidades y la importancia de la densidad poblacional para evaluar la Hipótesis que señala que “las entidades se distribuyen de manera aleatoria”.

El potencial probabilístico de introducción contó con una R^2 de 0.96, y se entiende como la estadística derivada de la ecuación de regresión para cuantificar el rendimiento del modelo; por lo que se deduce que el modelo explica el 96 % de la variación en la asociación espacial entre el riesgo de introducción y la densidad poblacional; y por su parte el modelo contó con una “ $p:<0.005$ ” lo indica que es modelo estadísticamente significativo; es decir existe probabilidad que los valores de riesgo de introducción en asociación con la densidad poblacional, se distribuyan de manera aleatoria.

Además en valor de z es de 2984; por lo tanto se refuerza el supuesto de una distribución aleatoria con evidencia estadística y finalmente el índice de Moran es positivo con un valor de 0.669055, refuerza que existe un patrón de distribución de riesgo de introducción agregado; además, que dado el puntaje z , existe una probabilidad inferior al 1% de que este patrón de distribución agrupado pueda ser el resultado de la causalidad, por tanto, existe evidencia estadística de que distribución espacial del riesgo de establecimiento del agente causal de la influenza tipo A es agregada en territorio nacional.(Tabla 4).

Tabla 4-. Modelo de Potencial Probabilístico de Introducción del agente causal de la influenza tipo “A” en México (Ppi)**

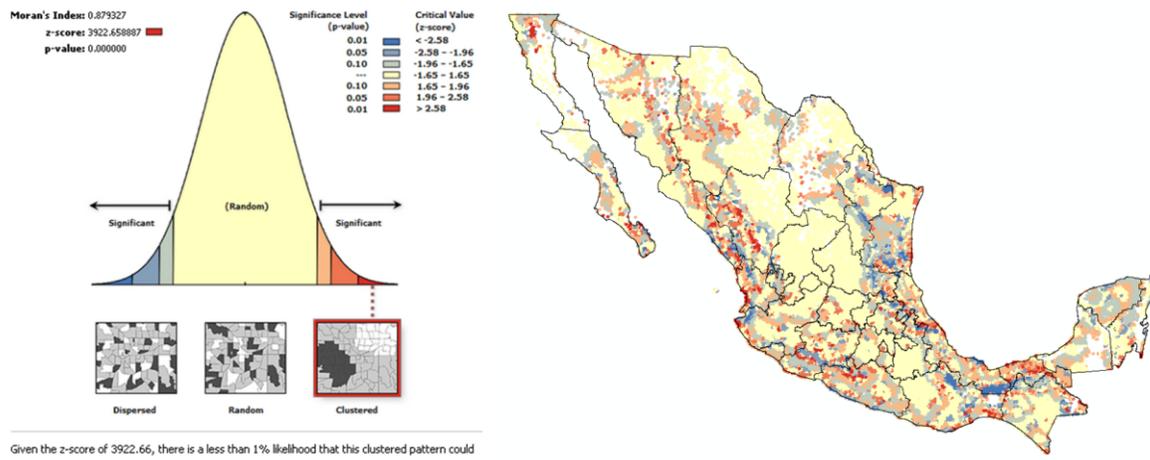


* **Variable dependiente:** Se considera la densidad poblacional a nivel localidad; ya que la población en cualquier edad puede ser afectada por el agente causal de la influenza tipo "A" (de baja y alta incidencia patógena).

** **Variable independiente o exploratoria:** el calculo del Ppi involucra 4 variables de índole regional: a) 1,973 casos positivos de influenza tipo A (de baja y alta incidencia patógena) del periodo 2015-2016; b) el área de fuente inoculo (obtenida mediante el modelo de Máxima entropía); c) las isócrona de riesgo sanitario definiendo el territorio desde Norteamérica hasta Centroamérica) y d) la ruta intercontinental de aves migratorias (identificando trayectorias de norte a sur y de sur a norte); cabe señalar que se caracterizó en dos periodos espacio-temporales: 1er periodo Septiembre / Marzo (Norte a Sur) y 2do período Abril / Agosto (Sur a Norte).

Por su parte el Ppe tiene una R² de 0.92; por lo que el modelo explica el 92 % de la variación en la asociación espacial del riesgo de establecimiento / densidad poblacional; y cuenta con una "p" cuenta con un valor " $p < 0.005$ ", siendo un modelo estadísticamente significativo, por lo tanto existe evidencia estadística que el riesgo de establecimiento se distribuye de manera aleatoria y se refuerza con el valor de $z = 3922.6$; por lo tanto se refuerza el supuesto de rechazar la hipótesis nula ya que existe evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula y finalmente el índice de Moran es positivo con un valor de 0.8792 que señala que el patrón de distribución ppe/densidad poblacional es agregado; por lo que dado el puntaje z es muy alto hay menos de 1% de probabilidad de que el patrón agrupado pueda ser el resultado de la casualidad (Tabla 5).

Tabla 5 Modelo de Potencial Probabilístico de Establecimiento del agente causal de la influenza tipo “A” en México (Ppe)**



	R ²	Índice de Moran	“z” score	Valor “P”
Densidad Poblacional *	0.92	0.879327	3922.6	0.0000

* **Variable dependiente:** Se considera la densidad poblacional a nivel localidad por que la población en cualquier edad puede ser afectada por el agente causal de la influenza tipo “A” (de baja y alta incidencia patógena).

** **Variable independiente o exploratoria:** el calculo del **Ppe** involucra el **Ppi** y 21 variables que potencializan le riesgo de establecimiento; definiendo el modelo de similitud climática en escala nacional que se elaboró mediante el algoritmo de máxima entropía involucrando variables macro ambientales en la definición de áreas optimas para el establecimiento del agente causal de la influenza tipo “A” en México

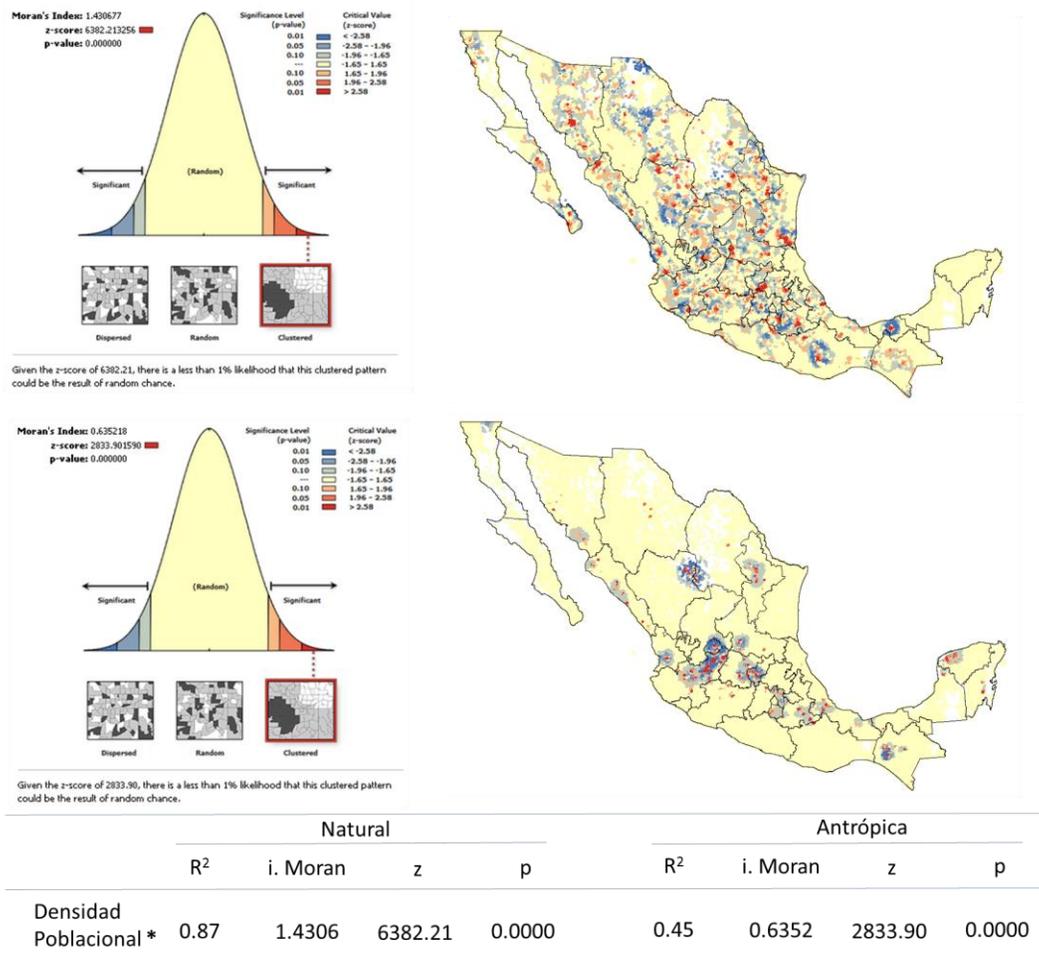
En tonalidad clara (beige) se evidencia donde existe el patrón de distribución aleatorio destacando las partes desérticas del país y manchones en varios territorios, con algunas porciones, donde se encuentran distribuciones dispersas (tonalidades azules) y de igual forma existen patrones de distribución agregado en tonalidades rojas; considerando la interacción espacial del riesgo de establecimiento / densidad poblacional; en la caracterización estadística del modelo de potencial probabilístico de establecimiento de la influenza tipo A en México (Tabla 5).

Finalmente el potencial probabilístico de dispersión que integro en su caracterización el riesgo de establecimiento se evaluó geoestadísticamente considerando dos modalidades de riesgo de dispersión el riesgo natural y antrópico.

La evaluación de la interacción espacial entre el riesgo de dispersión natural y la densidad de población contó con una R² de 0.87; por lo que el modelo de riesgo de

dispersión natural del agente causal de la influenza tipo A logro explicar el 87 % de la variación espacial del riesgo de dispersión natural, siendo un modelo estadísticamente significativo con un valor de “ $p:<0.005$ ”, de igual forma el modelado permitió evidenciar que estadísticamente el riesgo de establecimiento se distribuye de manera aleatoria y se refuerza porque modelado del índice de Moran con un valor de 1.43 y además, contó con un valor de $z = 6382$. (Tabla 6).

Tabla 6.- Modelo de Potencial Probabilístico de Dispersión del agente causal de la influenza tipo “A” en México (Ppd)**



* **Variable dependiente:** Se considera la densidad poblacional a nivel localidad por que la población en cualquier edad puede ser afectada por el agente causal de la influenza tipo “A” (de baja y alta incidencia patógena).

** **Variable independiente o exploratoria:** el calculo del Ppd involucra el Ppi, el Ppe y 3 variables que potencializan le riesgo de dispersión: a) las áreas de conservación de aves que funge como riesgo natural de dispersión y b) las unidades de producción avícola que potencializan el riesgo antrópico, así como b) las vías de comunicación que pueden coadyuvar en el Potencial Probabilístico de dispersión del agente causal de la influenza tipo “A” en México

Por su parte el riesgo de dispersión antrópica fue el modelado que con menor poder predictivo, ya que, estadísticamente el riesgo de dispersión antrópica contó con una R^2 de 0.45; por lo que el modelo solo explica el 45 % de la variación en la asociación espacial Ppd / riesgo antrópico; sin embargo, resultó un modelo estadísticamente significativo con un valor de " $p:<0.005$ ", así como un Índice de Morán de 0.6352; lo que permitió definir la distribución espacial aleatoria de las superficies en riesgo de dispersión antrópica del agente causal de la influenza tipo A en México, además dado el puntaje z es muy alto hay menos de 1% de probabilidad de que el patrón agrupado pueda ser el resultado de la casualidad.

De esta forma para el Ppd (natural y antrópica) el modelado geoespacial permitió identificar clúster bien definidos espacialmente, los cuales se representan en tonalidades rojas y se destacan grandes extensiones comportamiento espacial aleatorio en tonalidades color (beige) (Figura 6).

14. Discusión

El modelado geoespacial permitió la integración de variables desde una visión holística que puede ayudar a vislumbrar posibles escenarios de riesgo en este caso en la introducción del agente causal de la influenza tipo A en territorio nacional.

Las técnicas y métodos empleados en esta investigación son recomendables para poder analizar problemas epidemiológicos y sanitarios; ya que, pueden estimar una posibilidad de ocurrencia con base en la interacción de variables geofísicas, antrópicas y epidemiológicas, reflejando los resultados en tiempo y espacio; pudiendo robustecer la toma de decisiones ante problemas emergentes y reemergentes de salud.

La elaboración de las isócronas de riesgo sanitario como insumo en la estimación del potencial probabilístico de introducción permitió tener un referente espacial de la distancia representativa entre los brotes de influenza altamente patógena, es decir, se incorpora el espacio euclidiano en la caracterización del riesgo sanitario, ya que todo problema en salud es territorialmente ubicable y diferenciando, lo que

permite poner límites o áreas de posible alcance del elemento de riesgo; los cuales se potencializan asociados a los procesos de globalización (movimientos transnacionales), y fenómenos macro ambientales como el calentamiento global; los cuales inciden en la aparición de enfermedades reemergentes como la influenza altamente patógena; ya que según Tirado *et al.*, 2015 [65]; las epidemias de influenza no son determinadas únicamente por elementos biológicos. En este sentido es pertinente señalar que en estudios anteriores no se hizo referencia al cálculo de distancias representativas ante los brotes de influenza tipo A, lo que puede aportar más robustez al escenario de riesgo de introducción.

Como área de fuente de inóculo se identificó una superficie de influencia de 2192 km, considerada el área riesgo de introducción; dentro de la misma, se jerarquizaron las sub-áreas de con características óptimas para este tipo de virus, este modelo se validó con el análisis de área bajo la curva del modelo de similitud climática, con una COR de 0.923; lo que indica que el modelo realizó una estimación óptima de las áreas que cuentan con mayor aptitud para favorecer la introducción de virus altamente patógenos.

Además, el modelo identificó las variables que más influyen en el riesgo de introducción del agente causal de este tipo de virus a México, están asociadas a temperatura y precipitación principalmente; estos resultados pueden ser utilizados por los tomadores de decisiones para direccionar estrategias que impacten en la vigilancia, monitoreo o control de la influenza altamente patógena; a través de coadyuvar en la planeación de estrategias de prevención y actuación ante un brote o detección en territorio nacional.

Adicionalmente, la caracterización del riesgo de introducción involucró un componente temporal con mayor definición; a diferencia de otras investigaciones sobre riesgo de influenza realizadas donde solo utilizan variables bioclimáticas, geográficas y antropogénicas o utilizan el modelo de distribución potencial máxima entropía [34],[41],[67]; en este sentido el modelado que se realizó evidencia dos periodos de riesgo de introducción con base en las publicación de Kranstauber *et al.*, 2015 [6]; lo que permitió estimar un escenario de introducción con mayor

resolución espacial y temporal obteniendo un modelo más robusto que permite fortalecer la definición del riesgo de introducción, evidenciando que temporalmente el mayor riesgo de introducción se representa de de abril a agosto con una posible movilización del agente causal de la influenza tipo A de norte a sur.

El modelo encontró que más de la mitad de la superficie nacional se encuentra expuesta a un riesgo de introducción del agente causal de la influenza tipo A; con una caracterización del riesgo de introducción muy alto y alto; lo que evidencia que cerca del 70% de la población mexicana se encuentra expuesta a la posible detección de brotes de influenza altamente patógena; ya que es un territorio donde existen las condiciones ambientales propicias para la sobrevivencia y desarrollo de este tipo de virus, y existe una alta autocorrelación espacial para el modelado geoespacial [66].

Este tipo de modelos puede fortalecer la toma de decisiones [31]; en materia de prevención y actuación ante problemas remergentes de salud como lo es el agente causal de la influenza tipo A; debido a que el potencial probabilístico de introducción ha sido concebido como una herramienta cartográfica, que puede coadyuvar a direccionar las acciones y control ante la aparición de brotes o detecciones de este tipo de virus en cualquier lugar del territorio nacional, lo que puede fortalecer la respuesta inmediata de los Servicios Sanitarios.

El modelado geoespacial en la estimación del potencial probabilístico de establecimiento permite caracterizar el territorio según criterios epidemiológicos del agente causal de la influenza tipo A; y se refleja a través de los denominados mapas de riesgo sanitario, que se sustentan con criterios espaciales y estadísticos, con la finalidad de fortalecer la toma de decisiones en materia sanitaria considerando la visión de *una sola sanidad* propuesta por la OMS [40]; en la que señala que la Salud Pública y Sanidad Animal son interdependientes y están vinculadas en los ecosistemas en los cuales coexisten [68].

La aplicación del modelo de aptitud ambiental permitió clasificar adecuadamente las áreas de mayor similitud climática pues se validó con el área bajo la curva con un valor de COR de 0.923, por lo que se consideró como un buen diagnóstico si

tomamos en cuenta que el valor crítico en este tipo de modelos es de 0.700 según Keiko *et al.*, 2013 [69], cabe señalar que las variables predictoras importantes del modelo se asocian a la precipitación, humedad y temperatura contribuyendo con más de la mitad de la predicción del modelo de aptitud ambiental con el 62.3%; Siendo resultados semejantes a estudios previos que han demostrado la efectividad de este tipo de análisis para identificar escenarios de riesgo ante virus altamente patógenos en Japón [70], China [35], Medio Oriente [34] y Estados Unidos [71].

El modelo de riesgo natural permitió identificar que 15.6% de la superficie nacional se encuentra caracterizado en este tipo de riesgo, por lo que es pertinente señalar que una estrategia de prevención pueden ser la implementación de los sitios centinela para la vigilancia epidemiológica en las áreas aledañas a las AICAS; para identificar lo más tempranamente posible algún caso o brote de influenza altamente patógena, asociado a principalmente a la interacción de aves migratorias y aves nativas del país en los sitios de encuentro e interacción entre hospederos.

Además el modelo de riesgo antrópico permite evidenciar que un 4.78% del territorio nacional se encuentra bajo esta modalidad de riesgo, aunque es un porcentaje estimado muy bajo no deja de ser importante porque una vez establecidos este tipo de virus existe un riesgo latente en las regiones cercanas en su posible dispersión, por ello es importante mantener en buen estado las instalaciones de las unidades de producción avícola, a través de un manejo adecuado de los residuos e implementar una vigilancia epidemiológica de las aves de corral por personal debidamente capacitado.

La asociación e interacción espacial del riesgo ambiental, natural y antrópico juegan un papel fundamental como factores de riesgo para el establecimiento de virus altamente patógenos y su posible recombinación como lo identificó Belkira *et al.*, 2018; en su investigación de riesgo de establecimiento de virus de baja y alta incidencia patógena realizado en California, EUA [72].

Concretamente, se identificaron 19 clúster de alto riesgo para el establecimiento del agente causal de virus tipo A, lo cual significa que en estas áreas convergen el conjunto de características propicias para el establecimiento de este tipo de virus;

lo que podría sugerir que se deben fortalecer las acciones de la vigilancia epidemiológica dirigidas especialmente a grupos vulnerables en dichas áreas; como lo son niños menores de 2 años y adultos mayores como los señala la OMS; además, personas que vivan próximas de una área de producción avícola o un cuerpo de agua como lo recomienda el Dispositivo Nacional de Emergencia en Sanidad Animal DINESA del SENASICA, e incluso donde estos factores sean comunes el riesgo de establecimiento se potencializa; de igual forma, en áreas urbanas el hacinamiento de personas puede jugar un papel importante en el contagio de este tipo de virus.

Por otro lado, el modelo del potencial probabilístico de establecimiento contó con un buen respaldo geoestadístico, específicamente por el Índice de Moran y la regresión geográficamente ponderada, lo que otorgan un respaldo estadístico al modelo de establecimiento, lo cual permite tener un resultado más robusto sustentado estadísticamente evidenciando los clúster riesgo de establecimiento, es decir, la agregación de áreas con características que incrementan el riesgo de establecimiento de este tipo de virus.

Finalmente el riesgo de establecimiento permitió identificar las principales regiones que representan territorialmente el mayor riesgo de dispersión, al mismo tiempo permite coadyuvar en la toma de decisiones, puesto que el modelado geoespacial creó una red que abarca el total del territorio nacional, representando un modelo de densidad de los elementos que pueden potencializar el riesgo de dispersión con las vertientes de dispersión natural y antrópica, siendo resultados estadísticamente significativos respaldados por la regresión geográficamente ponderada y el Índice de Morán.

15. Conclusiones y recomendaciones

El modelo cartográfico de riesgo sanitario en el potencial probabilístico de introducción del agente causal de la influenza tipo A; evidenció las áreas que representan el mayor riesgo de introducción de acuerdo a las variables de

detecciones oficiales, rutas de aves migratorias y densidad poblacional, bajo un enfoque espacial epidemiológico, que se pueden entender como un acercamiento a la realidad más nunca pretenden ser la realidad observada.

En este sentido los modelos cartográficos de riesgo sanitario constituyen una herramienta para la planificación de acciones y soporte en la toma de decisiones, debido a que representan espacial y temporalmente el riesgo sanitario que representan enfermedades emergentes y remergentes como agente causal de la influenza tipo A.

Es conveniente resaltar que el modelo cartográfico de riesgo sanitario en el potencial probabilístico de introducción fue concebido como un modelo integrador que alimenta otros modelos con mayor escala de resolución como el potencial probabilístico de establecimiento y dispersión que permiten aumentar la escala de trabajo y obtener resultados más finos (espacial y epidemiológicamente hablando), llegando a escala municipal y local respectivamente; cabe señalar que dichos modelos derivan y complementan la presente investigación, es decir se puede considerar etapas consecuentes entre ellos.

La presente tesis se puede presentar como una investigación transdisciplinar que puede aplicarse ante problemas de índole sanitario incluyendo problemas de salud pública, salud animal y sanidad vegetal, para dar soporte a la toma de decisiones en materia de riesgos sanitarios.

El uso de base de datos espaciales analizada en el entorno de los Sistemas Información Geográfica y en específico la Evaluación Espacial Multicriterio aportan grandes bondades para el estudio de salud pública debido a que puede fortalecer la detección temprana ante problemas de salud ambiental o posibles epidemias; por lo que puede llegar a ser insumos de vital importancia para soportar la toma de decisiones ante problemas de salud, ya que, en este caso permitió identificar un escenario de las áreas o superficies que reúnen las condiciones idóneas en las que puede establecerse virus pandémicos, lo cual es de gran apoyo para dirigir u orientar acciones preventivas y correctivas hacia estas áreas específicas.

Finalmente es recomendable estrechar las relaciones de los organismos sanitarios nacionales e internacionales involucrando la salud humana y la sanidad animal, para fortalecer la transversalización de la información y con ello estimar escenarios con mayor poder predictivo con mayor resolución espacial en la estimación del riesgo ante enfermedades emergentes y reemergentes como los virus tipo A de baja y alta incidencia patógena

16. Referencias bibliográficas

[1] Figueroa de LS. 2009. Introducción a la salud pública. Universidad de San Carlos. Facultad de Ciencias Médicas. Fase 1 Área de Salud Pública. [Internet]. [Consultado 15 septiembre 2016]; Disponible en: <https://saludpublicayepi.files.wordpress.com/2012/06/documento-3er-parcial-compilacion-4-documentos.pdf>

[2] Evaluación rápida de riesgos de eventos agudos de salud pública. Organización Mundial de la Salud. OMS [Internet] 2015 Edición original en inglés: Rapid Risk Assessment of Acute Public Health Events © World Health Organization, 2012. [Consultado 15 septiembre de 2016]; Disponible en: <http://iris.paho.org/xmlui/handle/123456789/7701>

[3] Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades, Centro Nacional de Inmunización y Enfermedades Respiratorias (NCIRD). [Internet] 2016 [Consultado el 15 septiembre de 2016]; Disponible en: <http://espanol.cdc.gov/enes/flu/about/viruses/transmission.htm>

[4] Una sola salud. Organización mundial de Sanidad Animal OIE [Internet] 2016 [Consultado 8 julio de 2016]; Disponible en: <http://www.oie.int/es/para-los-periodistas/onehealth-es>

[5] Jiménez Clavero MA. Las aves como reservorio de virus zoonóticos Centro de Investigación en Sanidad Animal (CISA). Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA) Valdeolmos, Madrid. [Internet] 2016 [Consultado septiembre de 2016]; Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/268814001_Las_aves_como_reservorio_de_virus_zoonoticos_Articulo_de_revision

[6] Kranstauber B, Weinzierl R, Wikelski M, Safi K. Global aerial flyways allow efficient travelling. *Ecology letters*. 2015. Dec; 18(12):1338-45. PubMed PMID: 26477348.

[7] Prosser DJ, Hungerford LL, Erwin RM, Ottinger MA, Takekawa JY, Newman SH, et al. Spatial Modeling of Wild Bird Risk Factors for Highly Pathogenic A (H5N1) Avian Influenza Virus Transmission. *Avian diseases*. 2016 May; 60(1 Suppl):329-36. PubMed PMID: 27309075.

[8] Una sola salud. Organización mundial de Sanidad Animal. OIE. [Internet] 2016 [Consultado 8 julio de 2016]; Disponible en: <http://www.oie.int/es/para-los-periodistas/onehealth-es>

[9] Influenza aviar altamente patógena (peste aviar). World Organization for Animal Health. OIE. [Internet] con última actualización 22/04/2002 [Consultado 16 diciembre 2016]; Disponible en: http://web.oie.int/esp/maladies/fiches/e_A150.htm

[10] Ward MP, Maffei DN, Apostu CL, Suru AR. Association between outbreaks of highly pathogenic avian influenza subtype H5N1 and migratory waterfowl (family Anatidae) populations. *Zoonoses and public health*. 2009 Feb; 56(1):1-9. PubMed PMID: 18793277.

[11] Influenza. Situación actual de la influenza aviar. Centro para el Control y la Prevención de Enfermedades. CDC. [Internet] 2016 [Consultado 17 septiembre 2015]; Disponible en: <http://espanol.cdc.gov/enes/flu/avianflu/avian-flu-summary.htm>

[12] Preparación para una gripe pandémica Marco para el intercambio de virus gripales y el acceso a las vacunas y otros beneficios. Organización Mundial de la Salud. Catalogación por la Biblioteca de la OMS. [Internet] ISBN 978 92 4 350308 0. 2012. [Consultado 11 noviembre 2016]; Disponible en: <http://apps.who.int/gb/pip/>

- [13] Fithian W & Hastie T. Finite-Sample Equivalence of Several Statistical Models for Presence-Only Data. Department of Statistics Stanford University. July 31, 2012. [Internet] Annals of Applied Statistics 2013, Vol. 7, No. 4, 1917-1939. [Consultado 16 diciembre 2016] DOI: 10.1214/13-AOAS667.
- [14] Royle JA, Chandler RB, Yackulic C & Nichols JD. Likelihood analysis of species occurrence probability from presence-only data for modelling species distributions. [Internet] Methods in Ecology and Evolution [Consultado 16 diciembre 2016] doi: 10.1111/j.2041-210X.2011.00182.x
- [15] Smith DM. Geografía Humana. Editorial: OIKOS-TAU. Barcelona. 1980. ISBN 10: 8428104379 / ISBN 13: 9788428104371.
- [16] Sorre M. 1955. Fundamentos Biológicos de la Geografía Humana. Ensayo de una Ecología del Hombre. Barcelona: Ed. Juventud.
- [17] Meade MS, Florin JW & Gesler WM. Medical Geography. Published by Guilford Publications, New York, NY (1988). ISBN 10: 0898627818 ISBN 13: 9780898627817.
- [18] Verhasselt Y. Potentialities of Geography of Health. Archives of Public Health. 1993.
- [19] Iñiguez RL. Geography and health: themes and perspectives in Latin America. Cad. Saúde Pública, Rio de Janeiro. [Internet] 1998 [Consultado 17 diciembre 2016] <http://www.scielosp.org/pdf/csp/v14n4/0063.pdf>
- [20] Oropeza M y Díaz N. La geotecnología y su inserción en el pensamiento geográfico. Terra Nueva Etapa, vol. XXIII, núm. 34, julio-diciembre, 2007. Universidad Central de Venezuela Caracas, Venezuela [Internet] 2016 [Consultado el 28 Noviembre 2016] http://190.169.94.12/ojs/index.php/rev_terr/article/view/1274
- [21] Quirós HM. Tecnologías de la información geográfica (TIG). Cartografía, Fotointerpretación, Teledetección y SIG. Ediciones Universidad Salamanca. Numero 86 año 2011. ISBN: 978-84-7800-148-4.

[22] Salud Pública Veterinaria y Control de Zoonosis en Países en Desarrollo. FAO/OMS/OIE. [Internet] 2003 [Consultado 21 diciembre 2016]. <http://www.fao.org/docrep/006/Y4962T/y4962t05.htm>

[23] Plan Nacional de Desarrollo. Gobierno de la Republica. PND 2013-2018. [Internet] 2016 [Consultado 20 noviembre 2016]; Disponible en: <http://itcampeche.edu.mx/newsite/wp-content/uploads/2016/06/Plan-Nacional-de-Desarrollo-PND-2013-2018-PDF.pdf>

[24] Buzai GD. Geografía Global. El paradigma geotecnológico y el espacio interdisciplinario en la interpretación del mundo del siglo XXI. Buenos Aires, Lugar Editorial, 221. ISBN 950-892-063-7.

[25] Epidemiología. Temas de Salud. [Internet] 2016 [Consultado 14 de enero 2017]; Disponible en: <http://www.who.int/topics/epidemiology/es/>

[26] Determinantes en salud. Organización Panamericana de la Salud. [Internet] 2016 [Consultado 14 enero 2017]; Disponible en: http://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=5165%3A2011-determinants-health&catid=5075%3Ahealth-promotion&Itemid=3745&lang=es

[27] Kannan VC, Hodgson N, Lau A, Goodin K, Dugas AF, LoVecchio F. Geolocalization of Influenza Outbreak Within an Acute Care Population: A Layered-Surveillance Approach. West J Emerg Med [Internet] Volume 68, Issue 5, November 2016, Pages 618–626[En Línea] 2016 [Consultado 18 Noviembre 2016]; Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.annemergmed.2016.07.025>

[28] Alerta Epidemiológica. Detección en aves de virus de influenza aviar re-asociado, implicaciones para la salud publica en las Américas. 6 de febrero de 2015. Organización Panamericana de la Salud y Organización Mundial de la Salud. OPS-OMS. [Internet] 2015 [Consultado 06 septiembre 2016]; Disponible en: http://www.paho.org/hq/index.php?option=com_docman&task=doc_view&Itemid=270&gid=29007&lang=es

[29] Temas de salud. Reglamento Sanitario internacional: Organización Mundial de la Salud. OMS. [Internet] 2017 [Consultado 18 diciembre 2016]; Disponible en: http://www.who.int/topics/international_health_regulations/es/

[30] Temas de salud. Salud Ambiental: Organización Mundial de la Salud. OMS. [Internet] 2017 [Consultado 18 diciembre 2016]; Disponible en: http://www.who.int/topics/environmental_health/es/

[31] Raising Geospatial Analysis to GeoIntelligence. Latin America Geospatial Forum. CONACYT-Centro GEO. [Internet] 2015 [Consultado 08 julio 2016]; Disponible en: <http://lagf.org/2014/ppt/Rep%20from%20CenterGeo.pdf>

[32] Xu M, Cao C, Wang D & Kan B. Identifying environmental risk factors of cholera in a coastal area with geospatial technologies. International journal of environmental research and public health. 2014 Dec 29; 12(1):354-70. PubMed PMID: 25551518. PubMed Central PMCID: 4306866. Doi: 10.3390 / ijerph13060600.

[33] Skog L, Linde A, Palmgren H, Hauska H & Elgh F. Spatiotemporal characteristics of pandemic influenza. BMC Infectious Diseases [Internet] BMC Infectious Diseases 2014, 14:378 <http://www.biomedcentral.com/1471-2334/14/378> [Consultado noviembre 2016]; Disponible en: DOI: 10.1186/1471-2334-14-378.

[34] Zhang Y, Shen Z, Ma C, Jiang C, Feng C & Shankar N. Cluster of human infections with avian influenza A (H7N9) cases: a temporal and spatial analysis. International journal of environmental research and public health. 2015 Jan 15; 12(1):816-28. PubMed PMID: 25599373. PubMed Central PMCID: 4306894. doi: 10.3390 / ijerph120100816

[35] Fang LQ, Lou XL, Liu K, Li YK, Yao HW, Liang C, Yang Y, Zi Feng JZ, Gregory GC y Cao WC. Mapping Spread and Risk of Avian Influenza A (H7N9) in China. Scientific Reports [Internet] Scientific Reports 3, Article number: 2722 [Consultado noviembre 2016]; Disponible en: doi: 10.1038/srep02722

[36] Alonso D. Las 10 herramientas de geoprosesamiento que todo Analista GIS debería conocer. Etiquetas: Buffer, Geoprocessing, Habilidades GIS. Mapping GIS.

[Internet] 2016 [Consultado 20 noviembre 2016]; Disponible en: <http://mappinggis.com/2014/10/herramientas-de-geoprocesamiento-en-gis/>

[37] Acuerdo por el que aprueba la Norma Técnica para la Generación, Captación e Integración de Datos Catastrales y Registrales con fines estadísticos y geográficos. Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI-SNIEG. Publicado en el Diario Oficial de la Federación [Internet] 2012 [Consultado 20 noviembre 2016]; Disponible en: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/normastecnicas/doc/nt_datos_catastrales.pdf

[38] Giraldo HR. Introducción a la Geoestadística. Teoría y Aplicación. [Internet] Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Estadística [Consultado 15 enero 2017]; Disponible en: ftp://ftp.ciat.cgiar.org/DAPA/projects/Cursos_Talleres/Curso_R/DOCUMENTOS/LIBRO%20DE%20GEOESTADISTICA.pdf

[39] Steven J, Phillips RP & Anderson RE. Maximum Entropy Modeling of Species Geographic Distributions. MAXENT. [Internet] Ecological Modelling 190 (2006) 231–259 [Consultado 27 diciembre 2016]; Disponible en: http://www.recibio.net/wp-content/uploads/2012/11/Teoria-Maxent_EMM.pdf

[40] El riesgo de introducción y diseminación de Influenza Aviar [Internet] [Consultado diciembre 28 2016]; Disponible en: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/a0632s/a0632s03.pdf>

[41] Keiko AH, Falk H & Lindgren MA. A global model of avian influenza prediction in wild birds: the importance of northern regions. [Internet] Veterinary Research. Doi.org/10.1186/1297-9716-44-42 [Consultado 18 diciembre 2017]; Consultado en: <https://veterinaryresearch.biomedcentral.com/articles/10.1186/1297-9716-44-42>

[42] Castillo RJJ, Gamma y Zequeira LC. Análisis de regresión lineal en un sistema de información geográfico para determinar la tasa de deforestación en el estado de Tabasco. 2008. Kuxulkab. Revista de divulgación. División Académica de Ciencias

Biológicas Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. [Internet] ISSN 1665-0514. [Consultado 5 diciembre de 2017]; Consultado en: <http://www.dgbiblio.unam.mx>

[43] Gallardo A. Geoestadística. Ecosistemas. Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente.2006 [Internet] España. [Consultado 8 diciembre de 2017]; Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/revista?codigo=1887>

[44] Díaz VA y González CR. Geoestadística Aplicada. Universidad Nacional Autónoma de México. [Internet] 2009. [Consultado 16 diciembre 2016]; Disponible en: http://mmc2.geofisica.unam.mx/cursos/gest/Presentaciones/CG1_2009.pdf

[45] William F y Trevor H. Finite-Sample Equivalence of Several Statistical. Models for Presence-Only Data. Department of Statistics. Stanford University. [Internet] July 31, 2012. [Consultado 14 diciembre 2017]; Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4258396/>

[46] Cory M, Matthew JS, John AS, C. Merow & Silander JA. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. Univ. Of Connecticut, Ecology and Evolutionary Biology, Computational Ecology and Environmental Science Group, Computational Science Laboratory. DOI: 10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x

[47] Steven J, Phillips RP & Anderson RE. Maximum Entropy Modeling of Species Geographic Distributions. MAXENT. [Internet]. Ecological Modelling 190 (2006) 231-259 [Consultado 27 diciembre 2016]; Disponible en: http://www.recibio.net/wp-content/uploads/2012/11/Teoria-Maxent_EMM.pdf

[48] Xu M, Cao C, Wang D & Kan B. Identifying environmental risk factors of cholera in a coastal area with geospatial technologies. International journal of environmental research and public health. 2014 Dec 29; 12(1):354-70. PubMed PMID: 25551518. PubMed Central PMCID: 4306866. Doi: 10.3390 / ijerph13060600.

[49] Smietanka K, Bocian L, Meissner W, Zietek-Barszcz A & Zolkos K. Assessment of the Potential Distance of Dispersal of High Pathogenicity Avian Influenza Virus by Wild Mallards. Avian diseases. 2016 May; 60(1 Suppl):316-21. PubMed PMID: 27309073.

[50] Ward MP, Maftai DN, Apostu CL & Suru AR. Association between outbreaks of highly pathogenic avian influenza subtype H5N1 and migratory waterfowl (family Anatidae) populations. *Zoonoses and public health*. 2009 Feb; 56(1):1-9. PubMed PMID: 18793277.

[51] Kemp, M.U., Shamoun-Baranes, J., Dokter, A.M., van Loon, E. & Bouten, W. (2013). The influence of weather on the light altitude of nocturnal migrants in mid-latitudes. DOI: 10.1111/ibi.12064.

[52] Confirman brote de Influenza Aviar de Alta Patogenicidad Tipo H7N3 en Jalisco, México. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. [Internet] 2017 [Consultado 8 diciembre 2017]; Disponible en: <http://www.fao.org/americas/noticias/ver/es/c/229681/>

[53] Stein LM, Rudge WJ, Coker R, Van Der Weijden C, Krumkamp R, Hanvoravongchai P, Chávez I, Putthasri W, Phommasack B, Adisasmito W, Touch S, Sat ML, Hsu Y-C, Kretzschmar M & Timen A. Development of a resource modelling tool to support decision makers in pandemic influenza preparedness: BioMed Central Ltd. 2012 [En línea] The AsiaFluCap Simulator. *BMC Public Health* 2012 12: 870 [Consultado 13 noviembre 2017] DOI: 10.1186 / 1471-2458-12-870

[54] Gutiérrez PJC, García P y Cardozo OD. Regresión Geográficamente Ponderada (GWR) y estimación de la demanda de las estaciones del Metro de Madrid. J XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. [Internet] Madrid, AGE-CSIC, 19-21 de septiembre de 2012. [Consultado 4 enero 2018]; Disponible en: http://www.age-geografia.es/tig/2012_Madrid/ponencia2/GutierrezPuebla_final_par.pdf

[55] Análisis Espacial del Delito: la Relación entre el Delito y las Características Sociodemográficas en las Delegaciones Benito Juárez, Coyoacán y Cuauhtémoc del D. F. [Internet]. 2010. Omar Armando Sánchez Salinas. Tijuana, B. C., México 2014. [Consultado 4 enero 2018]; Disponible en: <https://www.colef.mx/posgrado/wp-content/uploads/2014/11/TESIS-S%C3%A1nchez-Salinas-Omar-Armando.pdf>

[56] Hernando SF. Estudio de los Barrios Preexistentes y Emergentes: La Trama Urbana y su Relación con la Seguridad, Consideraciones Prácticas sobre el Urbanismo y la Inseguridad. [Internet] 2007. Universidad Complutense de Madrid.[Consultado 2 enero 2018]; Disponible en: <http://www.madrid.es/UnidadWeb/Contenidos/Publicaciones/TemaEmergencias/PonenciasCongresoCiudades/Ficheros/Parte2.1.pdf>

[57] Fraile P y Bonastra Q. 2011. Espacio, Delincuencia y Seguridad: Hacia El Diseño de un Modelo de Análisis Territorial. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles Nº 57. Departamento de Geografía y Sociología. Universidad de Lleida. [Internet] I.S.S.N.: 0212-9426. [Consultado 3 enero 2018]; Disponible en: <https://repositori.udl.cat/bitstream/handle/10459.1/46537/018719.pdf?sequence=1>

[58] Spatial Analyses of Crime, in Measurement and Analysis of Crime and Justice. Vol 4. U.S. Department of Justice, Washington, DC. 2000. [Internet] NCJ 182411 [Consultado 23 diciembre 2017]; Disponible en: https://www.ncjrs.gov/criminal_justice2000/vol_4/04front.pdf

[59] Tannure CL, Mazza SM & Giménez LI. Modelos para caracterizar los patrones de distribución espacial de *Aphis gossypii* (Homóptera: Aphididae), en el cultivo de algodón (*Gossypium hirsutum*). [Internet] Facultad de Cs. Agrarias - UNNE. Corrientes - Argentina. INTA - EEA Sombrierito. [Consultado 5 enero 2018]; Disponible en: <http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt/2002/05-Agrarias/A-034.pdf>

[60] Cory M, Matthew JS, John AS, C. Merow y Silander JA. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. Univ. Of Connecticut, Ecology and Evolutionary Biology, Computational Ecology and Environmental Science Group, Computational Science Laboratory. DOI: 10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x

[61] Díaz VA y González CR. Geoestadística Aplicada. Universidad Nacional Autónoma de México. 2009. [Consultado el 16 de diciembre 2016] http://mmc2.geofisica.unam.mx/cursos/gest/Presentaciones/CG1_2009.pdf

[62] Regresión Geográficamente Ponderada (GWR) y estimación de la demanda de las estaciones del Metro de Madrid. J. Gutiérrez-Puebla, J.C. García-Palomares y O. Daniel-Cardozo. XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, Madrid, AGE-CSIC, 19-21 de septiembre de 2012.

[63] Hernando Sanz Felipe, 2007, Estudio de los Barrios Preexistentes y Emergentes: La Trama Urbana y su Relación con la Seguridad, Consideraciones Prácticas Sobre El Urbanismo y La Inseguridad, Universidad Complutense de Madrid.

[64] Anselin et al, 2000 Spatial Analyses of Crime, en Measurement and Analysis of Crime and Justice vol 4. U.S. Department of Justice, Washington, DC.

[65] Tirado F, Gomez A y Rocamora V. The global condition of epidemics: Panoramas in A (H1N1) influenza and their consequences for One World One Health programme. Social science & medicine. 2015 Mar;129:113-22. PubMed PMID: 25218795. DOI: 10.1016/j.socscimed.2014.09.003

[66] Colemin JP. 2009. Autocorrelación espacial e indicadores locales de asociación espacial. Importancia, estructura y aplicación. Rev. Univ. Geogr. vol.18 no 1 Bahía Blanca 2009. Universidad Nacional del Mar ISSN 1852-4265

[67] Kim B, Marius G, & Pfeiffer DU. Modeling habitat suitability for occurrence of highly pathogenic avian influenza virus H5N1 in domestic's poultry in Asia: A spatial multicriteria decision analysis approach. Spatial and Spatio-temporal Epidemiology. 4(2013) 1-14. EL SEVIER.

[68] El riesgo de introducción y diseminación de Influenza Aviar [Internet].FAO [citado el 23 de junio de 2018]. Disponible en: <http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/010/a0632s/a0632s03.pdf>

[69] Herrick KA, Huettmann F, Lindgren MA. A global model of avian influenza prediction in wild birds: the importance of northern regions. Vet Res. el 13 de junio de 2013;44:42. . <https://doi.org/10.1186/1297-9716-44-42>

[70] Moriguchi S, Onuma M, Goka K. Potential risk map for avian influenza A virus invading Japan. *Divers Distrib.* 19(1):78–85

[71] Belkhiria J, Alkhamis MA, Martínez-López B. Application of Species Distribution Modeling for Avian Influenza surveillance in the United States considering the North America Migratory Flyways. *Sci Rep.* 14 de 2016;6:33161

[72] Belkhiria J, Hijmans RJ, Boyce W, Crossley BM, Martínez-López B. Identification of high risk areas for avian influenza outbreaks in California using disease distribution models. *PLOS ONE.* el 31 de enero de 2018;13(1):e0190824

17. Anexos

1. Oficio SENASICA-SAGARPA



DIRECCIÓN GENERAL DE SANIDAD VEGETAL
Dirección del Centro Nacional de Referencia Fitosanitaria

Nº de Oficio B00.01.04. **05963** /2016

Ciudad de México, a 22 JUN 2016

MTRO. JAVIER ESQUINCA ANDRADE
DIRECTOR GENERAL DE ADMINISTRACIÓN E INFORMÁTICA
PRESENTE

Me refiero al oficio CE 035 /2016 del Coordinador Ejecutivo de los Programas IICA- SENASICA, mediante el cual solicita un breve informe de los logros alcanzados y beneficios obtenidos dentro del Programa Operativo para el Fortalecimiento Técnico-Administrativo de la Capacidad de Vigilancia Epidemiológica, Detección, Diagnóstico y Atención de Riesgos Fitozoosanitarios del SENASICA 2015; al respecto, le comunico de los siguientes logros y beneficios en las materias de vigilancia epidemiológica y diagnóstico fitosanitario:

El Programa de Vigilancia Epidemiológica y Diagnóstico de Plagas y Enfermedades de las Culturas Agrícolas (PEDE) que se desarrolla en los 32 Estados del país, mediante el fortalecimiento de las capacidades técnicas y administrativas de los equipos de trabajo, se ha logrado el diagnóstico de plagas reguladas en cultivos agrícolas, en beneficio directo de más de 17 mil productores.

Mediante el apoyo del PEDE se ha logrado la identificación oportuna de plagas de importancia cuarentenaria, realizando las acciones de eliminación, contención y erradicación, así como la implementación de medidas fitosanitarias de contención, en áreas afectadas por (entre otros plagas) en áreas urbanas de Tijuana, Baja California, Culiacán, Durango, Guerrero, Jalisco, Querétaro, Quintana Roo, Yucatán, Chiapas, Oaxaca, Veracruz y Hidalgo, así como en San Juan de los Ríos, Oaxaca y Tlaxiaco, Oaxaca.

La operación del Programa permitió que se desarrollara en México el Taller Internacional para la Erradicación de la Plaga de la Mosca de la Sembradura (MSE) conocida como Ivar de Dama (E. exigens), en el marco de la cooperación técnica con la asistencia de 60 personas de Uruguay, Argentina, Brasil, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras, Costa Rica, República Dominicana y México.

En el marco de la Estrategia Nacional Digital, se ha cristalizado una infraestructura de datos geoespaciales fitosanitarios (<http://sinavef.senasica.gob.mx/siivef/>), consolidando así, el uso de la tecnología geoespacial como el uso del Smartphone, sistemas de información geográfica, servidores de mapas e información georreferenciada, para dar soporte a la toma de decisiones en materia fitosanitaria, en el potencial de introducción, establecimiento y dispersión (natural y antrópica), incorporando el componente económico, desde una escala local hasta escalas a nivel continente o mundial.

Nº de Oficio B00.01.04. **05963** /2016

Ciudad de México, a **22 JUN 2016**

MTRO. JAVIER ESQUINCA ANDRADE
DIRECTOR GENERAL DE ADMINISTRACIÓN E INFORMÁTICA
PRESENTE

[REDACTED]

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un saludo cordial.

ATENTAMENTE

Con fundamento en lo dispuesto por los artículos 1, 2, letra D, fracción VII, 42, 45, párrafo segundo del Reglamento Interior de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación en vigor, publicado en el Diario Oficial de la Federación el día 25 de abril del año 2012, firma en suplencia por ausencia del C. Director General de Sanidad Vegetal del Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria,

EL DIRECTOR DE PROTECCIÓN FITOSANITARIA



M.C. PEDRO CARRANZA VÁZQUEZ



C.C.P. MVZ. ENRIQUE SÁNCHEZ CRUZ.- DIRECTOR EN JEFE DEL SENASICA - gestion@senasica.gob.mx
DR. FRANCISCO JAVIER TRUJILLO ARRIAGA.- DIRECTOR GENERAL DE SANIDAD VEGETAL.- gestion.dgsv@senasica.gob.mx
M.C. JOSÉ ABEL LÓPEZ BUENFIL.- DIRECTOR DEL CENTRO NACIONAL DE REFERENCIA FITOSANITARIA.- abel.lopez@senasica.gob.mx
L.I.C. MIGUEL ALBERTO ABIACA LEE.- COORDINADOR EJECUTIVO DE LOS PROGRAMAS IICA- SENASICA.- dj.iica3@senasica.gob.mx

NST 03677

JAB/VTT
P.A.

Página 2 de 2

2. Carta de no conflicto de intereses.

San Luis Potosí, S.L.P. a 20 de enero del 2017

Carta de no conflicto de interés

A quien corresponda:

A través del presente documento en pleno uso y razón de nuestras facultades mentales los al final expuestos "Coincidimos en que no existen conflictos de interés ético y profesional" en la generación y resultados (las ponencias y publicaciones) que surjan de la investigación intitulada "Estimación de escenarios en el potencial de introducción, establecimiento y dispersión de la Influenza Tipo "A", como un riesgo a la Salud Pública en México; bajo la perspectiva de la Geointeligencia Sanitaria"; la cual se desarrolla en el Posgrado en Salud Pública de la Facultad de Enfermería y Nutrición de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, en coasesoría con las siguientes instituciones el Colegio de Postgraduados campus Montecillos en Texcoco estado de México así como el Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Guadalajara.

Es conveniente resaltar que se dará crédito a los cuatro participantes en el siguiente orden; como autor principal se establece al Lic. en Geografía Enrique Barra Zapata como investigador principal; en segundo orden se establece el Dr. Darío Gaytán Hernández quien funge como director de tesis, en tercer orden el Dr. Gustavo Mora Aguilera quien funge como coasesor, así como el Dr. Miguel Ernesto González Castañeda que funge como coasesor.

Por lo que todos tendrán obligaciones éticas con respecto a la publicación de los resultados de Investigación y serán responsables de la integridad y exactitud de los resultados obtenidos, además de aceptar en común acuerdo las normas éticas de entrega de información, para lo cual será necesario la publicación de los resultados en las revistas nacionales y extranjeras pertinentes.

De igual forma se establece que en el financiamiento de publicaciones u otros productos derivados de la presente investigación serán solventados de manera equitativa entre los cuatro involucrados, de mismo modo se establece que el orden

de los autores en posteriores publicaciones o ponencias varia en orden la publicación del director y coasesores, respetando la segunda autoría para el investigador principal en todos los casos.

En este sentido se firma de mutuo acuerdo de los involucrados a fin de contribuir al quehacer científico de las Universidades e Investigadores antes expuestos el día 20 de enero de 2017.



Licenciado en Geografía Enrique Ibarra Zapata



Dr. Darío Gaytán Hernández FEyN-UASLP



Dr. Gustavo Mora Aguilera COLPOS.



Dr. Miguel Ernesto González Castañeda UG.

3. Carta de aprobación del Comité Académico de Salud Pública.



**ENRIQUE IBARRA ZAPATA
ALUMNO DE LA MAESTRIA ES SALUD PÚBLICA
GENERACION 2016-2018
P R E S E N T E.-**

Por este conducto le informamos que en sesión del Comité Académico de Salud Pública, celebrada el 27 de marzo del presente año, se registró y aprobó su protocolo de tesis denominado "ESTIMACIÓN DE ESCENARIOS EN EL POTENCIAL DE INTRODUCCIÓN, ESTABLECIMIENTO Y DISPERSIÓN DE LA INFLUENZA TIPO "A"; COMO UN RIESGO A LA SALUD PÚBLICA BAJO LA PERSPECTIVA DE LA GCOINTELIGENCIA SANITARIA", Con clave GIX 05-2017.

Sin otro particular, reiteramos la seguridad de nuestra atenta y distinguida consideración.

"SIEMPRE AUTÓNOMA. POR MI PATRIA EDUCARÉ"

Integrantes del CA-MSP

Dra. Yesica Yolanda Rangel Flores

Dra. Verónica Gallegos García

Dr. Luis Eduardo Hernández Ibarra

MSP. Ma. Guadalupe Guerrero Rosales

Dra. Ma. Del Carmen Pérez Rodríguez

Dra. Claudia Inés Victoria Campos

Dr. Darío Gaytán Hernández

Dra. Paola Algara Suarez

FIRMA

Yesica Rangel
Verónica Gallegos
Luis Eduardo Hernández Ibarra
Ma. Guadalupe Guerrero Rosales
Ma. Del Carmen Pérez Rodríguez
Claudia Inés Victoria Campos
Darío Gaytán Hernández
Paola Algara Suarez



**FACULTAD DE
ENFERMERÍA
Y NUTRICIÓN**

Av. Niño Artillero 130
Zona Universitaria • CP 78240
San Luis Potosí, S.L.P., México
tels. (444) 826 2300
Ext. Recepción 5010 y 5011
Administración 5063
Posgrado 5071
www.uaslp.mx

📎 Archivo Posgrado
DRA.YYRF/rpm

4. Carta de Aceptación del Comité de Ética en Investigación de la FEyN



UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí

**EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN POR EL COMITÉ DE ÉTICA EN
INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE ENFERMERÍA Y NUTRICIÓN DE LA UASLP.**

Título del proyecto: Estimación de escenarios en el potencial de introducción, establecimiento y dispersión de la influenza tipo A, como un riesgo a la Salud Pública en México, bajo la perspectiva de la Geointeligencia Sanitaria.

Responsable: Enrique Ibarra Zapata.

Fecha: 3 de mayo de 2017.

Criterios	Presente	Ausente	No Aplica	Observaciones
1. Se incluye el título del proyecto.	X			
2. Se mencionan autores, coautores y colaboradores.	X			
3. El protocolo de investigación incluye los elementos mínimos señalados en el anexo 2.	X			
4. Presenta el apartado de consideraciones éticas y legales.	X			
5. Muestra coherencia de los elementos éticos presentados con especificidad y fundamentación al tipo de estudio.	X			
6. Menciona la normatividad nacional e internacional sobre los elementos éticos a desarrollar en el proyecto, desde su estructuración hasta la publicación de resultados.	X			
7. Señala la coherencia de los elementos metodológicos a desarrollar con los aspectos de consideración ética.	X			
8. Presenta carta de consentimiento informado de acuerdo a la especificidad metodológica y riesgo del estudio.	X			
9. Se explicita el apoyo financiero con relación al compromiso de la publicación de los resultados.	X			
10. Presenta la declaración y especificación de la ausencia de conflictos de interés de los miembros del equipo para el desarrollo del proyecto.	X			
11. Aclara los mecanismos de transferencia de los productos de la investigación. (Patente)			X	
12. Especifica los procedimientos para garantizar el derecho de autor en la investigación. (Carta de no conflicto de intereses)	X			



**FACULTAD DE
ENFERMERÍA
Y NUTRICIÓN**

Av. Niño Artillero 130
Zona Universitaria - CP 78240
San Luis Potosí, S.L.P., México
tels. (444) 826 2300
Ext. Recepción 5010 y 5011
Administración 5063
Posgrado 5071
www.uaslp.mx



UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí

Dictamen: Se otorga registro CEIFE-2017-215 condicionado a presentar la carta de no conflicto de interés firmada por los involucrados. Se solicita enviar dicho documento al correo de este comité ceife.uaslp@gmail.com en un plazo de cinco días hábiles.

Atentamente,

COMITÉ DE ÉTICA EN INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE ENFERMERÍA Y NUTRICIÓN



FACULTAD DE
**ENFERMERÍA
Y NUTRICIÓN**

Av. Niño Artillero 130
Zona Universitaria • CP 78240
San Luis Potosí, S.L.P., México
tels. (444) 826 2300
Ext. Recepción 5010 y 5011
Administración 5063
Posgrado 5071
www.uaslp.mx

18. Artículo No.1: Revista Panamericana de Salud Pública.

Escenario e riesgo de introducción del agente causal de la influenza tipo A en México.

Ibarra-Zapata E¹, Gaytán-Hernández D¹, Mora Aguilera G² y González Castañeda ME³.

Posgrado en Salud Publica Facultad de Enfermería y Nutrición Universidad Autónoma de San Luis Potosí ¹; Laboratorio de Referencia Epidemiológica Fitosanitaria Colegio de Postgraduados Campus Montecillos Texcoco Estado de México ²; Departamento de Geografía y Ordenación Territorial Universidad de Guadalajara ³.

Resumen

Objetivo: Estimar el escenario potencial probabilístico de introducción del agente causal de la influenza tipo A en México a través de la geointeligencia sanitaria.

Métodos: Estudio ecológico, considerando 1973 brotes de influenza altamente patógena en el mundo del periodo 2014-2016; se desarrolló modelado geoespacial con herramientas de la geointeligencia, como la representación espacial, modelo de conectividad, caracterización espacial de la fuente de inóculo con el modelo de máxima entropía y la curva COR; a través de la evaluación espacial multicriterio y se validó con el índice de Moran y la regresión geográficamente ponderada.

Resultados: Se dedujeron las Isócronas de riesgo sanitario con una distancia de 548 km y su crecimiento exponencial; hasta la tercer isócrona se identificaron la

costa Este y Oeste de Estados Unidos y una porción de Centro América como posible superficie que favorece la introducción del patógeno, asimismo, se obtuvo una curva $COR=0.923$; se identificaron dos periodos de riesgo de introducción septiembre-marzo y abril-agosto con trayectorias de norte-sur y sur-norte respectivamente, con alta autocorrelación positiva para el modelado geoespacial, se estimó un escenario donde más de la mitad del territorio nacional 50.6% se encuentra en un riesgo alto de introducción con 78 millones de personas expuestas. Se identificó una asociación positiva entre las áreas de riesgo significativamente ($p<0.001$).

Conclusión: Se evidencia que más del 50% del territorio nacional se encuentra en riesgo de introducción del agente causal de la influenza tipo A con cerca del 70% de la población expuesta.

Palabras Clave: Escenario de riesgo, Agente Causal, Influenza, Análisis Espacial, México

Introducción

La influenza tipo A es una enfermedad infecciosa causada por un virus de la familia Orthomyxoviridae y puede clasificarse tanto como de baja patogenicidad como altamente patógenos [1]. A nivel global algunas cepas de la influenza tipo “A” pueden tener altas tasas de mortalidad, incluso, para 2017 la *Organización Mundial de la Salud* (OMS), publica los primeros reportes de serotipos altamente patógenos con la capacidad de afectar a los seres humanos; como H5N1 y H7N9 con una tasa de mortalidad de 27% y 60% respectivamente [2], lo alarmante desde una perspectiva epidemiológica es que en ambos casos existe gran capacidad de mutación y con ello la posibilidad generar nuevas recombinaciones de las que no existen estudios de su comportamiento y riesgo asociado.

En este sentido el agente causal de la influenza tipo A se considera un grave problema para la salud mundial, ya que, pueden existir hasta 144 recombinaciones posibles según las Hemaglutininas y Neuraminidasas de superficie que las componen [3]; y además, el riesgo se potencializa por la existencia de múltiples hospederos y los mecanismos de dispersión de este tipo de virus, que implícitamente otorga un gran potencial pandémico

De acuerdo con la OMS, en años recientes han existido brotes de alta y baja patogenicidad en varias regiones del mundo donde se considera una enfermedad compleja con graves repercusiones en la salud de la población en Europa, América, así como Asia y Oriente Medio [5],[6],[7]; incluso, se considera una enfermedad trasfronteriza, ya que, ha cruzado la barrera entre las especies animal y humana [4], además, ha presentado un impacto severo en la economía y la salud pública en regiones donde se consideran endémicos virus altamente patógenos [8].

Se dice que de cinco nuevas enfermedades humanas que aparecen cada año en el mundo, tres son de origen animal y que al menos un 75% de los agentes patógenos de

enfermedades infecciosas reemergentes del ser humano son de origen zoonótico como las variantes del agente causal de la influenza tipo A [12].

Por lo que las enfermedades reemergentes representa un riesgo global para la salud pública; puesto que existen reservorios y mecanismos de dispersión que favorecen la propagación de la misma, ya que el dinamismo del mundo actual con la globalización, el cambio climático y el comportamiento humano; multiplican las oportunidades para que los patógenos colonicen nuevos territorios y evolucionen bajo nuevas formas o serotipos [13]; y estos se conviertan en riesgos potenciales para integridad humana.

Entre octubre de 2014 y diciembre de 2016 se reportó la existencia de 1973 brotes de influenza altamente patógena en el mundo, con dictámenes positivos avalados por laboratorios de la OMS [1] y la *World Organisation for Animal Health* (OIE) [12]; los cuales espacialmente se distribuyeron en el Sureste Asiático, Medio Oriente, África Central y brotes dispersos en Asia, Europa, África del Norte y Norte América (Figura 3).

La complejidad de los problemas en salud pública en el mundo actual, hace que se perciban como un “poliedro” conformado por múltiples y cambiantes perspectivas, lo que justifican la variedad de enfoques con las que se deben abordar dichas problemáticas[14]; como el análisis y modelado espacial, donde se aborda el riesgo de introducción que representa el agente causal de la influenza altamente patógena, ya que como brote, la situación en salud puede modificarse rápidamente y esto traer consecuencias negativas para la salud humana, lo que implica una evaluación y acciones inmediatas [15].

Por ello el incorporar enfoques alternativos debería ser la forma de abordar, comprender y atender este tipo de enfermedades [16]; a través del uso e implementación de métodos y técnicas de carácter geoespacial/epidemiológico; ya que permiten modelar las posibles

áreas de riesgo de introducción de un patógeno hacia un territorio determinado, evidenciando el riesgo sanitario basado en el contexto espacio temporal.

El modelado geoespacial se sustenta en el enfoque de la geointeligencia que se refiere a la explotación y análisis avanzado de datos obtenidos por sistemas de colección de información geoespacial; bajo un enfoque transdisciplinario dirigido a los tomadores de decisiones [17]. Y epidemiológicamente se soporta en el concepto de *“una sola salud”* que señala que la salud humana y la sanidad animal son interdependientes y están vinculadas a los ecosistemas en los cuales coexisten [13].

Donde es fundamental incorporar una visión integradora mediante el análisis exploratorio de datos espaciales (AEDE); ya que los hallazgos proporcionan información al tomador de decisiones en salud pública; para prestar atención adicional a la planificación espacial de medidas de control de ante enfermedades reemergentes[18];

El objetivo de la presente investigación fue estimar el escenario de potencial probabilístico de introducción (Ppi) del agente causal de la influenza tipo A en México; a través de métodos y técnicas de carácter geoespacial.

Materiales y métodos

Se trata de un estudio ecológico cuantitativo con información geográficamente referida, la cual se considera el insumo principal en la estimación del escenario de Ppi; y como universo 1973 brotes ocurridos en el mundo entre 2014-2016; incluyendo todos los subtipos aislados [5]; en asociación con los factores epidemiológicos [20].

El modelado geoespacial considera como eje rector el concepto de contagio que involucra el número de eventos espaciales, la intensidad de la cepa, el análisis epidemiológico y el análisis espacial, que se integran y desarrollan en 5 etapas:

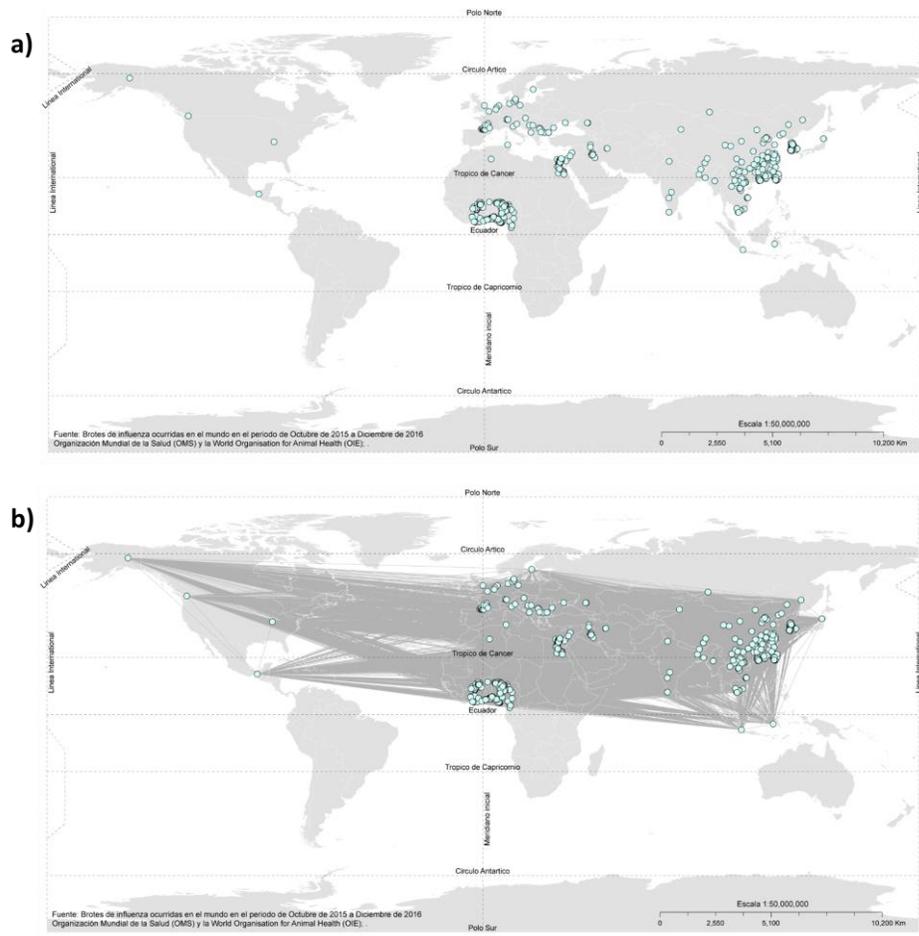
1era etapa: Se realizó la representación espacial de la ubicación de los brotes en un sistema de coordenadas, ya que, la agrupación de brotes puede representar poblaciones en riesgo [10], por lo que, se definió como el insumo detonante para estimar el escenario de Ppi (Figura 3).

2da etapa: Se realizó un modelo de conexidad de los brotes (Figura 1) para estimar las *medidas de tendencia central y las medidas de dispersión* que permiten delimitar territorialmente superficies a través de la denominada distancia general (D_g); donde se considera un nodo de interés (México) y nodos de origen (todas las detecciones); representando en la siguiente ecuación:

$$D_g = \left(\frac{\sum (d_{ni/nO1}) + (d_{ni/nO2}) + (d_{ni/nO3}) + \dots + (d_{ni/nO1972}) + (d_{ni/nO1973})}{\sum (d_{nO1/nO1}) + (d_{nO1/nO2}) + (d_{nO1/nO3}) + \dots + (d_{nO1/nO1972}) + (d_{nO1/nO1973}) + \sum (d_{nO1973/nO1}) + (d_{nO1973/nO2}) + (d_{nO1973/nO3}) + \dots + (d_{nO1973/nO1972}) + (d_{nO1973/nO1973}/N) / N} \right) \text{ Donde;}$$

Dg: Distancia general
D: Distancia
ni: nodo de interés
No: Nodo de Origen
N: Total de detecciones

Figura 1.- Modelo de conexidad de las detecciones de influenza altamente patógena en el mundo en el periodo de 2014 a 2016.



Fuente: Elaboración propia con información de la OMS-OIES; 2014-2016

De esta forma se estiman los insumos para el cálculo de las Isócronas de riesgo sanitario (Is-RS), semejante a lo publicado por Smetanka K. *et al.*, 2015, [11]; tomando como base la técnica de estadística clásica de *análisis de la relación* (σ^2/μ) (varianza: media) [21]; con crecimiento exponencial; a través de la denominada área de influencia [5], donde se consideró una media de 6,825 km y desviación estándar de 6,277 km obtenidos del modelo de conexidad como insumos para el cálculo con la siguiente ecuación:

Is-RS= (d^{med}-desvest)^x; donde:

Is-RS: Isócronas de Riesgo Sanitario

d^{med}: Distancia Media

desvest: Desviación estándar

x: Crecimiento exponencial

Geoestadísticamente el modelo crea una red de conectividad de entre los nodos; es decir establece una distancia media ponderada como una imaginaria referencial, de la cual se obtiene una Is-RS inicial de 548 Km y su crecimiento a seis Is-RS; las cuales permiten describir la continuidad espacial visto como un fenómeno territorial; e involucra funciones para modelar la variación territorial y con ello interpolar en el espacio en el valor del área de influencia [22],[23],[24]; en el denominado espacio euclidiano (Figura 4).

3era etapa: Involucró la caracterización del área de fuente de inóculo para entender la ecología viral del agente causal de la influenza tipo A [5], a través del algoritmo de máxima entropía, que de acuerdo con diferentes autores [25],[26]; Además, con este modelo se determinó la curva COR para evaluar la estimación del modelo y las variables que inciden en el mismo así como el peso que representan.

Dicho modelo posee gran efectividad en estimar áreas semejantes ambientalmente hablando [27],[28]; e incluso ha sido de gran utilidad en la estimación de escenarios de la influenza de alta patogenicidad en el Sureste Asiático y otras regiones del planeta [28],[29],[30].

Estadísticamente considera un método para la evaluación de errores de predicción en modelos de presencia / ausencia, mediante la asociación espacial de 19 variables ambientales con criterios biológicamente significativos (BIOCLIM) con una resolución espacial de 0.5 grados [31]; lo que permite definir las áreas de confort para la especie y son descritas de la siguiente forma:

BIO1 = Temperatura media anual

BIO2 = Rango diurno medio

BIO3 = Isotermalidad (BIO2 / BIO7) (* 100)
BIO4 = Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar * 100)
BIO5 = Temperatura máxima de la temperatura más cálida Mes
BIO6 = Temperatura mínima del mes más frío
BIO7 = Rango anual de temperatura
BIO8 = Temperatura media del trimestre más húmedo
BIO9 = Temperatura media del trimestre más seco
BIO10 = Temperatura media del trimestre más cálido
BIO11 = Temperatura media del trimestre más frío
BIO12 = Precipitación anual
BIO13 = Precipitación del mes más húmedo
BIO14 = Precipitación del mes más seco
BIO15 = Temporada de precipitación
BIO16 = Precipitación del cuarto más húmedo
BIO17 = Precipitación del cuarto más seco
BIO18 = Precipitación del cuarto más cálido
BIO19 = Precipitación del cuarto más frío

Además, el modelo involucró criterios de exclusión espacial como: la duplicidad en la ubicación y falta de exactitud de los brotes o detecciones (excluyendo datos con menos de cuatro dígitos después del punto).

4ta etapa: involucró la caracterización de los mecanismos de dispersión en el área fuente de inóculo apoyado en la hipótesis de que uno de los principales componentes que favorecen la dispersión, se asocia a las rutas de aves migratorias [32],[6],[8]; ya que, estas son transmisoras secundarias de virus altamente patógenos y reservorios primarios de virus de influenza aviar de baja patogenicidad [9].

Por tal motivo, se incorporaron dicha variable, tomando como referencia los dos periodos de septiembre a marzo con trayectorias de norte a sur, y de abril a agosto con trayectorias de sur a norte identificados por Kranstauber *et al.*, (2015) [33]; a partir de los cuales se realizó un proceso de sobreposición geométrico cartográfico de las coberturas antes mencionadas. Y altitudinalmente: se identifican distancias de 10 a 700 metros sobre nivel de suelo; que representan el rango de altitudes donde se observa la mayor parte de la migración en estudios con radar [34].

En la 5ta etapa: Se realizó la integración de las variables en la estimación del Ppi mediante la EEMC que involucra la asignación de pesos conforme a revisión de resultados de estudios de influenza realizados a través de una matriz de valoración con base en una escala de valores de 0.0 a 0.9, realizando análisis de diferencias espaciales mediante la relación nodo/punto; línea/red y topología de polígono, según los criterios epidemiológicos del agente causal de la influenza bajo la siguiente ecuación:

$$Ppi = [\textit{interacción espacial (Área de influenza \& Fuente de inocular \& Rutas intercontinentales de aves migratorias)}]$$

Posteriormente, mediante el operador espacial topológico “AND”; que analizó la geometría lógica del riesgo de introducción caracterizando el territorio nacional en los 5 rangos definidos (Tabla 1).

Tabla 1.- Variables y pesos asignados para estimar el potencial probabilístico de introducción del agente causal de la influenza tipo A a través del EEMC.

Variable y relación	Definición operacional	Técnica de asignación de pesos	Pesos para la EEMC	Rangos en la representación de Ppi
Área de influencia (topología de polígono)	Área de riesgo en la introducción del agente causal de la influenza	$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i$	0.3	
Fuente de inóculo (topología de polígono)	Superficies caracterizadas según la aptitud ambiental para el agente causal de los virus de la influenza	Donde:	0.3	Muy alto (0.8 -0.9)
Rutas de aves migratorias (nodo/punto & línea/red)	Mecanismo de dispersión definidos en dos periodos espacio temporalmente caracterizados.	<i>S = Potencial Pirobalístico en una escala de 0.0 a 0.9, w_i = valor de importancia del factor//subfactores i, x_i = factor i estandarizado con las funciones de membresía.</i>	0.4	Alto (0.6 -0.7) Medio (0.4 – 0.5) Bajo (0.2 -0.3) Muy bajo (0.0 -0.1)

Fuente: elaboración propia en base a la aptitud de las variables.

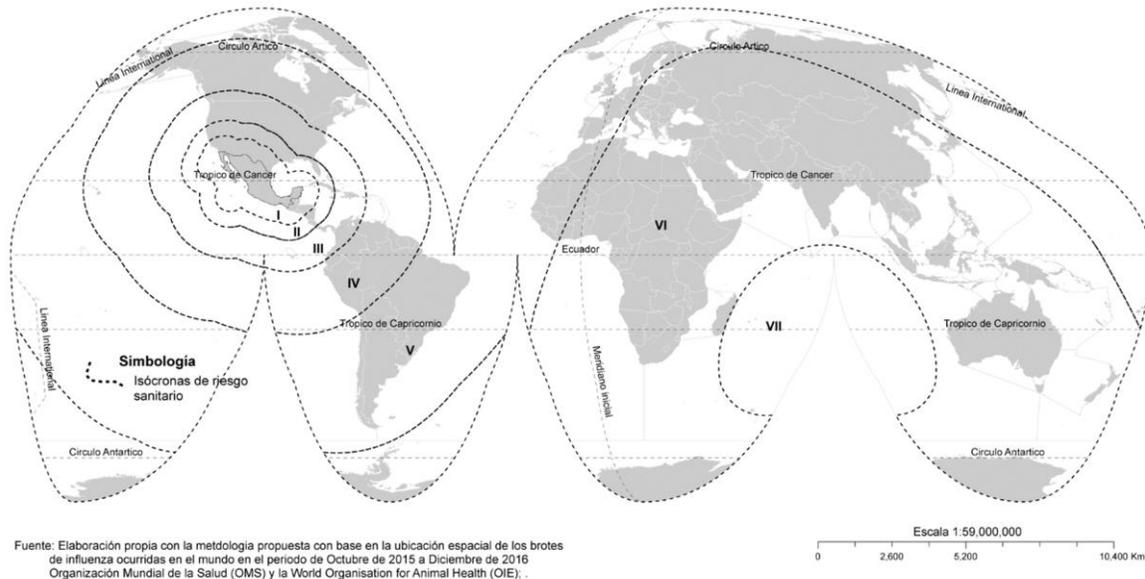
Resultados

En la primera etapa se obtuvo la representación espacial de los brotes, evidenciando clústers en el Sureste Asiático, Medio Oriente, Europa y África Central; así como brotes aislados en el Continente Americano (Figura 1a).

En la segunda etapa se evidencian el área de fuente de inóculo mediante las cuatro primeras Is-RS aludiendo al principio geográfico de proximidad bajo la primera ley de Tobler que señala; *“Todas las cosas están relacionadas entre sí, pero las cosas más próximas en el espacio tienen una relación mayor que las distantes”*.

Por ello se determina que las primeras cuatro Is-RS se consideran el primer componente en la estimación del Ppi del agente causal de la influenza; caracterizando un área de influencia de 2,192 km denominada “área de fuente de inóculo”(Figura 2).

Figura 2.- Ubicación brotes e isócronas de riesgo sanitario del agente causal de la influenza altamente patógena en el periodo de 2014 a 2016.

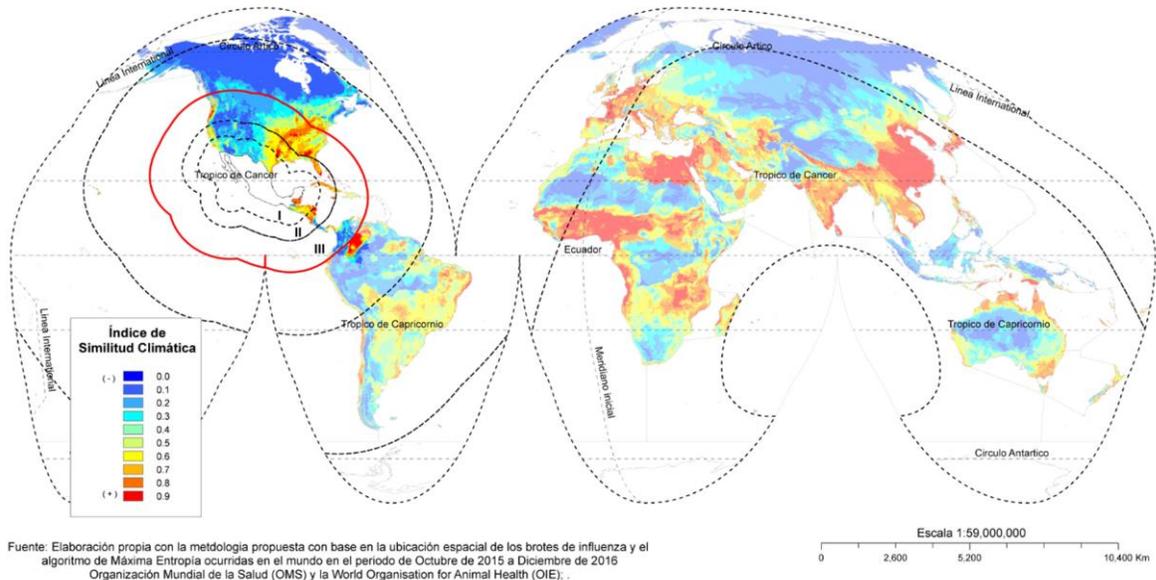


Fuente: elaboración propia con información de la OMS-OIE; 2014-2016.

En la tercera etapa se obtuvo el modelo de similitud climática; para caracterizar el área de fuente de inóculo en la estimación del Ppi; el cual, permitió definir las superficies con mayor aptitud ambiental para virus altamente patógenos (tonalidades rojas); que territorialmente pueden influir en el riesgo de introducción al país, además, es considerado un modelo robusto, puesto que, cuenta con análisis de área bajo la curva con un valor de 0.923; superando el valor crítico de 0.700 en este tipo de modelos[5].

Además se identifican las variables principales para la estimación del escenario: la precipitación del trimestre más húmedo contribuye el 22.5%, la temperatura media anual el 21.3%, la estacionalidad de temperatura un 11.6%, el 7.8% la precipitación del trimestre más cálido y un 36.8% se distribuye el 15 variables ambientales restantes (Figura 3).

Figura 3.- Modelo de similitud climática o nicho ecológico global del agente causal de la influenza tipo A (de alta patogenicidad), de acuerdo a las detecciones del periodo de 2014 a 2016.



Fuente: elaboración propia con información de la OMS-OIE; 2014-2016.

Posteriormente en la cuarta etapa el riesgo de introducción se identificó como área de fuente de inóculo la costa oeste de Estados Unidos y de mayor extensión la costa este hacia la mitad del territorio estadounidense, donde se identifica un alto índice de similitud climática con valores entre 0.6 y 0.9 en tonalidades de amarillo a rojo.

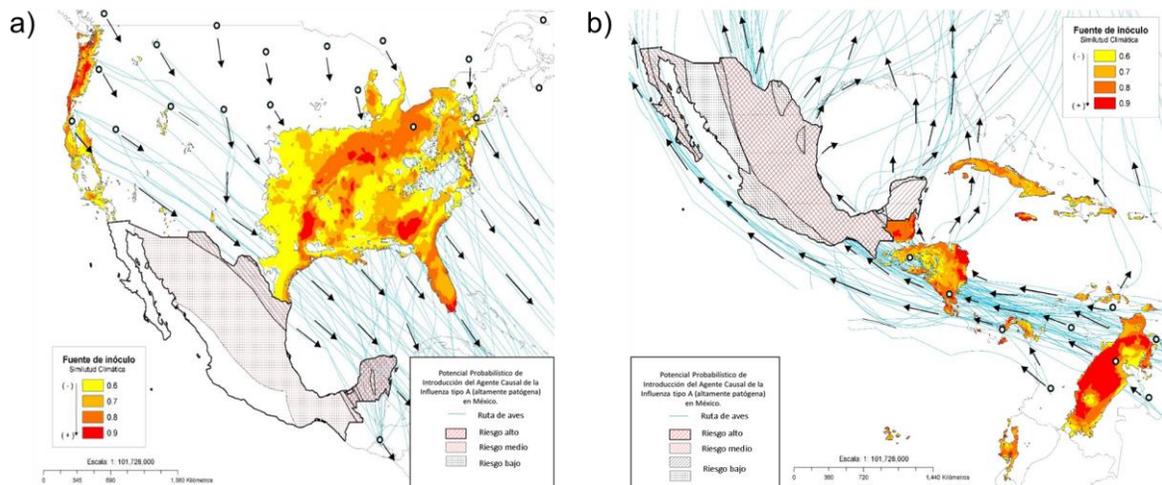
Para territorio nacional se evidencian cuatro porciones en riesgo sanitario, con muy alto riesgo se encuentra la mayor parte de la Península de Yucatán y una pequeña porción al norte de Coahuila, con menor superficie pero alto riesgo se encuentra una pequeña franja que comprende desde la porción central de Chiapas hasta Tabasco así como la porción norte de los Estados de Tamaulipas, Nuevo León, Coahuila y Chihuahua, Sin embargo con un riesgo de introducción alto se encuentra casi la mitad del territorio nacional desde la porción más estrecha de Sonora hacia el centro del país, siguiendo la Planicie Costera del Golfo pasando por el Istmo de Tehuantepec hasta la frontera sur en Chiapas y en riesgo

bajo se encuentra la Península de Baja California y parte de la Costa del Pacífico desde Guerrero hasta el norte de Nayarit (Figura 4a).

De igual forma, se identificó un área fuente de inóculo la región de Centro América y El Caribe, donde el modelo de similitud climática cuenta con valores que oscilan entre 0.6 y 0.9 donde existe aptitud ambiental que favorece a este tipo de virus.

Evidenciando con muy alto riesgo desde Chiapas siguiendo el Istmo de Tehuantepec por la Planicie Costera del Golfo hasta el límite norte del país desde Tamaulipas hasta Chihuahua, parte de la península de Baja California y el norte de la Península de Yucatán, con riesgo medio se encuentra una sección de la Península de Baja California así como una franja de norte a sur de Chihuahua a Durango y con riesgo bajo se encuentra la mayor parte de la Península de Yucatán y una franja de Sonora a Nayarit (Figura 4b).

Figura 4.- Riesgo de Introducción del agente causal de la influenza tipo A (altamente patógena) en México.



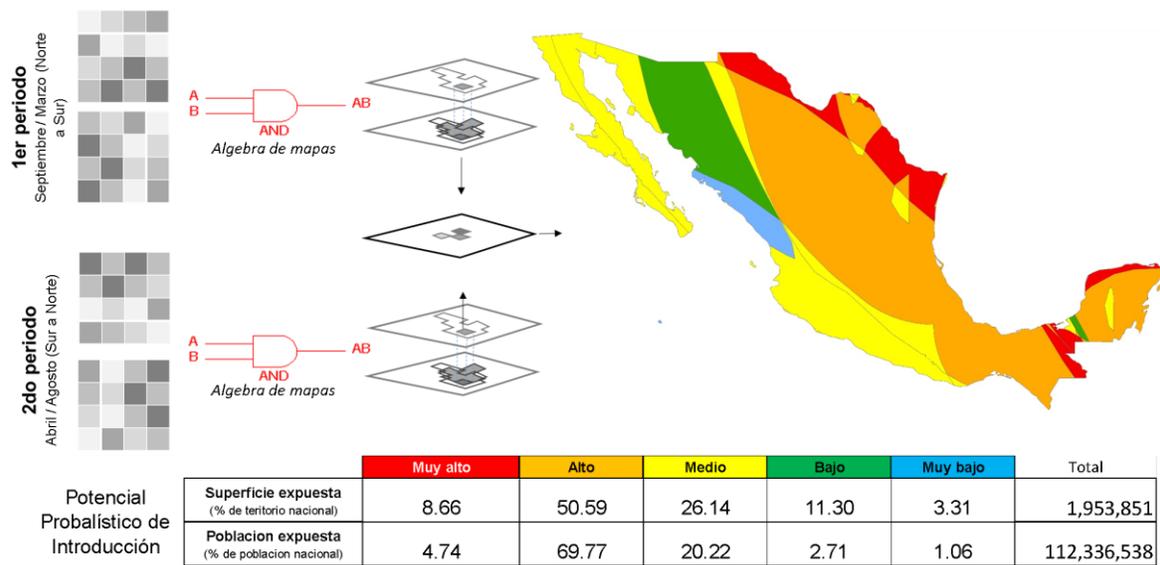
Fuente: Elaboración Propia con base en el modelo geoespacial

La estimación del escenario de Ppi del agente causal de la influenza tipo A evidencia que la mayor parte de la población 78 millones de habitantes se encuentran con un índice de introducción alto el cual se distribuye en más de la mitad del territorio nacional (50.59%), y temporalmente el mayor riesgo se identifica en el periodo de septiembre a marzo.

Con un índice de Ppi medio se encuentran cerca de 24 millones habitantes los cuales se distribuyen en el 26.14% de la superficie nacional; sin embargo con muy alto Ppi se encuentra 5.2 millones de habitantes que territorialmente se ubica en 8.66 % de la superficie nacional; evidenciando que el 94% de la población se encuentra en riesgo de muy alto a medio; lo que implica que el 85% del territorio nacional está expuesto a la introducción del agente causal de la influenza tipo A.

Finalmente, con un índice de Ppi bajo se encuentran 3 millones de habitantes territorialmente en el 11.30 % de la superficie nacional y con un índice de Ppi bajo se encuentran 1.2 millones habitantes (Figura 5).

Figura 5.- Potencial Probabilístico de Introducción del agente causal de la influenza altamente patógena en México.



Fuente: Elaboración Propia con base en el modelo geoespacial

Discusión

El modelado geoespacial permite la integración de variables desde una visión holística que nos ayuda a vislumbrar posibles escenarios de riesgo en este caso en la introducción del agente causal de la influenza tipo A en territorio nacional.

Las técnicas y métodos empleados en esta investigación son recomendables para poder analizar problemas epidemiológicos y sanitarios; ya que, pueden estimar una posibilidad de ocurrencia con base en la interacción de variables geofísicas, antrópicas y epidemiológicas, reflejando los resultados en tiempo y espacio; pudiendo robustecer la toma de decisiones ante problemas reemergentes de salud.

La elaboración de las Is-RS como insumo en la estimación del Ppi permite tener un referente espacial de la distancia representativa entre los brotes de influenza altamente patógena, es decir, se incorpora el espacio euclidiano en la caracterización del riesgo sanitario, ya que todo problema en salud es territorialmente ubicable y diferenciando.

lo que permite poner límites o áreas de posible alcance del elemento de riesgo; los cuales se potencializan asociados a los procesos de globalización (movimientos transnacionales), y fenómenos macro ambientales como el calentamiento global; los cuales inciden en la aparición de enfermedades reemergentes como la influenza altamente patógena; ya que según Tirado *et al.*,2015 [16]; las epidemias de influenza no son determinadas únicamente por elementos biológicos. En este sentido es pertinente señalar que en estudios anteriores no se hizo referencia al cálculo de distancias representativas ante los brotes de influenza tipo A, lo que puede aportar más robustez al escenario de Ppi.

Se identificó una área de influencia de 2192 km, considerada el área fuente de inóculo; dentro de la misma, se jerarquizaron las sub-áreas de acuerdo al riesgo de potencial

probabilístico de introducción, esta estimación del modelo se validó con el análisis de área bajo la curva del modelo de similitud climática, el resultado fue una COR de 0.923 lo que indica que el modelo hizo una estimación óptima de las áreas que cuentan con mayor aptitud para favorecer la introducción de virus altamente patógenos; Además, el modelo identificó las variables que más influyen están asociadas a temperatura y precipitación, estos resultados pueden ser utilizados por los tomadores de decisiones para direccionar estrategias que impacten en la vigilancia, monitoreo o control de la influenza altamente patógena; a través de coadyuvar en la planeación de estrategias de prevención y actuación ante un brote o detección en territorio nacional.

Adicionalmente, la caracterización del Ppi involucró un componente temporal con mayor definición; a diferencia de otras investigaciones sobre riesgo de influenza realizadas donde solo utilizan variables bioclimáticas, geográficas y antropogénicas o utilizan el modelo de distribución potencial máxima entropía [4],[5],[6]; en este sentido el modelado que se realizó evidencia dos periodos de riesgo de introducción con base en las publicación de Kranstauber *et al.*, 2015 [33]; lo que permitió estimar un escenario de introducción con mayor resolución espacial y temporal obteniendo un modelo más robusto que permite fortalecer la definición del riesgo de introducción en el escenario de Ppi evidenciando más especialmente cual es el tiempo de mayor riesgo de abril a agosto con una posible movilización del agente causal de la influenza tipo A de norte a sur.

El modelo encontró que más de la mitad de la superficie nacional se encuentra expuesta a un riesgo de introducción del agente causal de la influenza tipo A; con una caracterización del riesgo de introducción muy alto y alto; lo que evidencia que cerca del 70% de la población mexicana se encuentra expuesta a la posible detección de brotes de influenza altamente patógena; ya que es un territorio donde existen las condiciones ambientales

propicias para la sobrevivencia y desarrollo de este tipo de virus, y existe una alta autocorrelación espacial para el modelado geoespacial [35].

Este tipo de modelos puede fortalecer la toma de decisiones [17]; en materia de prevención y actuación ante problemas remergentes de salud como lo es el agente causal de la influenza tipo A; debido a que el Ppi ha sido concebido como una herramienta cartográfica que puede coadyuvar a direccionar las acciones y control ante la aparición de brotes o detecciones de este tipo de virus en cualquier lugar del territorio nacional, lo que puede fortalecer la respuesta inmediata de los Servicios Sanitarios.

Conclusiones

El modelado geoespacial constituye una herramienta para la priorización y planificación de acciones, para dar soporte en la toma de decisiones, debido a que representan epidemiológica, espacial y temporalmente el riesgo a la salud pública ante enfermedades remergente como el agente causal de los virus de influenza tipo A.

Con esta metodología es posible identificar los sitios donde existe mayor prevalencia de la enfermedad, las isócronas de riesgo sanitario permiten estimar las áreas de mayor riesgo de acuerdo a la distancia representativa definiendo el área de influencia, la caracterización del área de fuente de inóculo permite identificar dos periodos de riesgo sin embargo el de mayor riesgo es temporalmente de septiembre a marzo con una trayectoria de norte a sur

Es pertinente señalar que este tipo de estudios se puede presentar como una investigación transdisciplinar; debido a que puede aplicarse ante problemas de salud pública, salud animal, salud forestal e incluso sanidad vegetal.

Financiamiento: La presente investigación se llevó a cabo gracias la beca otorgada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT en el periodo de 2016 a 2018.

Contribución de los autores: Conceptualización, planteamiento, análisis e interpretación: EIZ, DGH, GMA y MEGC. Todos los autores aprueban la versión final del escrito y asumen la responsabilidad pública por el contenido del mismo.

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Referencias

[1] Influenza aviar. Organización Mundial de la Salud OMS. [En línea] 2018[Consultado 15 de noviembre de 2017]

https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=7030%3A2012-avian-influenza&catid=4553%3AAvian-influenza&Itemid=39532&lang=es

[2] Virus de la gripe aviar y otros virus de la gripe de origen zoonótico. Nota descriptiva OMS Noviembre de 2016. [En línea] 2017 2012. [Consultado 15 de Agosto de 2017]

http://www.who.int/mediacentre/factsheets/avian_influenza/es/

[3] Jiménez Clavero MA. 2013. La gripe y sus virus (y II). Virus emergentes y cambio global. Blog de divulgación sobre virus emergentes y las enfermedades que producen, en un contexto de cambio global.[En línea] 2013 [Consultado 03 de Septiembre de 2017]

<http://www.madrimasd.org/blogs/virusemergentes/2013/05/la-gripe-y-sus-virus-y-ii/>

[4] Zhang Z, Dongmei CH, Yue CH, Tilman MD, Vaillancourte JP & Wenbao L. Risk signals of an influenza pandemic caused by highly pathogenic avian influenza subtype H5N1: Spatio-temporal perspectives. [En línea] The Veterinary available journal at SciVerse Science Direct <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2011.08.012>

[5] Keiko AH, Falk H & Lindgren MA. A global model of avian influenza prediction in wild birds: the importance of northern regions. Veterinary Research201344:42 [En línea] 2013 [Consultado 12 de Diciembre de 2017] Doi.org/10.1186/1297-9716-44-42.

[6] Kim B, Marius G, & Pfeiffer DU. Modeling habitat suitability for occurrence of highly pathogenic avian influenza virus H5N1 in domestic's poultry in Asia: A spatial multicriteria decision analysis approach. *Spatial and Spatio-temporal Epidemiology*. 4(2013) 1-14. EL SEVIER.

[7] Smallman-Raynor M & Cliff AD. The Geographical Spread of Avian Influenza A (H5N1): Panzootic Transmission (December 2003–May 2006), Pandemic Potential, and Implications. [En Linea] Pages 553-582 | Received 01 Dec 2006, Accepted 01 Jul 2007, Published online: 25 Jun 2008. <https://doi.org/10.1080/00045600802098958>

[8] Mohammad A, Hijimans RJ, Abdullah AE, Martinez Lopez B & Perea AM. The use of spatial an spatiotemporal modelling for surveillance of H5N1 Highly Pathogenic Avian Influenza in Poultry in the Middle East. *BioOne Research Evolved*. 2016. *Avian Diseases*, 60(1s):146-155. American Association of Avian Pathologists. DOI:10.1637/11106-04115-Reg

[9] Prosser DJ, Hungerford LL, Erwin RM, Ottinger MA, Takekawa JY, Newman SH & Ellis EC. (2016). Spatial Modeling of Wild Bird Risk Factors for Highly Pathogenic A (H5N1) Avian Influenza Virus Transmission. *Avian Dis*, 60(1 Suppl), 329-336. DOI: 10.1637/11125-050615-Reg

[10] Kannan VC, Hodgson N, Lau A, Goodin K, Dugas AF & LoVecchio F. Geolocalization of Influenza Outbreak Within an Acute Care Population: A Layered-Surveillance Approach. *Ann Emerg Med*. 2016 Nov;68(5):618-626. DOI: [10.1016/j.annemergmed.2016.07.025](https://doi.org/10.1016/j.annemergmed.2016.07.025)

[11] Smietanka, K., Bocian, L., Meissner, W., Zietek-Barszcz, A., & Zolkos, K. (2016). Assessment of the Potential Distance of Dispersal of High Pathogenicity Avian Influenza Virus by Wild Mallards. *Avian Dis*, 60(1 Suppl), 316-321. DOI: 10.1637/11080-040715-RegR

- [12] FAO-OIE. 2016. Una sola salud. Organización mundial de Sanidad Animal. [En línea] 2016 [Consultado el 08 de julio 2016] <http://www.oie.int/es/para-los-periodistas/onehealth-es/>
- [13] Una sola salud. Organización mundial de Sanidad Animal. OIE. [En línea] 2016 [Consultado el 08 de julio de 2016] <http://www.oie.int/es/para-los-periodistas/onehealth-es>
- [14] Figueroa 2009. Introducción a la salud pública. Universidad de San Carlos. Facultad de Ciencias Médicas. Fase 1 Área de Salud Pública.[Consultado 10 de Septiembre de 2016].
- [15] Evaluación rápida de riesgos de eventos agudos de salud pública. Organización Mundial de la Salud. OMS [En línea] 2015 Edición original en inglés: Rapid Risk Assessment of Acute Public Health Events © World Health Organization, 2012. [Consultado 15 de Septiembre de 2016] WHO/HSE/GAR/ARO/2012.1
- [16] Tirado F, Gomez A y Rocamora V. The global condition of epidemics: Panoramas in A (H1N1) influenza and their consequences for One World One Health programme. Social science & medicine. 2015 Mar;129:113-22. PubMed PMID: 25218795. DOI: 10.1016/j.socscimed.2014.09.003
- [17] CONACYT-CentroGEO; 2015. Raising Geospatial Analysis to GeoIntelligence. Latin America Geoespatial Fórum. [En línea] 2015 [Consultado el 08 de julio 2016] <http://lagf.org/2014/ppt/Rep%20from%20CenterGeo.pdf>
- [18] Alimi TO, Fuller DO, Herrera SV, Arevalo-Herrera M, Quinones ML, Stoler JB. A multi-criteria decision analysis approach to assessing malaria risk in northern South America. BMC public health. 2016 Mar 03;16:221. PubMed PMID: 26940004. Pubmed Central PMCID: 4778356.

[19] Nallar R, Papp Z, Leighton FA, Epp T, Pasick J, Berhane & Soos C. (2016). Ecological Determinants of Avian Influenza Virus, West Nile Virus, and Avian Paramyxovirus Infection and Antibody Status in Blue-Winged Teal (*Anas Discors*) in the Canadian Prairies. *J Wildl Dis*, 52(1), 33-46. DOI: 10.7589/2013-07-191

[20] The Geographical Spread of Avian Influenza A (H5N1): Panzootic Transmission (December 2003–May 2006), Pandemic Potential, and Implications. Smallman-Raynor M & Cliff AD. *Annals of the Association of American Geographers* Vol. 98, No. 3 (Sep., 2008), pp. 553-582

[21] Díaz VA y González CR. *Geoestadística Aplicada*. Universidad Nacional Autónoma de México. [En línea] 2009. [Consultado el 16 de Diciembre 2016] http://mmc2.geofisica.unam.mx/cursos/gest/Presentaciones/CG1_2009.pdf

[22] Castillo Ramiro JJ, Gamma Lily y Zequeira Larios C. 2008. Análisis de regresión lineal en un sistema de información geográfico para determinar la tasa de deforestación en el estado de Tabasco. *Kuxulkab. Revista de divulgación*. [En línea] División Académica de Ciencias Biológicas Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. ISSN 1665-0514. [Consultado 15 de Diciembre de 2017] <http://www.dgbiblio.unam.mx>

[23] Gallardo A. *Geoestadística*. 2006. Ecosistemas. *Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente*. España. [En línea] 2006 [Consultado 3 de Diciembre de 2017] <https://dialnet.unirioja.es/servlet/revista?codigo=1887>

[24] Malik A. & Abdalla R. Mapping the impact of air travelers on the pandemic spread of (H1N1) influenza. *Modeling Earth Systems and Environment* [En línea] June 2016, 2:91. *Model. Earth Syst. Environ.* (2016) 2: 91. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0147-1>

[25] William F & Trevor H. Finite-Sample Equivalence of Several Statistical. Models for Presence-Only Data. Department of Statistics. Stanford University. July 31, 2012. Cornell University Library. DOI: 10.1214/13-AOAS667

[26] Cory M, Matthew JS, John AS, Merow C & Silander JA. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: what it does, and why inputs and settings matter. Univ. Of Connecticut, Ecology and Evolutionary Biology, Computational Ecology and Environmental Science Group, Computational Science Laboratory. DOI: 10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x

[27] Soberón J & Nakamura M. 2009. Niches and distributional areas: concepts, methods and assumptions. Proc Natl Acad Sci U S A. [En Línea] 2009 Nov 17;106 Suppl 2:19644-50. Epub 2009 Sep 23. PMID: 19805041 PMCID: PMC2780935 DOI: 10.1073/pnas.0901637106

[28] Escobar LE. Modelos de nicho ecológico en salud pública: cinco preguntas cruciales. 2016. [En línea] Pan American Journal of Public Health. [Consultado 2 de mayo de 2017] Organización Panamericana de la Salud. <http://iris.paho.org/xmlui/handle/123456789/31163>

[29] Alkhamis M, Hijmans RJ, Al-Enezi A, Martinez-Lopez B & Perea AM. The Use of Spatial and Spatiotemporal Modeling for Surveillance of H5N1 Highly Pathogenic Avian Influenza in Poultry in the Middle East. Avian diseases. 2016 May;60(1 Suppl):146-55. PubMed PMID: 27309050. DOI: 10.1637/11106-042115-Reg

[30] Xu M, Cao C., Wang D & Kan B. (2014). Identifying environmental risk factors of cholera in a coastal area with geospatial technologies. Int J Environ Res Public Health, 12(1), 354-370. DOI: 10.3390/ijerph120100354

[31] BIOCLIM. WorldClim - Global Climate Data. Free climate data for ecological modeling and GIS [En línea] disponible en el sitio: <http://www.worldclim.org/>

[32] Qun Fong L, Xin-Low L, Yin-Lui L, Hong-Wu Y, Song L, Yang Y, Zi-Jian F, Gray CG & Wu-Chun C. Mapping Spread and Risk of Avian Influenza A (H7N9) in China. *Scientific Reports* volume3, Article number: 2722. [En línea] 2013 [Consultado 25 de Diciembre de 2016] DOI: 1038/srep02722.

[33] Kranstauber B, Weinzierl R, Wikelski M & Safi K. Global aerial flyways allow efficient travelling. *Ecology letters*. 2015 Dec; 18(12):1338-45. PubMed PMID: 26477348. <https://doi.org/10.1111/ele.12528>

[34] Kemp MU, Shamoun-Baranes J, Dokter AM, Van Loon E. & Bouten W. (2013). The influence of weather on the flight altitude of nocturnal migrants in mid-latitudes. *Ibis*, 155, 734–749. Article in *Ibis*. DOI: 10.1111/ibi.12064

[35] Colemin JP. 2009. Autocorrelación espacial e indicadores locales de asociación espacial. Importancia, estructura y aplicación. *Rev. Univ. Geogr.* vol.18 no 1 Bahía Blanca 2009. Universidad Nacional del Mar ISSN 1852-4265.

19. Artículo No. 2: Revista Salud Pública

Modelado geoespacial del riesgo de establecimiento de la influenza de alta patogenicidad en México.

Enrique Ibarra Zapata ^I, Darío Gaytán Hernández ^I, Miguel Ernesto González Castañeda ^{III} y Gustavo Mora Aguilera ^{II}.

I Posgrado en Salud Pública Facultad de Enfermería y Nutrición Universidad Autónoma de San Luis Potosí;

II Departamento de Geografía y Ordenación Territorial Universidad de Guadalajara y

III Laboratorio de Referencia Epidemiológica Fitosanitaria Colegio de Postgraduados "Montecillo" Texcoco Edo de México.

RESUMEN

OBJETIVO: Estimar el riesgo de establecimiento del agente causal de la influenza tipo A, de alta patogenicidad en México, a través de modelado geoespacial.

MÉTODOS: Es un estudio ecológico, que utilizo como insumo la base de datos espacial de 1973 brotes de influenza altamente patógena en el mundo del periodo de 2014 a 2016; e íntegro las variables que según referencias epidemiológicas favorecen el riesgo de establecimiento. Para su análisis se utilizó información geográficamente referida como: el potencial de introducción, los modelos de riesgo ambiental, antrópico y natural. Evaluados a través de la evaluación espacial multicriterio; sustentado con la regresión geográficamente ponderada y el índice de Moran en los paquetes de cómputo ArcGIS-V10.1, QGI- V.2.18. y GeoDa-V.1.12.

RESULTADOS: Se obtuvo un modelado de aptitud ambiental que indica las áreas en riesgo para el establecimiento del agente causal de la influenza altamente patógena estadísticamente robusto, con un área bajo la curva de 0.923. La representación espacial del riesgo natural y antrópico caracterizan una superficie que representa el 15.61 y el 4.78% del territorio nacional que es cercano a los dos millones de kilómetros cuadrados. Finalmente la estimación del potencial probabilístico de establecimiento, evidencio que el 18.47% del país posee valores de riesgo medio, alto y muy alto; Adicionalmente, el resto del territorio nacional cuenta con condiciones aptas para el establecimiento del virus aunque en menor grado; estos resultados son respaldados estadísticamente con una $r^2=0.84$ y un índice de moran=0.787; lo que permite afirmar que existe una autocorrelación espacial significativa agregada, en la caracterización del riesgo de establecimiento.

CONCLUSIONES: La representación espacial del riesgo de establecimiento realizada a través de modelado geoespacial se considera una herramienta que puede fortalecer la toma de decisiones en materia sanitaria, ya que el resultado es un escenario espaciotemporalmente tangible, reflejado en mapas de riesgo georeferenciados lo que facilita su consulta e interacción.

DESCRIPTORES: Influenza, Salud Publica, Riesgo, Análisis Espacial, Sistemas de Información Geográfica.

INTRODUCCIÓN

A nivel global existen identificados tres tipos de virus de influenza con la capacidad de afectar al ser humano conocidos como A, B y C; de los cuales existen referencias que afirman que las infecciones de influenza tipo C ocasionan generalmente una enfermedad respiratoria leve. Sin embargo los virus tipo A y B pueden causar epidemias estacionales en los periodos de invierno y científicamente se ha comprobado que los tipo A son los más patogénicos, según la composición de proteínas de superficie definidos por las Hemaglutininas (H) y las Neuraminidasas (N) que las integran.

En este sentido los virus de influenza tipo A se consideran una enfermedad infecciosa causada por un virus de la familia Orthomyxoviridae y representan el mayor riesgo para la salud global según consideraciones de la OMS (2017); algunas variantes de estos virus, específicamente los altamente patógenos representan una seria amenaza para la salud pública; ya que el principal factor de riesgo es el contacto directo o indirecto con hospederos infectados o con ambientes y superficies contaminados con estos virus ¹⁹.

El potencial pandémico de este tipo de virus radica en la evolución constante de las variantes según las H y N de los que se integran¹⁷, lo que propicia que ante un brote o una detección de un virus altamente patógeno no existen los medios y estudios que justifiquen la forma de atender y accionar ante el mismo, por ello, se puede catalogar como un grave problema de salud, ya que con el comercio mundial y la alta movilidad humana, propician a que una epidemia puede convertirse rápidamente en una pandemia, ya que la velocidad para preparar las respuestas no son lo suficientemente rápidas para asegurar en todas las ocasiones un éxito de los sistemas de salud ²⁰.

La circulación de algunos subtipos de influenza tipo A, como el H5 suelen causar enfermedades graves en las personas y pueden sufrir recombinaciones o mutaciones que faciliten la transmisión entre los seres humanos. Incluso en regiones donde han existido elevadas tasas de incidencia como en el Sureste Asiático o Medio Oriente, complementariamente los subtipos pandémicos H7N9 y H5N1 han presentado respectivamente tasas de mortalidad en humanos de 27% y 60% ¹⁹.

En este sentido, la vigilancia de la influenza en México desde el año 2006 se lleva a cabo bajo directrices de la OMS; a través de la Vigilancia de Influenza Global y Sistema de Respuesta (GISRS), basándose en la estrategia de vigilancia centinela, la cual consiste en la recolección, integración, verificación y análisis de información epidemiológica detallada de un conjunto de unidades de monitoreo, y cabe resaltar que ha resultado un modelo eficaz para la vigilancia general de la

influenza; puesto que ha permitido realizar análisis de riesgo robustos y por lo tanto, orientar las intervenciones de prevención y control en diferentes regiones del planeta²³.

A este respecto, en México existe la experiencia de la aparición de un brote pandémico de Influenza A (H1N1) durante 2009; el cual se consideró un problema de salud pública que involucro la participación de todos los actores sociales, públicos y privados, para llevar a cabo las medidas de mitigación orientadas a disminuir su propagación, intentado alterar lo menos posible la continuidad de la dinámica socioeconómica del país y dar certidumbre y protección a la población nacional como al turismo²³; Por sus características, se llegó incluso a sospechar de la presencia de una cepa nueva derivada de la recombinación entre hospederos portadores.

Por otra parte, la estimación del escenario de potencial probabilístico de establecimiento en México, puede fortalecer las estrategias de prevención definidas en el Manual de Atención a la Salud ante Emergencias (CENAPRECE-SS; 2013); específicamente en las líneas de monitoreo de los patrones de distribución geográfica y social de la enfermedad, así como en el monitoreo, prevención y control de la misma.

Y en escala global existen referencias que estiman el riesgo de establecimiento de virus altamente patógenos, como el realizado por Herrick *et al.*, 2013; que estiman un modelo global de predicción de la influenza que incluye variables bioclimáticas, geográficas y antropogenicas ¹⁵; de igual forma se han realizado investigaciones en las regiones donde se consideran endémico estos tipos de virus; en el Sureste Asiático, se modelo la idoneidad del hábitat de virus H5N1 basado en similitud climática ²⁴ y en Medio Oriente se realizó modelado espacial para la vigilancia de H5N1 considerando el modelo de nicho ecológico⁷, siendo referencias que sustentan la presente investigación.

Por lo anterior el objetivo de la presente investigación fue estimar el riesgo de establecimiento del agente causal de la influenza tipo A de alta patogenicidad en México, a través del modelado geoespacial; con la finalidad de fortalecer la toma de decisiones en materia sanitaria bajo el precepto de *Una Sola Salud*; ya que este tipo de problemáticas debe ser abordado desde diversas ópticas ²⁸, para fortalecer las acciones de prevención, control y actuación ante problemas emergentes y reemergentes de salud pública.

METODOLOGÍA

Se trata de un estudio ecológico que involucró la exploración, descripción, visualización y el análisis de bases de datos espaciales considerando las características de distribución de los brotes en el espacio (definidos en un sistema de coordenadas); en este caso el insumo inicial fueron los 1,973 brotes altamente patógenos ocurridos en el mundo en el periodo de 2014 a 2016 avalados por

laboratorios oficiales de la Organización Mundial de la Salud y World Organisation for Animal Health; A partir de los cuales se desarrolló el modelo de riesgo de establecimiento sustentado en la epidemiología espacial; para la identificación de las probables zonas de establecimiento; ya que la prevención de las enfermedades reemergentes se debe abordar considerando diferentes perspectivas de análisis en las que la localización de los eventos resulta un componente fundamental¹².

El proceso metodológico involucró la inserción de variables que potencializan el riesgo de establecimiento como la caracterización del potencial probabilístico de introducción (Ppi) caracterizado en escala subcontinental^{7a}, ya que si esta probabilidad es alta puede favorecer en mayor medida el riesgo de establecimiento de este tipo de virus en territorio nacional.

Posteriormente se realizó la caracterización de las áreas con mayor aptitud ambiental para el establecimiento de virus altamente patógenos; a través del modelo de similitud climática o Maxent definido como el riesgo de aptitud ambiental, que involucró 21 variables ambientales de la base de datos global BIOCLIM con una resolución espacial de (1km²)⁹; variables que derivan de valores mensuales de temperatura y precipitación para generar criterios biológicamente significativos, los cuales se describen de la siguiente forma:

- BIO1 = Temperatura media anual
- BIO2 = Rango diurno medio (Media mensual (temperatura máxima - temperatura mínima))
- BIO3 = Isotermalidad (BIO2 / BIO7) (* 100)
- BIO4 = Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar * 100)
- BIO5 = Temperatura máxima de la temperatura más cálida Mes
- BIO6 = Temperatura mínima del mes más frío
- BIO7 = Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6)
- BIO8 = Temperatura media del trimestre más húmedo
- BIO9 = Temperatura media del trimestre más seco
- BIO10 = Temperatura media del trimestre más cálido
- BIO11 = Temperatura media del trimestre más frío
- BIO12 = Precipitación anual
- BIO13 = Precipitación del mes más húmedo
- BIO14 = Precipitación del mes más seco
- BIO15 = Temporada de precipitación (Coeficiente de variación)

^{7a} Tesis de Maestría: Estimación del escenario de potencial probabilístico de introducción del agente causal de la influenza tipo A en México a partir de Geointeligencia Sanitaria. Ibarra-Zapata E¹, Gaytán-Hernández D¹, Mora Aguilera G² y González Castañeda ME³. Posgrado en Salud Pública Facultad de Enfermería y Nutrición Universidad Autónoma de San Luis Potosí¹; Laboratorio de Referencia Epidemiológica Fitosanitaria Colegio de Postgraduados Campus Montecillos Texcoco Estado de México²; Departamento de Geografía y Ordenación Territorial Universidad Autónoma de Guadalajara³. (2016-2018) *“En proceso de publicación”*.

- BIO16 = Precipitación del cuarto más húmedo
- BIO17 = Precipitación del cuarto más seco
- BIO18 = Precipitación del cuarto más cálido
- BIO19 = Precipitación del cuarto más frío
- BIO20 = Altitud (metros sobre el nivel del mar)
- BIO21 = Tipo de suelo (clasificación de suelo INEGI escala 1:250,000)

Se utilizó este algoritmo porque ha mostrado buenos resultados en estimar superficies con aptitud al establecimiento para virus altamente patógenos en otras latitudes como en China¹³, Estados Unidos⁹, e incluso en escala global¹⁵; así como en el Sureste Asiático²⁴ y Medio Oriente⁷ donde se consideran endémicas cepas altamente patógenas^{5,16,22,26}. Este tipo de modelos se soportan y validan estadísticamente con el análisis del área bajo la curva lo que otorga soporte al modelado ¹⁵.

El enfoque del análisis y modelado geoespacial constituye una alternativa analítica y emergente, ya que mediante la asociación e interacción espacial se considera el estudio de las semejanzas encontradas al comparar distintas distribuciones espaciales¹⁰; que epidemiológicamente favorecen el establecimiento del agente causal de los virus tipo A de baja y alta incidencia patógena en este caso.

Parte fundamental de esta investigación se respalda en el método estadístico espacial “*Gi de Getis-Ord*”, el cual, mide el grado de asociación espacial que resulta de la concentración de sitios ponderados y sus vecindades dentro de un radio de distancia ponderada¹⁴; tomando como base una distancia de 35 km según el Dispositivo Nacional de Sanidad Animal del SENASICA²⁵; lo cual involucró la estructuración de un espacio relacional, donde, las localizaciones, las distancias (ideales o reales) y los vínculos (flujos) resultan fundamentales en la definición, agregación y caracterización de espacios¹⁰; es decir permite la definición de los clústers de riesgo sanitario - agrupaciones en el territorio-.

Como factor que potencializa el riesgo de establecimiento de este tipo de virus se realizó una asociación espacial entre las variables que funcionan como riesgo natural y antrópico, donde se consideró que el área de conservación de aves (AICAS); caracteriza el área de distribución propia del hospedero¹⁵; denominándose como el riesgo natural de establecimiento; debido a que los virus de baja y alta patogenicidad pueden permanecer infectivos en cuerpos de agua hasta 4 días favorecidos en mayor medida por bajas temperaturas y altos niveles de humedad relativa¹¹, así como alta densidad de hospederos.

Por su parte el riesgo antrópico se estimó mediante la cobertura de unidades de producción avícola (UPA), representado espacialmente por la localización geográfica y la capacidad de individuos por granja; lo que permitió calcular la densidad de las entidades en la vecindad general según sus

ubicaciones³; debido a que los virus de influenza de baja y alta incidencia patógena pueden sobrevivir en el ambiente de una planta avícola hasta por 5 semanas¹¹; y es pertinente resaltar que la interacción de hospederos en este tipo de establecimientos incrementa el riesgo a la salud pública.

Las variables anteriores, se representaron espacialmente con base en un proceso de ponderación según la superficie de cada elemento de la cobertura; lo que permitió identificar los puntos calientes y puntos fríos estadísticamente significativos mediante la estadística G^* de *Getis-Ord*⁶; evidenciando la agregación de elementos en el espacio, es decir, permitió identificar la agregación de los factores que representan el riesgo de establecimiento natural y antrópico con base en la siguiente ecuación:

$$SearchRadius = 0.9 * \min \left(SD, \sqrt{\frac{1}{\ln(2)} * D_m} \right) * n^{-0.2}$$

Donde:
SD: es la distancia estándar
D_m: es la mediana de la distancia
n: es el número de puntos cuando, o la suma de los valores de interés.

Posteriormente se realizó un proceso caracterizado en tres etapas para llevar a cabo la evaluación espacial multicriterio (EEMC) definidas por el cálculo de las áreas con aptitud potencial mediante la Combinación Lineal Ponderada; La obtención de la importancia de los factores mediante el método de experto o el método Rating y la estandarización de los factores de riesgo por medio de la membresía difusa, la cual consideró los requerimientos óptimos al establecimiento del agente causal de la influenza según su epidemiología, biología y mecanismos de dispersión, tomando en cuenta que el agente causal y sus posibles huéspedes que potencializan el riesgo de establecimiento (Figura 1).

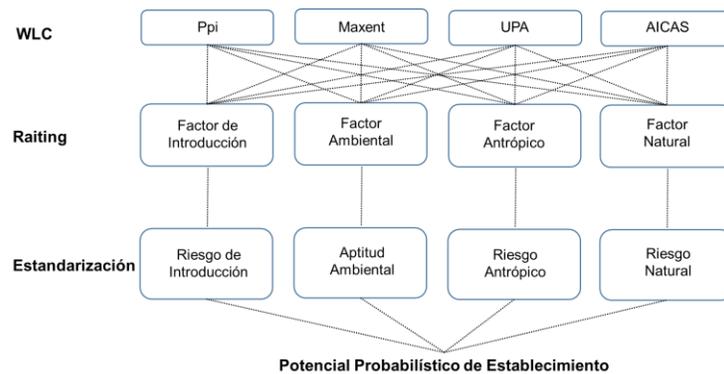


Figura 1.- Caracterización espacial del potencial probabilístico de establecimiento del agente causal de la influenza tipo A.

El método de la membresía difusa permitió definir el grado de pertenencia de los factores, que mediante un proceso de estandarización se consideró los requerimientos óptimos del potencial probabilístico de establecimiento del agente causal de la influenza, los cuales se representan en una escala byte (0 a 255); siendo la más recomendada para análisis de aptitud espacial^{2, 27} (Figura 2).

Factores	Función de la membresía	Gráficos	Parámetros	Normalización
Riesgo de introducción	Simétrica		a: muy alto b: alto c: medio d: bajo e: muy bajo	$Wn_{j0} = \frac{R_j}{\sum_{j=1}^c R_j}$ <p>Donde Wn = peso del atributos normalizado; R = atributos calificados.</p>
Aptitud Ambiental	Monotónicamente creciente		a: 0.0, b:0.1, c:0.2, d:0.3, e:0.4, f:0.5, g:0.6, h:0.7, i:0.8 y j:0.9	
Riesgo Antrópico	Monotónicamente creciente		a: 0.0, b:0.1, c:0.2, d:0.3, e:0.4, f:0.5, g:0.6, h:0.7, i:0.8 y j:0.9	
Riesgo Natural	Monotónicamente creciente		a: 0.0, b:0.1, c:0.2, d:0.3, e:0.4, f:0.5, g:0.6, h:0.7, i:0.8 y j:0.9	

Figura 2.- Membresía difusa de factores de riesgo del agente causal de la influenza tipo A.

Como siguiente etapa se realizó la estimación de pesos a través del método *Raiting*, el cual considera el juicio de experto expresado en una matriz de valoración, evaluando cada alternativa en el grado de cumplimiento para el desarrollo del criterio²⁷; favoreciendo el potencial de establecimiento, para normalizar las variables (Figura 1) y asignar los pesos correspondientes de acuerdo al criterio del experto (Figura 3).

Variables	Pesos
Riesgo de Introducción	0.25
Aptitud Ambiental	0.35
Riesgo Natural	0.20
Riesgo Antrópico	0.20

Figura 3.- Asignación de pesos que influyen el potencial de establecimiento del agente causal del virus de influenza tipo A.

A través de la técnica de combinación lineal ponderada (WLC) se ajustó cada uno de los factores o variables para generar el modelo cartográfico de riesgo sanitario en la estimación del potencial probabilístico de establecimiento del agente causal de la influenza tipo A, bajo la siguiente ecuación²⁸:

$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i$$

Donde S = Aptitud para el establecimiento en una escala de 0 a 255,
 w_i = valor de importancia del factor/subfactores
 i, x_i = factor i estandarizado con las funciones de membresía.

Una vez obtenido el potencial de establecimiento se realizó el análisis de superposición cartográfica para identificar las ubicaciones que reúnen determinados criterios que potencializan el riesgo sanitario considerando la complejidad de la relación hombre-medio, debido a que el método de superposición cartográfica, lleva a la realización de una clasificación espacial de lo general a lo particular, que representa un procedimiento central que permite poner límites en el espacio geográfico y definir áreas homogéneas¹⁰; para con ello caracterizar las áreas óptimas para el establecimiento de este tipo de virus en el país, considerando dos criterios esenciales:

- El potencial probabilístico de establecimiento que se caracterizó como el factor de riesgo, ya que involucra las condiciones óptimas para el establecimiento de este tipo de virus; incluyendo el riesgo natural, antrópico y ambiental, y
- La densidad poblacional, ya que en pleno siglo XXI la población humana no ha dejado de depender del medio natural⁶. Por lo tanto, analizar los factores de riesgo asociando la población es de vital importancia para una prevención y actuación ante una enfermedad emergente o reemergente como en este caso la influenza.

Este proceso involucró la superposición geométrica cartográfica a través de la combinación de los atributos contenidos en los criterios esenciales en la estimación del riesgo de establecimiento, es decir, se realizó una aplicación de métodos matemáticos que permitió la combinación de valores de cada variable definida en una matriz de información espacial.

La representación espacial del riesgo de establecimiento del agente causal de la influenza altamente patógena se evidencia de forma termográfica en los mapas de riesgo, es decir, se establece una paleta de colores que utiliza colores cálidos (rojo, naranja y amarillo), para resaltar las áreas de mayor riesgo, frente a una gama de colores fríos (de azul a verde), que permiten identificar las zonas de menor riesgo de establecimiento, es decir se establece una jerarquía de dos polos mutuamente excluyentes entre los valores mínimos y los valores máximos calculados para caracterizar el riesgo de establecimiento en el territorio nacional.

Así mismo como sustento estadístico se evaluó el riesgo de establecimiento mediante la regresión geográficamente ponderada (RGW); para modelar las relaciones que varían en un espacio geográfico determinado en este caso considerando como variable dependiente el potencial probabilístico de establecimiento y como variable exploratoria la densidad poblacional, ya que la investigación se realizó desde la perspectiva de la salud pública, con miras hacia la prevención y actuación ante un brote pandémico en territorio nacional. De igual forma se evaluó la autocorrelación

espacial, con el cálculo del índice de Moran, que permitió identificar la concentración o dispersión de los valores que representan el riesgo de establecimiento del agente causal de influenza tipo A.

En el modelado geoespacial se utilizaron los paquetes de computo ArcGIS V.10.1, QGIS V.2.18. y GeoDa V.1.12. en el entorno de los Sistemas de Información Geográfica (SIG); además, es pertinente señalar que la presente investigación fue aprobada por el Comité Académico del Posgrado en Salud Pública con el registro GIX 05-2017; así como por el Comité de Ética en Investigación de la Facultad de Enfermería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí con el registro CEIFE 2017-215.

RESULTADOS

La estimación del escenario de potencial probabilístico de establecimiento se caracterizó según las condiciones hombre/medio, que permiten entender el comportamiento del agente causal de la influenza tipo A, lo cual involucró las variables que incrementan la aptitud de establecimiento: el riesgo ambiental, riesgo natural y el riesgo antrópico.

El rendimiento de la aptitud ambiental al establecimiento del agente causal del virus tipo A (similitud climática) se consideró un buen modelado en función del análisis de la área bajo la curva con una $COR=0.923$; representado espacialmente en colores cálidos las áreas con mayor aptitud al establecimiento de virus altamente patógenos y por el contrario en tonalidades azules se evidencia superficies con menor aptitud ambiental para su establecimiento (Figura 4).

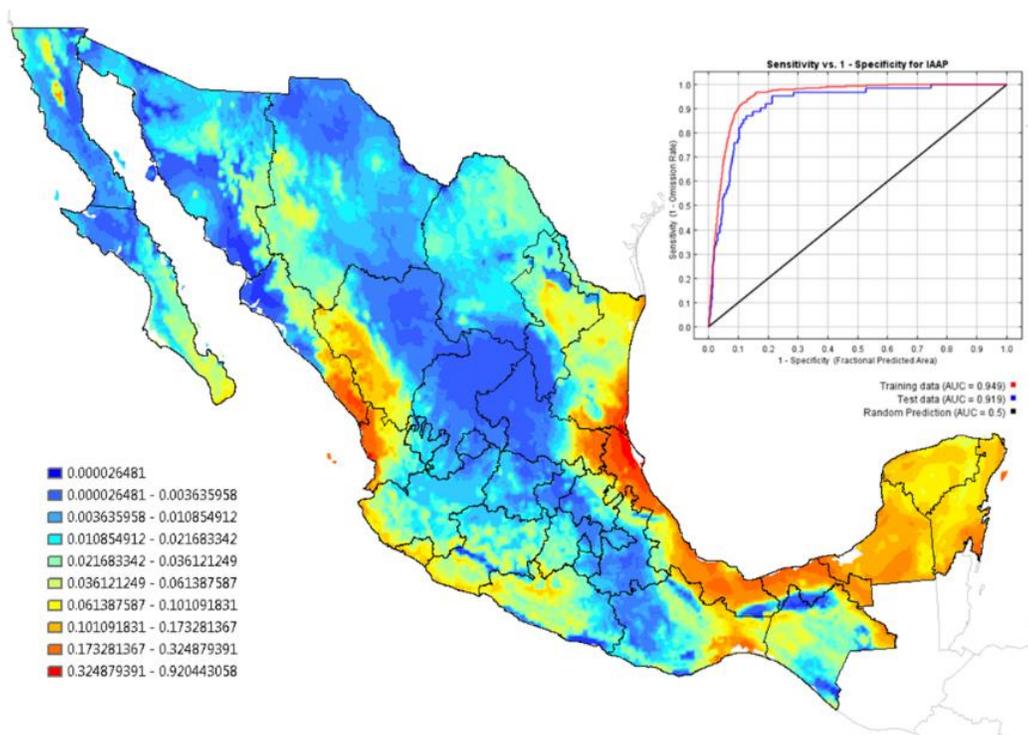


Figura 4.- Riesgo ambiental del agente causal de la influenza tipo A en México.

El riesgo ambiental se definió en virtud algunas variables que dan soporte al modelado entre las que destacan la precipitación del mes más húmedo con un aporte del 22.5%, la temperatura media anual que aporó 21.3%, la estacionalidad de la temperatura con 11.6%, precipitación del trimestre más cálido solo con 6.9%, temperatura media del trimestre más cálido con 5.9%, precipitación del trimestre más frío con el 5.5%, la temperatura media del trimestre más húmedo con 3.6%, la temperatura media del trimestre más frío únicamente con 3.5% y 12 variables contribuyen el 11.4% restante.

El modelado geoespacial en la caracterización del riesgo natural en el establecimiento del agente causal de la influenza tipo A, se realizó mediante el modelo de Kernel density⁴; que permitió evidenciar que 15.61% del territorio nacional se puede categorizar bajo este tipo de riesgo, es decir una superficie de 304,500 km²; debido a que los cuerpos de agua en donde existen aves acuáticas que pueden ser de los principales reservorios de virus de influenza de baja patogenicidad²²; que en combinación con virus de aves migratorias que involucra las rutas migratorias estacionales de norte a sur y viceversa, pueden mutar hacia cepas altamente patógenas con afectaciones posibles al ser humano (figura 5a).

Posteriormente se evidenció el riesgo antrópico a través del agregado espacial de las unidades de producción avícola caracterizado por el mapa de calor ó "Hotspot"⁵; en el que se evidencia que el 4.78% de la superficie nacional se encuentra en esta categoría; es decir se existen 92,600 km² en riesgo de establecimiento antrópico del agente causal de la influenza tipo A; ya que algunos autores consideran que el hacinamiento de aves de corral representa un riesgo debido a que puede favorecer la recombinación de cepas de alta y baja patogenicidad^{9,24} por la convivencia entre especies(Figura 5b).

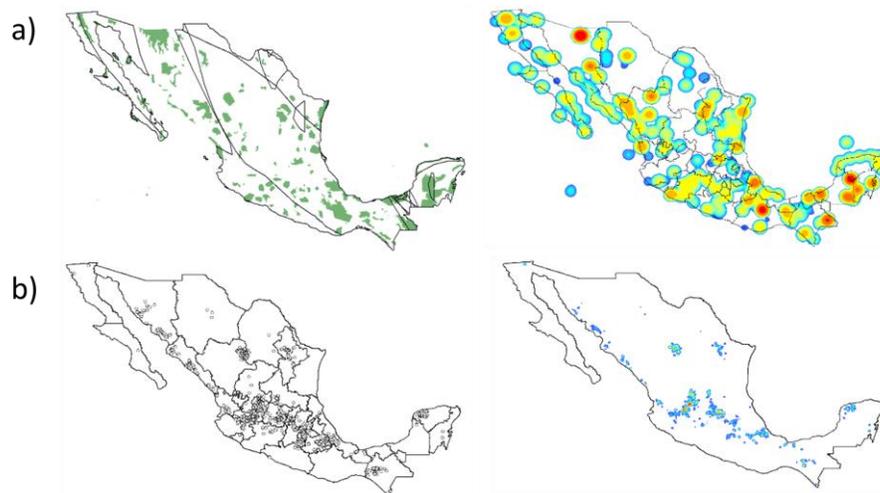


Figura 5.- a) Modelado del riesgo natural del agente causal de la influenza tipo A en México; b) Modelado del riesgo antrópico del agente causal de la influenza tipo A en México

Derivado de los anterior el cálculo del potencial probabilístico de establecimiento evidenció que el 0.87% de la superficie nacional posee aptitud de establecimiento muy alta, seguido del 5.9% con un riesgo de establecimiento alto, el 11.7% se encuentra en establecimiento medio; considerándose las áreas de mayor riesgo de establecimiento del agente causal del virus de influenza altamente patógena; además el 31% del territorio nacional se caracteriza en riesgo bajo y finalmente la mitad del territorio nacional cuenta con características de un riesgo de establecimiento muy bajo (Figura 6); considerándose áreas con menor riesgo de establecimiento de este tipo de virus.

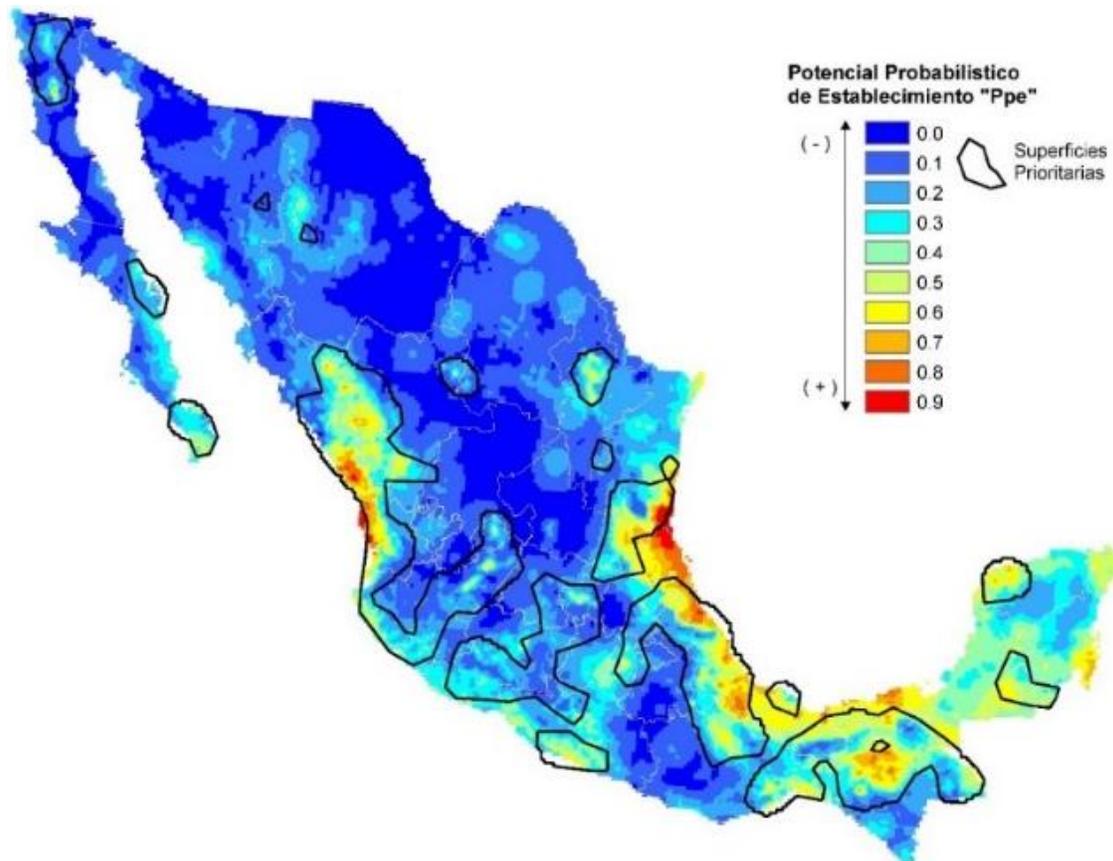


Figura 6.- Modelo de Potencial probabilístico de establecimiento Ppe de la Influenza de alta patogenicidad en México.

El Índice de Moran obtuvo un valor de 0.787; z : 3515, y un valor de " p " estadísticamente significativo (<0.001); evidenciando que el patrón de distribución del modelo de potencial probabilístico de establecimiento es agregado, con menos de 1% de probabilidad de que el patrón de distribución sea resultado de la causalidad, reflejando una autocorrelación espacial positiva en el 67.57% de territorio nacional (Figura 7b); lo que permitió caracterizar un total de 19 clúster prioritarios donde convergen las características epidémicas que favorecen este tipo de virus, las de mayor dimensión en la Costa del Pacífico y Región Occidente, seguidas de las áreas ubicadas en la Planicie Costera del Golfo, el Istmo de Tehuantepec, Península de Yucatán y Península de Baja California, así como superficies de menor extensión en algunas porción del país (Figura 6).

A nivel local estadísticamente el análisis Getis-Ord evidencia que el 28.07% de las localidades del país se encuentran en un riesgo alto/alto (HH) al establecimiento de la influenza altamente patógena y 39.5% en un riesgo bajo/bajo (LL), siendo valores estadísticamente significativos, y por el contrario con valores extremos altos y bajos se encuentra en el 0.38% de las localidades con alto/bajo (HL) y 1.09% en riesgo bajo/alto (LH); de igual forma se identifica que un 30.97% presenta una agregación no significativa (Figura 6 y 7b) .

Como respaldo estadístico al modelado geoespacial se realizó una regresión geográficamente ponderada GWR; resultando un modelo estadísticamente significativo ($p < 0.001$); que además contó con una $r^2 = 0.84$, es decir las características espaciales de los factores de riesgo de establecimiento & la densidad poblacional explican el 84% de la variación espacial del riesgo de establecimiento del agente causal de la influenza altamente patógena en territorio nacional (Figura 7a).

El modelo GWR se comportó de forma eficiente ya que definió más puntualmente las áreas de influencia en riesgo de establecimiento del agente causal de la influenza tipo A (Figura 6).

El análisis de la regresión evidencia 10 niveles de riesgo de establecimiento en territorio nacional que en orden de magnitud se representan de la siguiente forma: con el riesgo más elevado (0.9) y (0.8) se encuentran el 2.55% y 3.79% del total de las localidades del país, con nivel riesgo alto (0.7) y (0.6) se encuentran el 5.2% y el 7.41% de las localidades del país; además, con nivel de riesgo medio (0.5) y (0.4) las localidades identificadas son el 8.15% y el 12.76% respectivamente, mientras que en riesgo bajo (0.3) y (0.2) se identifican mayor concentración de localidades el 23.94% y el 20.1% y finalmente en riesgo de establecimiento muy bajo (0.1) se encuentran el 16.1% de las localidades del país (Figura 7a).

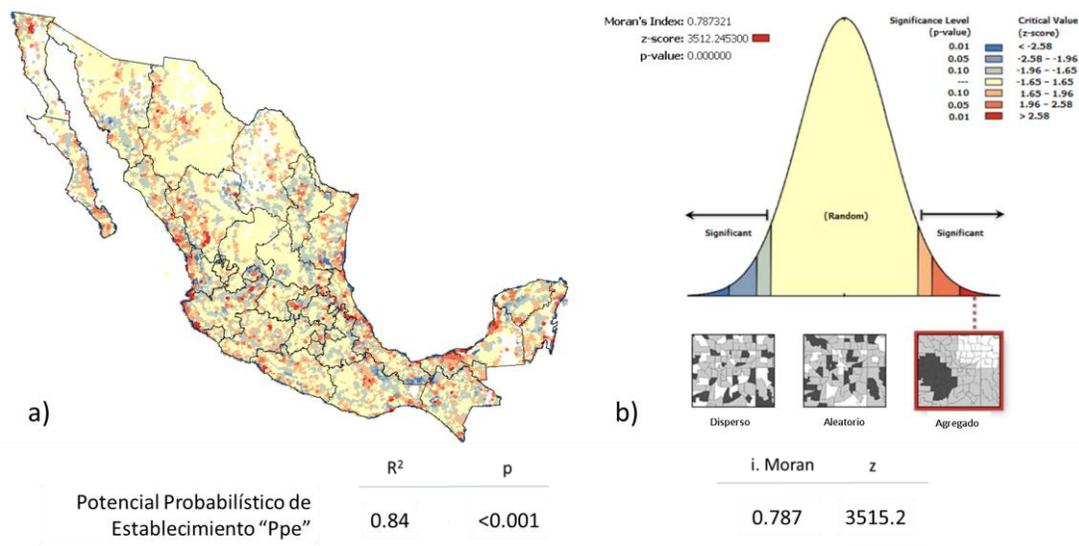


Figura 7.- a) Regresión geográficamente ponderada del riesgo de establecimiento del agente causal de la influenza tipo A altamente patógena; b) Índice de Moran del riesgo de establecimiento del agente causal de la influenza tipo A altamente patógena.

DISCUSIÓN

El modelado geoespacial en la estimación del potencial probabilístico de establecimiento permite caracterizar el territorio según criterios epidemiológicos del agente causal de la influenza tipo A; y se refleja a través de los denominados mapas de riesgo sanitario, que se sustentan con criterios espaciales y estadísticos, con la finalidad de fortalecer la toma de decisiones en materia sanitaria considerando la visión de una sola sanidad propuesta por la OMS¹¹; en la que señala que la Salud Pública y Sanidad Animal son interdependientes y están vinculadas en los ecosistemas en los cuales coexisten²⁰.

La aplicación del modelo de aptitud ambiental permitió clasificar adecuadamente las áreas de mayor similitud climática pues se validó con el área bajo la curva con un valor de COR de 0.923, por lo que se consideró como un buen diagnóstico si tomamos en cuenta que el valor crítico en este tipo de modelos es de 0.700 según Keiko *et al.*,2013¹⁵, cabe señalar que las variables predictoras importantes del modelo se asocian a la precipitación, humedad y temperatura contribuyendo con más de la mitad de la predicción del modelo de aptitud ambiental con el 62.3%; Siendo resultados semejantes a estudios previos que han demostrado la efectividad de este tipo de análisis para identificar escenarios de riesgo ante virus altamente patógenos en Japón¹⁸, China¹³, Medio Oriente²⁹ y Estados Unidos⁹.

El modelo de riesgo natural permitió identificar que 15.6% de la superficie nacional se encuentra caracterizado en este tipo de riesgo, por lo que es pertinente señalar que una estrategia de prevención pueden ser la implementación de los sitios centinela para la vigilancia epidemiológica en las áreas aledañas a las AICAS; para identificar lo más tempranamente posible algún caso o brote de influenza altamente patógena, asociado a principalmente a la interacción de aves migratorias y aves nativas del país en los sitios de encuentro e interacción entre hospederos.

Además el modelo de riesgo antrópico permite evidenciar que un 4.78% se encuentra bajo esta modalidad de riesgo, aunque es un porcentaje estimado muy bajo no deja de ser importante porque una vez establecidos este tipo de virus existe un riesgo latente en las regiones cercanas en su posible dispersión, por ello es importante mantener en buen estado las instalaciones de la unidades de producción avícola, a través de un manejo adecuado de los residuos e implementar una vigilancia epidemiológica de las aves de corral por personal altamente capacitado.

La asociación e interacción espacial del riesgo ambiental, natural y antrópico juegan un papel fundamental como factores de riesgo para el establecimiento de virus altamente patógenos y su posible recombinación como lo identifico Belkira *et al.*, 2018; en su investigación de riesgo de establecimiento de virus de baja y alta incidencia patogenicia realizado en California, EUA. ⁸

El uso de base de datos espaciales analizada en el entorno de los SIG y en específico la EEMC aportan grandes bondades para el estudio de salud pública debido a que puede fortalecer la

detección temprana ante problemas de salud ambiental o posibles epidemias; por lo que puede llegar a ser insumos de vital importancia para soportar la toma de decisiones ante problemas de salud. En este caso permitió identificar un escenario de las áreas o superficies que reúnen las condiciones idóneas en las que puede establecerse virus pandémicos, lo cual es de gran apoyo para dirigir u orientar acciones preventivas y correctivas hacia estas áreas específicas.

Concretamente, se identificaron 19 clúster de alto riesgo para el establecimiento, lo cual significa que en estas áreas convergen el conjunto de características propicias para el establecimiento de este tipo de virus; lo que podría sugerir que se deben fortalecer las acciones de la vigilancia epidemiológica dirigidas especialmente a grupos vulnerables en dichas áreas; como lo son niños menores de 2 años y adultos mayores como los señala la OMS; además, personas que vivan próximas de una área de producción avícola o un cuerpo de agua como lo menciona el DINESA del SENASICA, e incluso donde estos factores sean comunes el riesgo de establecimiento se potencializa; así mismo, en áreas urbanas el nacimiento de personas puede jugar un papel importante en el contagio de este tipo de virus.

Por otro lado, el modelo del potencial probabilístico de establecimiento contó con un buen respaldo geoestadístico, específicamente por el Índice de Moran y la regresión geográficamente ponderada, lo que otorgan un respaldo estadístico al modelo de establecimiento, lo cual permite tener un resultado más robusto sustentado estadísticamente evidenciando los clúster riesgo de establecimiento, es decir, la agregación de áreas con características que incrementan el riesgo de establecimiento de este tipo de virus.

Finalmente es recomendable estrechar las relaciones de los organismos sanitarios nacionales e internacionales involucrando la salud humana y la sanidad animal, para fortalecer la transversalización de la información y con ello estimar escenarios con mayor poder predictivo con mayor resolución espacial en la estimación del riesgo ante enfermedades emergentes y remergentes como los virus tipo A de baja y alta incidencia patógena.

Referencias

1. Adhikari D, Barik S, Upadhaya K. Habitat distribution modelling for reintroduction of *Ilex khasiana* Purk., a critically endangered tree species of northeastern India. *Ecol Eng.* el 1 de marzo de 2012;40:37–43.
2. Aguirre-Salado C, Valdez-Lazalde JR, Sánchez-Díaz G, Miranda-Aragón L, Aguirre-Salado A. Modelling site selection for tree plantation establishment under different decision scenarios. *J Trop For Sci.* el 9 de julio de 2015;27:298–313.

3. Análisis de punto caliente (Gi* de Getis-Ord)—Ayuda | ArcGIS for Desktop [Internet]. [citado el 22 de junio de 2018]. Disponible en: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-statistics-toolbox/hot-spot-analysis.htm>
4. ArcGIS. Cómo funciona la densidad kernel—Ayuda | ArcGIS Desktop [Internet]. [citado el 22 de junio de 2018]. Disponible en: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-kernel-density-works.htm>
5. Andrew D. Cliff MSR. The Geographical Spread of Avian Influenza A (H5N1): Panzootic Transmission (December 2003–May 2006), Pandemic Potential, and Implications: *Annals of the Association of American Geographers*: Vol 98, No 3. *Ann Assoc Am Geogr* [Internet]. 2008 [citado el 23 de junio de 2018];98(Issue 3). Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00045600802098958>
6. Aneas de Castro Susana D. Riesgos y peligros: una visión desde la geografía. *Scripta Nova* [Internet]. No. 60. Disponible en: <http://www.ub.edu/geocrit/sn-60.htm>
7. Alkhamis M, Hijmans RJ, Al-Enezi A, Martínez-López B, Perea AM. The Use of Spatial and Spatiotemporal Modeling for Surveillance of H5N1 Highly Pathogenic Avian Influenza in Poultry in the Middle East. *Avian Dis.* 2016;60(1 Suppl):146–55.
8. Belkhiria J, Hijmans RJ, Boyce W, Crossley BM, Martínez-López B. Identification of high risk areas for avian influenza outbreaks in California using disease distribution models. *PLOS ONE*. el 31 de enero de 2018;13(1):e0190824.
9. Belkhiria J, Alkhamis MA, Martínez-López B. Application of Species Distribution Modeling for Avian Influenza surveillance in the United States considering the North America Migratory Flyways. *Sci Rep*. 14 de 2016;6:33161.
10. Buzai GD. Geografía y Sistemas de Información Geográfica Evolución Teórico Metodologica hacia los Campos Emergentes. *Rev Geográfica América Cent.* 2012;2(48E):15–67.
11. El riesgo de introducción y diseminación de Influenza Aviar [Internet].FAO [citado el 23 de junio de 2018]. Disponible en: <http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/010/a0632s/a0632s03.pdf>
12. Epidemiología Espacial. Laboratorio de Salud Publica. [Internet]. 2018 [citado el 23 de junio de 2018]. Disponible en: <http://cristhianvillar.blogspot.com/2014/06/epidemiologia-espacial.html>
13. Fang L-Q, Li X-L, Liu K, Li Y-J, Yao H-W, Liang S, et al. Mapping Spread and Risk of Avian Influenza A (H7N9) in China. *Sci Rep*. el 26 de septiembre de 2013;3:2722.
14. Getis A. & J.K. Ord *The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics* - Getis - 1992 - *Geographical Analysis* - Wiley Online Library. *Geogr Anal.* julio de 1992;24(Issue 3):189–206.

15. Herrick KA, Huettmann F, Lindgren MA. A global model of avian influenza prediction in wild birds: the importance of northern regions. *Vet Res.* el 13 de junio de 2013;44:42. . <https://doi.org/10.1186/1297-9716-44-42>
16. Kannan VC, Hodgson N, Lau A, Goodin K, Dugas AF, LoVecchio F. Geolocalization of Influenza Outbreak Within an Acute Care Population: A Layered-Surveillance Approach. *Ann Emerg Med.* noviembre de 2016;68(5):618–26. DOI: 10.1016/j.annemergmed.2016.07.025
17. Lüthy IA, Ritacco V, Kantor IN. A cien años de la gripe “española. *Med B Aires.* abril de 2018;78(2):113–8. ISSN 1669-9106 https://www.researchgate.net/profile/Isabel_Luethy/publication/324571134_One_hundred_years_after_the_Spanish_flu/links/5add56aaca272fdaf870e97/One-hundred-years-after-the-Spanish-flu.pdf
18. Moriguchi S, Onuma M, Goka K. Potential risk map for avian influenza A virus invading Japan. *Divers Distrib.* 19(1):78–85.
19. Gripe aviar. Oficina Regional para las Américas de la Organización Mundial de la Salud. Virus de la gripe aviar y otros virus de la gripe de origen zoonótico [Internet]. World Health Organization. [citado el 23 de junio de 2018]. Disponible en: [http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/influenza-\(avian-and-other-zoonotic\)](http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/influenza-(avian-and-other-zoonotic))
20. Virus de la gripe aviar y otros virus de la gripe de origen zoonótico. Organización Panamericana de la Salud y Organización Mundial de la Salud 2018. OPS OMS | Gripe aviar [Internet]. Organización Panamericana de la Salud. 2018 [citado el 23 de junio de 2018]. Disponible en: https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_topics&view=article&id=344&Itemid=40932&lang=es
21. Programa Nacional Salud Aviar. 2017. Código: PN-AVI-PV-01. [En línea] Protocolo Vigilancia Epidemiológica Influenza Aviar Versión 05 Página 1 de 52. [Consultado el 2 de julio de 2018] <http://www.senasa.go.cr/informacion/centro-de-informacion/informacion/sgc/pnsa/1327-pn-avi-pv-01-vs5-protocolo-vigilancia-influenza-aviar-2017/file>.
22. Prosser DJ, Hungerford LL, Erwin RM, Ottinger MA, Takekawa JY, Newman SH, et al. Spatial Modeling of Wild Bird Risk Factors for Highly Pathogenic A(H5N1) Avian Influenza Virus Transmission. *Avian Dis.* el 5 de noviembre de 2015;60(1s):329–36. PubMed PMID: 27309075.
23. Manual de atención a la salud ante emergencias. 2013. Plan nacional para la preparación y respuesta ante la intensificación de la influenza estacional o ante una pandemia de influenza. [En línea]. Subsecretaría de Prevención y Promoción de la Salud CENAPRECE. Secretaría de Salud [Interne] http://www.cenaprece.salud.gob.mx/programas/interior/emergencias/descargas/pdf/Plan_Nacional_Influenza.pdf

24. Stevens KB, Gilbert M, Pfeiffer DU. Modeling habitat suitability for occurrence of highly pathogenic avian influenza virus H5N1 in domestic poultry in Asia: A spatial multicriteria decision analysis approach. *Spat Spatio-Temporal Epidemiol.* el 1 de marzo de 2013;4:1–14. PubMed PMID: 23481249.
25. SAGARPA SENASICA. Manual de Procedimientos para la Prevención, Control y Erradicación de la Influenza Aviar de Alta Patogenicidad (IAAP) [Internet]. CPA. 2011 [citado el 15 de marzo de 2017]. (DINESA). Disponible en: http://www.zoonosis.unam.mx/contenido/m_academico/archivos/Manual_Emergencia_control_erradicacion_Influenza_Aviar_Alta_Patogenicidad.pdf
26. Śmietanka K, Bocian Ł, Meissner W, Ziętek-Barszcz A, Żółkoś K. Assessment of the Potential Distance of Dispersal of High Pathogenicity Avian Influenza Virus by Wild Mallards. *Avian Dis.* el 28 de octubre de 2015;60(1s):316–21. DOI: 10.1637/11080-040715-RegR
27. Silva-Gallegos JJ, Aguirre-Salado CA, Miranda-Aragón L, Sánchez-Díaz G, Valdez-Lazalde JR, Pedroza-Carneiro JW, et al. Locating Potential Zones for Cultivating *Stevia rebaudiana* in Mexico: Weighted Linear Combination Approach. *Sugar Tech.* el 1 de abril de 2017;19(2):206–18.
28. Torres-López TM, Núñez-Sandoval YC, Cruz-Villarreal A de J de la. Representaciones sociales de la influenza humana de adolescentes de la ciudad de Guadalajara, México. *Actual En Psicol.* el 21 de junio de 2017;31(122):17–30. <http://dx.doi.org/10.15517/ap.v31i122.24578>
29. Zhang Z, Chen D, Chen Y, Davies TM, Vaillancourt J-P, Liu W. Risk signals of an influenza pandemic caused by highly pathogenic avian influenza subtype H5N1: spatio-temporal perspectives. *Vet J Lond Engl 1997.* junio de 2012;192(3):417–21. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2011.08.012>

Financiamiento: la presente investigación se llevó a cabo gracias la beca otorgada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT en el periodo de 2016 a 2018.

Contribución de los autores: Conceptualización, planteamiento, análisis e interpretación: EIZ, DGH, GMA y MEGC. Todos los autores aprueban la versión final del escrito y asumen la responsabilidad pública por el contenido del mismo.

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.