Nº 74, julio-diciembre de 2020, pp. 183-195.
ISSN: 0213-4691. eISSN: 1989-9890.
DOI: 10.14198/INGEO2020.NMCA

Investigaciones Geográficas
Instituto Interuniversitario de Geografía
Universidad de Alicante

Cita bibliográfica: Niño, L., Morales, J.A., Castro-Salas, M., & Alcalá, L. (2020). Análisis espacial de un índice pupal de *Aedes aegypti*: una configuración del riesgo de transmisión de arbovirosis. *Investigaciones Geográficas,* (74), 183-195. https://doi.org/10.14198/INGEO2020.NMCA

Análisis espacial de un índice pupal de *Aedes aegypti*: una configuración del riesgo de transmisión de arbovirosis

Aedes aegypti *pupal-index spatial analysis: a configuration of the arbovirosis transmission risk*

Larry Niño[1]
Juliana Andrea Morales[2*]
Mirley Castro-Salas[3]
Lucas Alcalá[4]

Resumen

El presente trabajo aborda un análisis espacial de un índice pupal (IP) de *Aedes aegypti* para establecer la aplicabilidad de la información geográfica y evaluar el riesgo de transmisión de arbovirosis en una localidad específica. Se obtuvo el IP y los índices de infestación tradicionales de larvas de *Aedes aegypti* en 366 viviendas, en una inspección del municipio de Tena (Cundinamarca, Colombia). La obtención de datos georreferenciados permitió analizar espacialmente las variables consideradas, con base en interpolaciones realizadas en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Se contabilizaron 1.211 habitantes y se inspeccionaron 617 depósitos. Acorde con la clasificación de depósitos, los tanques bajos fueron los más frecuentes (51,0 %) y los más productivos, aportando el 93,3 % de las pupas. El índice de pupas por persona estimado en la localidad fue de 0,4. Se describe la heterogeneidad espacial del riego de transmisión de arbovirosis y de sus componentes. La implementación de la representación cartográfica de índices pupales, sumado a un análisis de riesgo de transmisión de arbovirosis, de acuerdo a la vulnerabilidad humana y la amenaza vectorial, constituyen aportes importantes a las estrategias de control y prevención, permitiendo una gestión optimizada de recursos por parte de los entes territoriales.

Palabras clave: *Aedes aegypti*; arbovirosis; análisis espacial; prevención y control; Colombia.

Abstract

This study seeks to establish the applicability of the spatial analysis of the *Aedes aegypti* pupal index (PI) as a tool to evaluate the transmission risk of arbovirus in a specific locality. The PI and traditional infestation indexes of *Aedes aegypti* larvae were obtained for 366 households during the rainy season in 2018 in the La Gran Vía. With the data obtained, a geographic information system (GIS) was created, and the spatial interpolation of the variables included in the study was made. Some 1,211 inhabitants were counted, and 617 containers were inspected. According to the container classification, concrete tanks were the most frequent (51%) and the most productive – accounting for 93% of pupae. The estimated pupal index in the locality was 0.4. The spatial heterogeneity of the arbovirus transmission risk and its components is described.

1 Laboratorio de Salud Pública. Secretaría de Salud. Gobernación de Cundinamarca, Colombia. lninoa@unal.edu.co
2 Laboratorio de Salud Pública. Secretaría de Salud. Gobernación de Cundinamarca, Colombia. jmoralesmonje@gmail.com. * Autora para correspondencia
3 Laboratorio de Salud Pública. Secretaría de Salud. Gobernación de Cundinamarca, Colombia. castrosalas@gmail.com
4 Laboratorio de Salud Pública. Secretaría de Salud. Gobernación de Cundinamarca, Colombia. lucasandres20@yahoo.com

Recepción: 25/02/2020. **Aceptación:** 06/10/2020. **Publicación:** 17/12/2020 (*en prensa*: 10/11/2020).

Este trabajo se publica bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional.
© Larry Niño, Juliana Andrea Morales Monje, Mirley Castro-Salas, Lucas Alcalá

The implementation of the cartographic representation of the pupal index, in addition to an analysis of arbovirus transmission risk, according to the human vulnerability and the vectorial menace, provides important information for control and prevention strategies, and enables an enhanced management of resources by local authorities.

Key words: *Aedes aegypti*; arbovirus; spatial analysis; prevention and control; Colombia.

1. Introducción

Las arbovirosis actualmente registran una amplia dispersión global, con cerca de cien millones de casos anuales en un centenar de países tropicales y sub-tropicales, en los cuales se estiman 3.500 millones de personas en riesgo de infección (Kyle & Harris, 2008; Halstead, 2008). De acuerdo a datos del Instituto Nacional de Salud (INS, 2018), en Colombia fueron reportados 44.825 casos de Dengue (526 graves), 663 de Chikungunya y 857 de Zika durante 2018. La amplia y persistente distribución de las arbovirosis se explica por factores como los altos índices de crecimiento de las poblaciones humanas, el creciente intercambio de bienes y transporte de pasajeros a escala global, la urbanización y densificación de ciudades sin planificación territorial adecuada, el aumento en la disponibilidad de sitios de cría para los mosquitos vectores y medidas inconvenientes de control vectorial (Chang, *et al.,* 2009; Eisen & Lozano, 2009).

El mosquito *Aedes aegypti* es el principal transmisor de arbovirosis en Colombia, donde su presencia se ha reportado hasta los 2.302 m de altitud y se estima que aproximadamente 28 millones de personas se encuentran en riesgo de infección (Ruiz-López, *et al.,* 2016). Corresponde a una especie antropofílica muy bien adaptada a los intradomicilios de zonas urbanas, su actividad vectorial es eficiente gracias a las características de comportamiento y habilidades de supervivencia, las cuales incluyen el uso de gran variedad de recipientes artificiales para la ovoposición, la resistencia de sus huevos a la desecación durante épocas de sequía y la capacidad hematofágica de las hembras para alimentarse en múltiples ocasiones (Souza & Carvalho, 2000; Corrêa, França & Bogutchi, 2005; Halstead, 2008). La eficiencia en el mecanismo de transmisión viral, sumado a los atributos biológicos del *Aedes aegypti*, condicionan la cada más frecuente aparición de brotes de arbovirosis, cuya incidencia es controlada por el estado inmunológico de la población humana; como consecuencia, en los lugares endémicos para arbovirosis, donde se supone que no existen cambios sustanciales en la proporción de humanos susceptibles, el aumento en la abundancia de los mosquitos vectores puede incrementar la transmisión viral al aumentar la probabilidad del contacto vector-humano (Regis, *et al.*, 2008; Eisen & Lozano, 2009).

Diversas investigaciones en el mundo han implementado el conteo de pupas como indicador indirecto de la cantidad de vectores adultos (Islam, Haqueb, Hossainc & Rochond, 2019; Focks & Alexander, 2006), que además podría constituir un estimador del riesgo de un aumento inesperado de casos (Focks, Brenner, Hayes & Daniels, 2000). Aunque el país incluye lineamientos de indicadores relacionados con el monitoreo de pupas, particularmente en la "Gestión integrada para la vigilancia entomológica y control de la transmisión de dengue", actualmente los programas de vigilancia entomológica rutinaria aún se fundamentan en los índices entomológicos tradicionales (Depósitos, Viviendas y Breteau), los cuales se basan en la observación de larvas para la toma de decisiones. Los indicadores como el Índice de Pupas por Persona (IPP) y el Índice de Pupas por Hectárea (IPH) se han utilizado en el contexto de investigaciones entomológicas y epidemiológicas; estos proponen identificar los criaderos más importantes en épocas específicas del año y tienen como objetivos principales el direccionamiento de recursos, la reducción de costos (Alcalá, Quintero, González-Uribe & Brochero, 2015) y la evaluación de estrategias de intervención (Quintero, *et al.,* 2015).

La evaluación de situaciones en salud requiere de indicadores fehacientes que establezcan las condiciones de riesgo, originadas bajo condiciones ambientales y sociales (Barcellos, 2003). El riesgo se define como la probabilidad de ocurrencia de un evento adverso, en circunstancias espaciales y temporales definidas, que resulta en pérdidas económicas o sociales; en su estimación se integran la amenaza o fuente de peligro y la vulnerabilidad o propensión a daños (Rincón-Romero & Londoño, 2009; Coy, 2010). En el caso de las arbovirosis transmitidas por el mosquito *Aedes aegypti*, la amenaza está asociada con la distribución del vector, mientras que la vulnerabilidad se relaciona con la distribución de la población humana, su estado inmunológico y los sitios disponibles para la cría del mosquito (Niño, 2018); la principal ventaja de este enfoque es que permite evidenciar de forma individual los atributos ecológicos de las poblaciones humanas y del mosquito vector, pues altas infestaciones vectoriales no implican necesariamente

un incremento en la magnitud de eventos epidemiológicos, donde factores como la movilidad de los mosquitos, las condiciones inmunológicas de la población humana y los comportamientos diferenciales de las personas, pueden influenciar significativamente la transmisión de arbovirosis (Eisen & Eisen, 2008).

El estudio de las Enfermedades Transmitidas por Vectores (ETV) debe incluir perspectivas ecológicas, donde las condiciones ambientales que determinan los sitios de reproducción de los vectores, y que facilitan la transmisión de las infecciones, adquieren relevancia geográfica (Parra-Henao, 2010); lo anterior hace que los Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituyan un elemento fundamental en la descripción y análisis de la distribución de la amenaza entomológica, la vulnerabilidad socioeconómica y el riesgo epidemiológico de las ETV (Niño, 2018). Asimismo, la cartografía se constituye como un medio eficaz para la organización, presentación e interpretación de la información que sustenta la correlación entre los eventos en salud y las variables socioeconómicas y geográficas desde una perspectiva ecológica y multifactorial (Koch, 2009).

Los métodos de análisis como la interpolación espacial, usan localizaciones con valores conocidos de una variable, para estimar valores donde estos se desconocen; a su vez, permiten generar información continua a partir de datos puntuales para facilitar su integración con otras variables georreferenciadas. La precisión de estos métodos depende de la abundancia y distribución de los puntos de control, puesto que la estimación de la interpolación espacial estará mayormente influenciada por valores conocidos cercanos, de manera que para una estimación efectiva se requiere de puntos de control uniformemente distribuidos en el área de estudio. Los métodos de interpolación pueden clasificarse de distintas formas: de acuerdo a los puntos de control implementados durante la estimación, pueden ser de carácter global si los incluye a todos y de carácter local cuando solo involucra una muestra de ellos; se consideran exactos si la superficie estimada incluye los valores de los puntos de control en las localizaciones e inexactos cuando estos valores cambian; y son de carácter determinístico cuando no se estiman los errores de los cálculos y estocástico cuando las estimaciones incluyen los errores y varianzas (Waller & Wotway, 2004; Albrecht, 2007; Chang, 2006).

El objetivo del presente trabajo fue realizar un estudio piloto de análisis espacial, implementando la ponderación de distancia inversa (IDW, por su sigla en inglés), de un índice pupal de *Aedes aegypti* en la inspección de La Gran Vía (Tena, Cundinamarca), el cual pretende facilitar la toma de decisiones desde salud pública y evidenciar la aplicabilidad de los SIG y la interpolación espacial como métodos eficaces para la evaluación rutinaria del riesgo de transmisión de arbovirosis en un espacio geográfico concreto.

2. Metodología

Se realizó un estudio de tipo transversal, observacional y analítico en la inspección de La Gran Vía, municipio de Tena en Cundinamarca. La Inspección se encuentra localizada en las coordenadas 4° 39´ de latitud Norte y 74° 24´ de longitud Oeste. De acuerdo al Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), la proyección de habitantes en Tena al 2018 fue de 9.359 personas. El municipio presenta un patrón bimodal de lluvias con picos en abril y noviembre y periodos secos en julio y diciembre. Tena cuenta con un servicio de suministro de agua regular por parte del acueducto, sin embargo la calidad se considera deficiente, puesto que se recibe en las viviendas con exceso de sedimentos; por esta razón, la población almacena en sus viviendas el agua lluvia necesaria para sus actividades diarias en diferentes tipos de recipientes. Durante la última semana del mes de marzo de 2018, fue inspeccionada la totalidad de las viviendas de La Gran Vía, se registraron el número de habitantes, la cantidad de depósitos con agua y la infestación por estadios inmaduros de *Aedes aegypti*.

Los depósitos fueron clasificados en tanques bajos, llantas, diversos en uso, diversos en desuso y sumideros; asimismo, se siguió la metodología de Romero-Vivas y colaboradores para determinar la abundancia de pupas (Romero-Vivas, Arango-Padilla & Falconar, 2006): con los depósitos pequeños (≤ 20 L) como diversos, jarrones, botellas y llantas, se vació la totalidad del agua en un contenedor de color blanco y se contaron las pupas totales, mientras que en los depósitos grandes (>20 L), como tanques bajos, se tomó una muestra con una malla y se calculó el total de acuerdo al nivel del agua. Para la confirmación taxonómica de los ejemplares, se almacenaron en alcohol al 70 % una muestra de máximo 5 larvas de cada depósito positivo; además, todas las pupas encontradas fueron capturadas vivas y llevadas al laboratorio hasta la emergencia de los adultos y, una vez identificados, se sacrificaron a -10 °C durante 30 minutos, fueron almacenados con gel de sílice y rotulados adecuadamente.

La cartografía de referencia, constituida por el trazado de manzanas y vías principales, para el estudio fue digitalizada utilizando el programa *Google Earth* y exportada en formato *kml*; las manzanas fueron representadas por entidades espaciales tipo polígono, mientras que las vías principales se representaron por entidades tipo línea. La localización de las viviendas se realizó con un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) marca *Garmin* de referencia *GPSMAP 64sx*, cuyas entidades espaciales tipo punto se exportaron en un archivo de formato *GPX* para su posterior proyección e integración con las demás variables en el SIG estructurado para el estudio. Posteriormente, se articularon en el SIG las distintas capas cartográficas en formato *shape* y en el sistema de proyección WGS84 UTM 18N correspondiente al código 32618 del estándar *European Petroleum Survey Group* (EPSG), donde la localización de las viviendas se asoció con la información recolectada en campo. Los diferentes procedimientos de estructuración y análisis espacial se llevaron a cabo en el software ArcGis v10.1, la clasificación de las variables fue realizada con el procedimiento de rupturas naturales en los polígonos de Voronoi y de intervalos geométricos en la ponderación de distancia inversa. Las rupturas naturales realizan agrupamientos de acuerdo a las características inherentes de los datos para identificar los intervalos de valores similares y maximizar las diferencias entre clases; mientras que los intervalos geométricos realizan agrupamientos de acuerdo a series geométricas, minimizando la suma de los cuadrados del número de elementos en cada clase y asegurando un número de valores similar en los rangos (ESRI, 2011).

Los polígonos de Voronoi corresponden a un método exploratorio que divide el plano en regiones constituidas por las localizaciones más próximas a los puntos de control. Las líneas que delimitan los polígonos representan puntos del plano equidistante entre dos puntos de control vecinos, de forma que entre los polígonos conformados se encontrarán los puntos del plano cuya distancia al punto de control es menor que la distancia a cualquier otro de estos puntos (Albrecht, 2007; Chang, 2006; Puga, 2008). La ponderación de distancia inversa corresponde a un método local, exacto y determinístico, donde el peso de los puntos de control cercanos es expresado por el inverso de la distancia de separación elevado a un exponente, el cual sugiere que la magnitud de cambio alrededor de los puntos de control y la distancia de influencia es proporcional al valor de dicho exponente (Albrecht, 2007; Chang, 2006; Villatoro, Henríquez & Sancho, 2008). El estimador de la ponderación de distancia inversa se define como:

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{z_i}{d_i^p}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{d_i^p}\right)}$$

donde Z_p es el estimador, d es la distancia de separación entre un punto en el plano y un punto de control con atributo Z_i, y p el exponente de ponderación.

Para estimar la precisión de la ponderación de distancia inversa, se implementó una validación cruzada que omitió la totalidad de los puntos de control, uno a la vez, los cuales fueron calculados alternadamente. Con la diferencia entre los valores observados y estimados se calculó la raíz del error cuadrático medio (RMS por sus siglas en inglés), el cual establece la precisión de la interpolación con relación a su cercanía a cero (Albrecht, 2007; Villatoro *et al.,* 2008).

3. Resultados

Fueron visitadas 366 viviendas (Figura 1), donde se contabilizaron 1.211 habitantes con una media de 3,3 y un rango de una a 30 personas por vivienda. Se inspeccionaron 617 depósitos con una media de 1,7 y un rango de cero a 42 depósitos por vivienda. En total, fueron estimadas 481 pupas con una media de 1,3 y un rango de cero a 180 pupas por vivienda; con relación al número de habitantes, se calcularon 0,4 pupas por persona. De acuerdo a la infestación por larvas, el 18 % de las viviendas y el 13,3 % de los depósitos se encontraron infestados con individuos de *Aedes aegypti* en este estadio, mientras que el 6,6 % de las viviendas y el 4,9 % de los depósitos se encontraron infestados con pupas. Conforme a la Tabla 1, donde se describen las frecuencias de los tipos de depósito, y la respectiva infestación por larvas y pupas, el depósito encontrado con mayor frecuencia correspondió a tanques bajos, seguido en orden respectivo por los diversos en uso, las llantas, los diversos en desuso y los sumideros. Los tanques bajos presentaron la mayor proporción de depósitos infestados de larvas, seguidos por los diversos en uso, en desuso y las

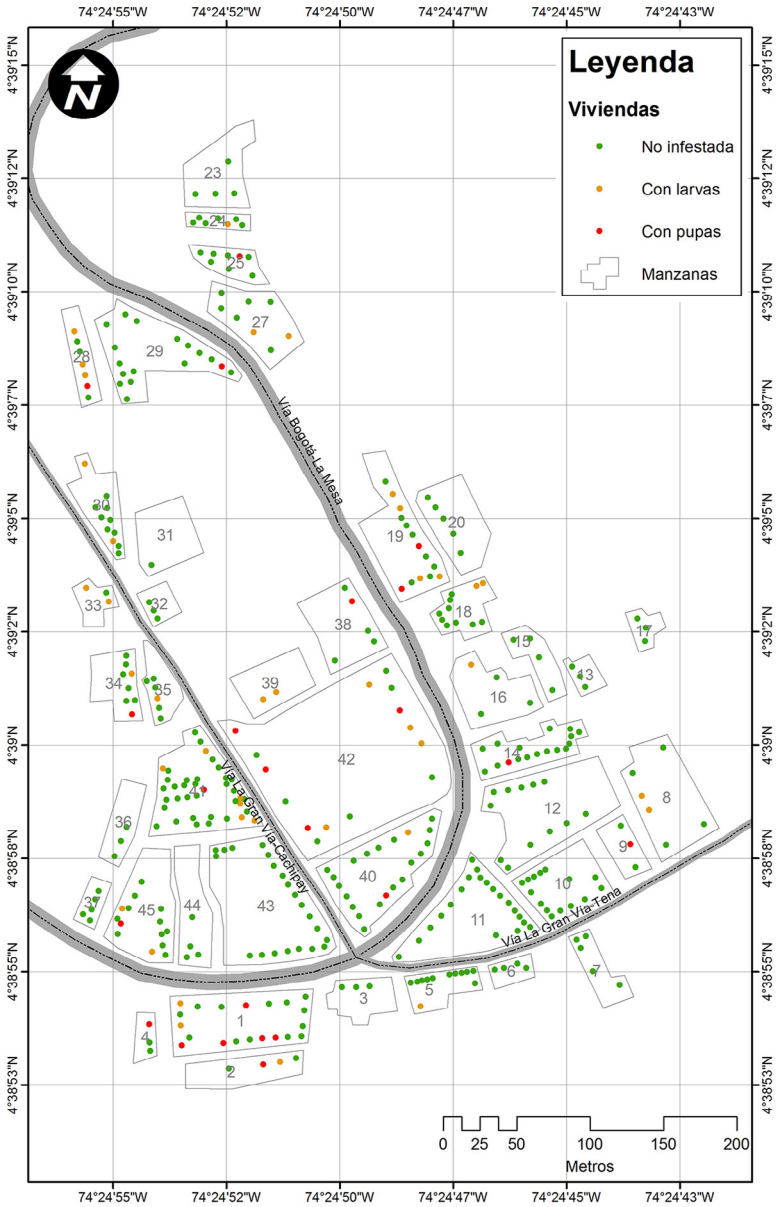
llantas, respectivamente; el depósito con mayor proporción de infestación por pupas corresponde a tanques bajos, seguido por las llantas y los diversos en desuso (Tabla 1), no obstante, la contribución relativa de pupas de los tanques fue de 93,3 %.

Tabla 1. Frecuencias por tipos de depósito e infestación por larvas y pupas.

Tipo de depósito	Frecuencia (n-%)	Infestación por larvas (n-%)	Infestación por pupas (n-%)
Tanques bajos	315-51,0	62-19,7	23-7,3
Llantas	83-13,4	6-7,2	2-2,4
Diversos en uso	178-28,8	7-3,9	1-0,6
Diversos en desuso	40-6,5	9-22,5	0-0,0
Sumideros	1-0,2	0-0,0	0-0,0

Elaboración propia

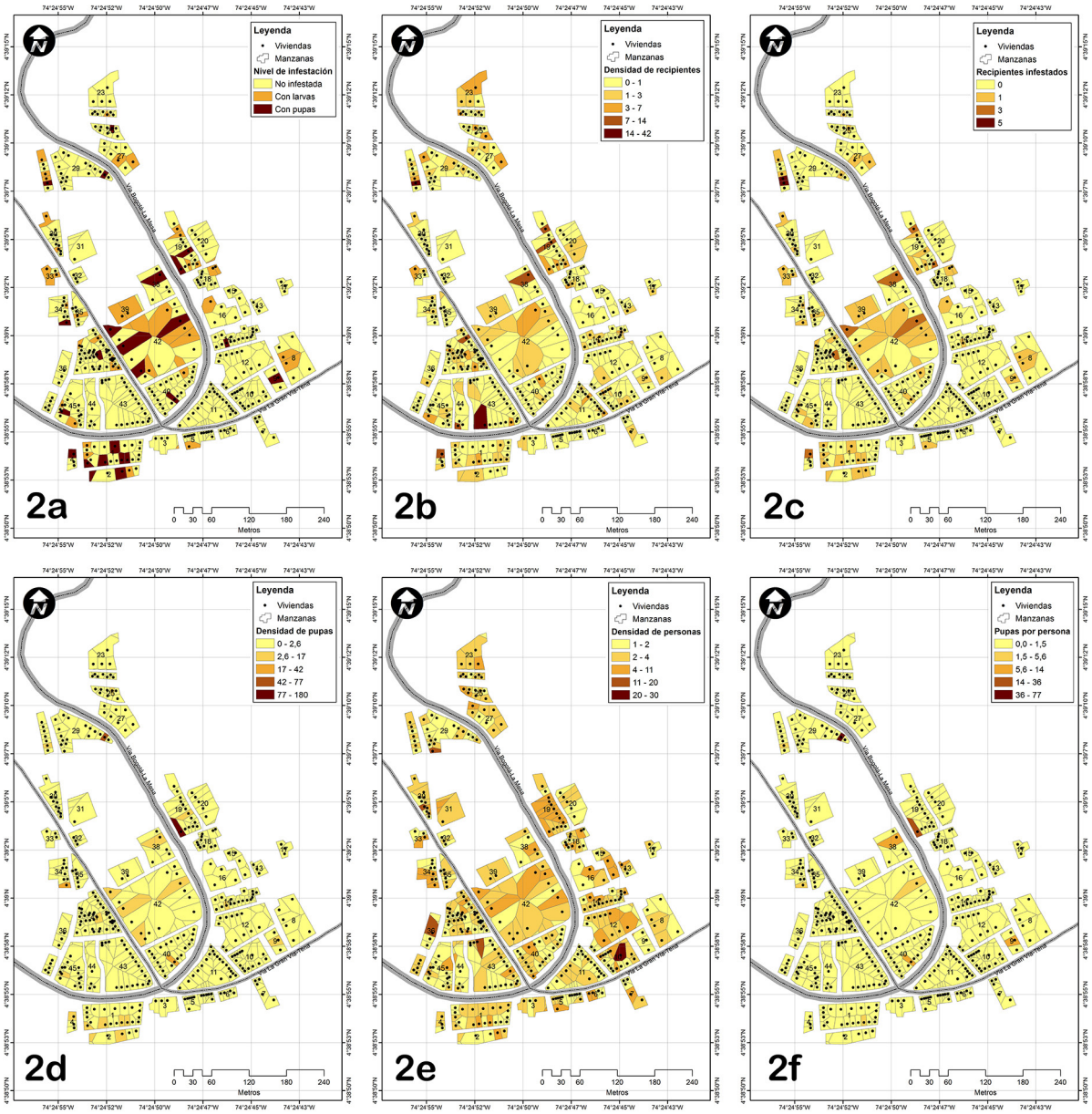
Figura 1. Disposición de viviendas visitadas y su estado de infestación por *Aedes aegypti* en la Inspección La Gran Vía-Tena, Cundinamarca



Elaboración Niño, L.

La zona de estudio se dividió mediante polígonos de Voronoi, los cuales representan el área de influencia de la infestación por *Aedes aegypti* en viviendas, de acuerdo al estado inmaduro (Figura 2a), al total de recipientes encontrados e inspeccionados (Figura 2b), al total de recipientes infestados con estadios inmaduros (Figura 2c), a la abundancia de pupas estimadas (Figura 2d), al número de personas censadas (Figura 2e) y al índice de pupas por persona calculado (Figura 2f). La cartografía generada con esta metodología permitió describir las variables consideradas a través del espacio y establecer que los datos son estacionarios y que no presentan tendencias en toda el área de estudio, lo cual supone que la varianza es constante y que no existen cambios sistemáticos en los valores; no obstante, las variables de abundancia de pupas y el índice de pupas por persona no mostraron una distribución normal, razón por la cual no fue posible implementar métodos estocásticos (Niño, 2008; Niño, 2011).

Figura 2. Polígonos de Voronoi: 2a) Nivel de infestación; 2b) total de recipientes; 2c) recipientes infestados; 2d) abundancia de pupas; 2e) número de personas; 2f) índice de pupas por persona

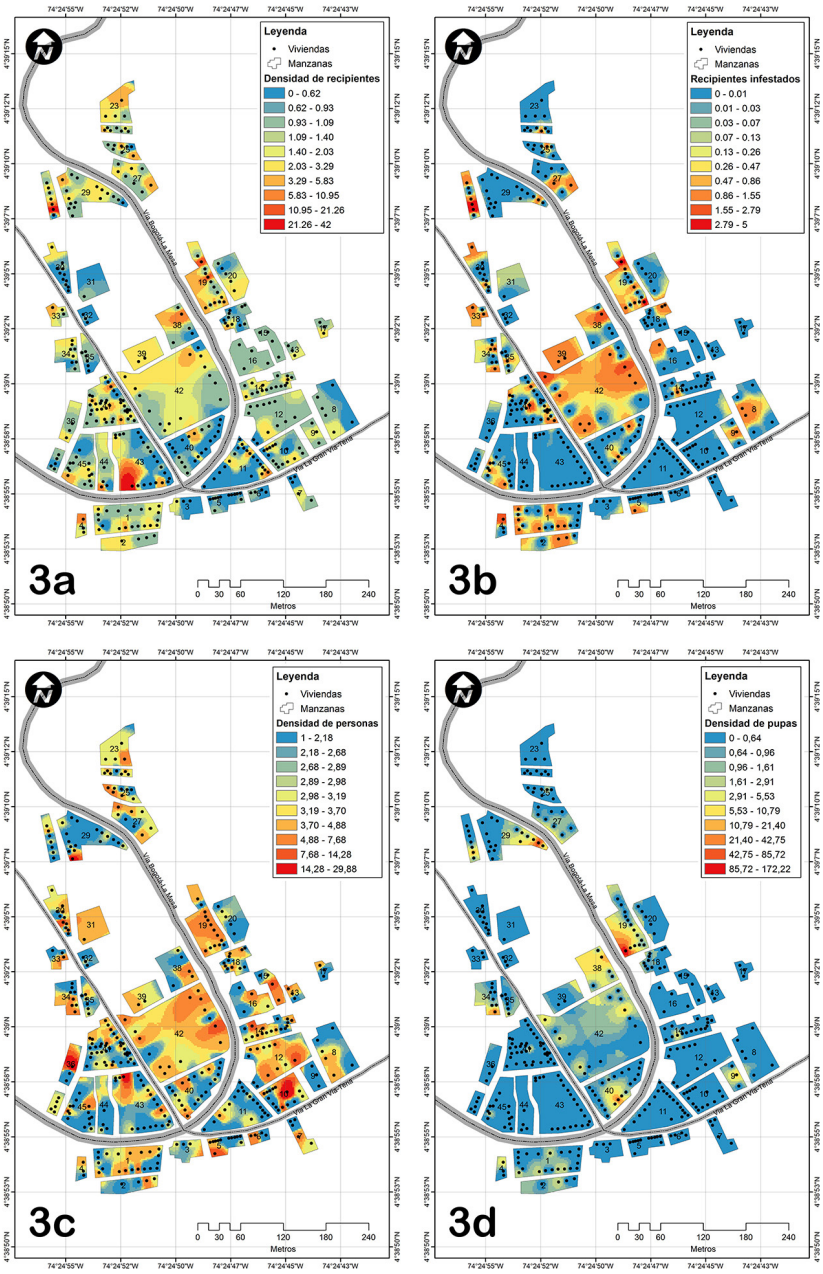


Elaboración Niño, L.

En la ponderación de distancia inversa, se implementó el dos como exponente en aquellas variables que involucraron recipientes y personas, y un exponente de cinco en las variables que incluyeron pupas,

puesto que se considera que la influencia de la variable entomológica se mantiene a una distancia mayor que las variables de origen antrópico con respecto a los puntos de control. Como parámetros complementarios de la interpolación, se incluyeron al menos 10 puntos de control vecinos en un sector de 40 m a la redonda, de acuerdo con las distancias de correlación espacial estimadas para *Aedes aegypti* con anterioridad en el país (Niño, 2008; Niño, 2011). De acuerdo a la validación cruzada, los RMS obtenidos mostraron mayor precisión en la estimación de los recipientes infestados (0,62), seguido por el número de personas (2,92), el total de recipientes (4,23), el índice de pupas por persona (6,79) y por último, la abundancia de pupas (11,56), cuya interpolación presentó la menor precisión. Adicionalmente, se realizaron regresiones ponderadas geográficamente con el estimado de pupas y el índice de pupas por persona como variables dependientes, aunque no fue posible obtener resultados por la evidente multicolinealidad entre las variables.

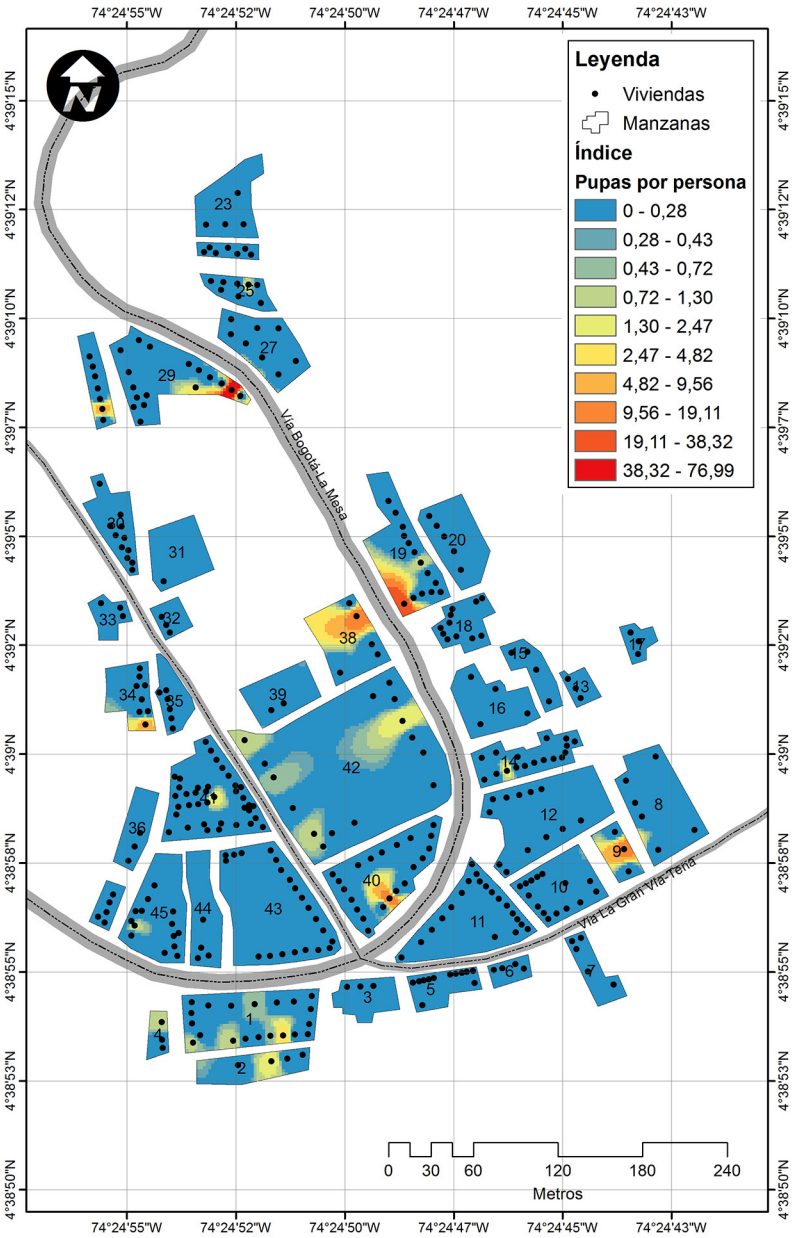
Figura 3. Ponderación de distancia inversa: 3a) total de recipientes; 3b) recipientes infestados; 3c) número de personas; 3d) abundancia de pupas.



Elaboración Niño, L.

Con relación a los focos establecidos con la cartografía generada por la ponderación de distancia inversa, se observa que la disponibilidad de recipientes como criaderos de *Aedes aegypti* es mayor en las manzanas 28 y 43, localizadas al costado occidental de la Inspección, hacia los extremos Norte y Sur respectivamente (Figura 3a). Los focos de recipientes infestados se observan principalmente en las manzanas 41, 42 y 38 en la región central del área de estudio, en las manzanas 28 y 4 al costado occidental y en la manzana 19 al extremo nororiental de La Gran Vía (Figura 3b). La interpolación del número de personas (Figura 3c) muestra agregaciones dispersas en la totalidad del área considerada, se destacan aquellas en las manzanas 29, 36 y 43, localizadas al costado occidental de la inspección, y en la manzana 10 en el extremo suroriental del área de estudio. Con respecto a la abundancia de pupas (Figura 3d) y el índice de pupas por persona (Figura 4), los focos principales se presentaron en las manzanas 19 y 29, localizadas al costado noroccidental de la Inspección, a los márgenes de la vía que conduce a Bogotá; las áreas interpoladas entre estos focos entran en contacto sobre un terreno desprovisto de viviendas, aunque en él se ubica una infraestructura abandonada que estaba destinada a plaza de mercado.

Figura 4. Ponderación de distancia inversa del índice de pupas por persona



Elaboración Niño, L.

4. Discusión

Dada la amplia distribución actual de las arbovirosis, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización Panamericana de la Salud (OPS) han establecido recientemente un modelo de abordaje para estas enfermedades, a través de la Estrategia de Gestión Integrada (EGI) para la Región de las Américas, incorporando los principales insumos técnicos de la Estrategia Mundial de la OMS para la prevención y el control del dengue (2012-2020) y articulando, a través de la investigación operativa y la comunicación social para el cambio conductual, los componentes de vigilancia epidemiológica, diagnóstico de laboratorio, atención al paciente, gestión integrada de vectores, medio ambiente y vacunas (OPS-OMS, 2018). Ante la falta de disponibilidad de una vacuna contra la mayoría de las arbovirosis, estas políticas de salud se basan en el fortalecimiento de otros componentes como el Manejo Integrado de Vectores (MIV), el cual es responsabilidad de los programas de ETV en Colombia, bajo jurisdicción de las secretarías de salud departamentales y distritales. A través de la investigación operativa, es posible plantear la diferenciación de responsabilidades entre los componentes de la EGI, conforme a la estructuración y articulación del riesgo de transmisión de arbovirosis: i) la gestión de la vulnerabilidad bajo el componente técnico social; ii) la gestión de la amenaza bajo el componente entomológico y control de vectores; y iii) la gestión del riesgo bajo el componente epidemiológico. Adicionalmente, el análisis espacial y la generación de cartografía temática constituyen elementos fundamentales que amplían el conocimiento e interpretación de la distribución de los eventos de importancia en salud pública, puesto que en la actualidad, el 80 % de las necesidades de información de los tomadores de decisiones en gobiernos locales se relacionan con atributos geográficos (Koch, 2009).

Los estudios entomológicos de vectores de arbovirosis se basan en el cálculo regular de índices de infestación larvaria en diferentes conglomerados geográficos, tales como los de vivienda, de depósito y Breteau. Estos índices se establecieron hace más de 90 años con el objetivo de estimar indirectamente la abundancia poblacional de *Aedes aegypti* y su relación con la transmisión de la fiebre amarilla urbana (Connor & Monroe, 1923). Sin embargo, estos índices han demostrado a través de los años que no se relacionan con la expresión de la infección y los esfuerzos por mantenerlos bajos y tampoco implican una menor transmisión de la enfermedad (Arboleda, Jaramillo-O & Peterson, 2011); asimismo, la técnica se considera poco sensible debido a la detección visual de las larvas y las limitantes de no considerar la cantidad de formas inmaduras presentes en los recipientes (Regis, *et al.,* 2008; Regis, *et al.,* 2009; Souza & Carvalho, 2000; Corrêa, França & Bogutchi, 2005). Tradicionalmente, estos índices se han adoptado como indicadores de gestión administrativa, a escalas temporales (semestrales, anuales) y espaciales (municipales, departamentales) sin contextualización ecológica que vincule de forma transversal los parámetros poblacionales del mosquito.

Estudios geográficos multitemporales de IPP, en conjunto con otros aspectos como la movilidad de los mosquitos, las condiciones inmunológicas de la población humana y los comportamientos diferenciales de las personas que inciden en la disponibilidad de sitios de cría, pueden describir detalladamente la exposición a vectores infectados (Eisen & Eisen, 2008). El resultado de IPP obtenido en este trabajo (0,4) se considera comparativamente bajo, aunque es consistente con los resultados encontrados en otras investigaciones realizadas en zonas endémicas de Colombia en épocas de lluvia y sequía (Alcalá, *et al.,* 2015; Romero-Vivas, *et al.,* 2006; Focks, *et al.,* 2006). Este valor puede constituir un punto de partida para dirigir las acciones de control y describir la transmisión de las arbovirosis, dependiendo de otras variables como la temperatura y la seroprevalencia en regiones endémicas (Focks, 2003).

Uno de los abordajes implementados en los diferentes programas de control de *Aedes aegypti* en diferentes países, corresponde a la intervención de los criaderos más productivos del vector (Focks, *et al.,* 2006), lo que además reduce costos y restricciones operativas (Tun-Lin, *et al.,* 2009). De acuerdo a los resultados presentados en este trabajo, los criaderos más productivos, de acuerdo con la clasificación utilizada, fueron los tanques bajos, lo cual es concordante con diversos estudios que evalúan la productividad de diferentes sitios de cría, en distintas épocas del año: en Camboya (Seng, Setha, Nealon & Socheat, 2009), en Brasil (Maciel-de-Freitas & Lourenco-de-Oliveira, 2011) y en Colombia (Romero-Vivas, Wheeler & Falconar, 2002). En estudios realizados durante 2015 en Cundinamarca (Colombia), Alcalá y colaboradores hallaron que los tanques bajos en el intradomicilio corresponden a los sitios de cría más productivos, tanto en época de sequía como de lluvias, por lo cual recomiendan que los programas de ETV se enfoquen en la intervención de este tipo de recipientes para controlar la población de mosquitos transmisores de arbovirosis (Alcalá, *et al.,* 2015).

5. Conclusiones

En el marco de la vigilancia y control de arbovirosis, los programas de ETV en Colombia realizan actividades rutinarias de inspección de sitios de cría usados por el vector *Aedes aegypti* y el respectivo cálculo de índices larvarios, con el objetivo de establecer la relación entre la abundancia del vector y la magnitud de la transmisión. Estas evaluaciones carecen de una integración rigurosa de los resultados de infestaciones larvarias con otros atributos geográficos, los cuales podrían generar directrices confiables y eficientes para implementar estrategias de control, que logren impactar positivamente en la reducción de la incidencia de las arbovirosis; además, su relación con el aumento en la transmisión es confusa y no predice la aparición de nuevos brotes, lo cual hace necesario que los programas ETV consideren en sus procesos métodos más fehacientes y acordes con la biología del vector y con las escalas espaciales y temporales de los escenarios de transmisión de las arbovirosis; lo anterior con el fin de optimizar la oportunidad, la efectividad y la sostenibilidad en la vigilancia, la prevención y el control de brotes.

El presente estudio piloto implementó un indicador de riesgo de transmisión de dengue, correspondiente al IPP, en el cual se relaciona directamente la amenaza por infestación de mosquitos con la vulnerabilidad, representada por el número de personas; además, se establece una correlación mediante herramientas espaciales, que buscan direccionar de forma rutinaria la toma de decisiones, y hacer más eficaces los programas de control de dengue. Aunque los transmisores de la enfermedad son los mosquitos en estado adulto, se presentan diversos limitantes logísticos para realizar conteos o estimaciones sobre los vectores en este estadio; por lo tanto, el método de cuantificar el IPP constituye una aproximación más real de la relación entre el número de personas, la infestación del vector, e idealmente, la expresión de la enfermedad en una localidad. Aunque en el presente estudio no se compararon los sitios de cría de acuerdo con la época climática, estos resultados sugieren que los tanques bajos serían los primeros criaderos a intervenir; se recomienda realizar posteriores investigaciones similares que evalúen el impacto en la población del mosquito, asociadas a la intervención mecánica de este tipo de criaderos con mallas finas, lo cual impide la entrada de mosquitos hembra para poner huevos en los depósitos de agua.

Esta investigación constituye un aporte metodológico a la caracterización de la distribución espacial del riesgo de transmisión de arbovirosis, representado por el índice de pupas por persona, en función de la amenaza entomológica (distribución de pupas) y la vulnerabilidad humana (distribución de personas) a escala detallada. La principal ventaja del planteamiento presentado corresponde a que permite contrastar la distribución del vector con la distribución de la población humana y los sitios disponibles para la cría del mosquito, puesto que una alta abundancia de vectores o depósitos de agua no necesariamente representa un incremento en la transmisión de la enfermedad. Si además se focalizan las zonas de mayor infestación e incidencia de casos y se definen áreas de riesgo con base en la información obtenida a partir de las herramientas cartográficas, podría describirse detalladamente el comportamiento de las arbovirosis, con lo cual los programas de control incrementarían su costo-efectividad. A su vez, se sugiere que en investigaciones posteriores se integre la perspectiva de las ciencias sociales, con el objetivo de incluir atributos socioeconómicos, habitacionales y variables asociadas a conocimientos, actitudes y prácticas (CAP), lo cual permitiría abordar la construcción espacial del componente de vulnerabilidad por parte de los actores sociales.

Con respecto a los índices aédicos tradicionales, el IPP presenta evidentes ventajas: i) considera una unidad de análisis con mayor detalle (vivienda) que los conglomerados espaciales usuales (barrio, municipio); ii) su escala de medida es cuantitativa, a diferencia de los datos binarios (presencia/ausencia) que proveen poca información; iii) facilita el análisis espacial a diferentes escalas; y iv) permite estimar, no solo el nivel de infestación que brindan las técnicas usuales, el riesgo de transmisión y sus componentes de amenaza entomológica y vulnerabilidad humana. Asimismo, este trabajo se constituye como un estudio piloto que surge desde la ejecución de acciones regulares de la entidad territorial, como parte del fortalecimiento de la investigación operativa de la EGI, que facilitará la toma de decisiones en salud pública, la orientación de las acciones de prevención y control entomológica y epidemiológica de espacios geográficos concretos y la generación de un posible modelo de análisis rutinario en otras regiones.

Financiación

El presente estudio se realizó con recursos de la Nación, como parte de las actividades rutinarias desarrolladas por el programa de Enfermedades Transmitidas por Vectores y el área de Entomología, Laboratorio de Salud Pública de la Gobernación de Cundinamarca.

Agradecimientos

Al equipo de técnicos del programa de Enfermedades Transmitidas por Vectores de la Secretaría de Salud de la Gobernación de Cundinamarca: Yermolay Molina, Edicson Murillo, Guillermo Hernández y Yimmy Díaz.

Referencias

Albrecht, J. (2007). *Key concepts & techniques in GIS*. https://doi.org/10.4135/9780857024442

Alcalá, L., Quintero, J., González-Uribe, C., & Brochero, H. (2015). Productividad de *Aedes aegypti* (L.) (Diptera: Culicidae) en viviendas y espacios públicos en una ciudad endémica para dengue en Colombia. *Biomédica, 35*(2), 258-68. http://dx.doi.org/10.7705/biomedica.v35i2.2567

Arboleda, S.S., Jaramillo-O, N.N., & Peterson, A.T. (2011). Spatial and temporal dynamics of *Aedes aegypti* larval sites in Bello, Colombia. *Journal of Vector Ecology, 37*(1), 37-48. https://doi.org/10.1111/j.1948-7134.2012.00198.x

Barcellos, C. (2003). Unidades y escalas en los análisis espaciales en salud. *Revista Cubana de Salud Pública, 29*(4).

Chang, K. (2006). *Introduction to Geographic Information Systems*. New York: McGraw-Hill.

Chang, A., Parrales, M., Jimenez, J., Sobieszczyk, M., Hammer, S., Copenhaver, D., & Kulkarni, R.P. (2009). Combining Google Earth and GIS mapping technologies in a dengue surveillance system for developing countries. *International Journal of Health Geographics*, *8*,49. https://doi.org/10.1186/1476-072X-8-49

Connor, M.E., & Monroe, W.M. (1923). Stegomyia indices and their value in yellow fever control. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene, 1-3*(1), 9-19. https://doi.org/10.4269/ajtmh.1923.s1-3.9

Corrêa, P.R.L., França, E., & Bogutchi, T.F. (2005). Infestação pelo *Aedes aegypti* e ocorrência da dengue em Belo Horizonte, Minas Gerais. *Revista de Saúde Pública*, *39*, 33-40. https://doi.org/10.1590/S0034-89102005000100005

Coy, M. (2010). Los estudios del riesgo y de la vulnerabilidad desde la geografía humana. Su relevancia para América Latina. *Población y Sociedad*, *17*,9-28.

Eisen, R.J., & Eisen, L. (2008). Spatial modeling of human risk of exposure to vector-borne pathogens based on epidemiological versus arthropod vector data. *Journal of Medical Entomology*, *45*(2), 181-192.

ESRI. (2011). ArcGIS desktop: release 10 [Internet]. Redlands: Environmental Systems Research Institute. Recuperado de https://www.esri.com/es-es/home

Focks, D. (2003). *A review of entomological sampling methods and indicators for dengue vectors*. Geneva: WHO.

Focks, D.A., Brenner, R.J., Hayes, J., & Daniels, E. (2000). Transmission thresholds for dengue in terms of Ades aegypti pupae per person with discussion of their utility in source reduction efforts. The American Journal of Tropical Medicine and Hygene, *62*(1), 11-18. https://doi.org/10.4269/ajtmh.2000.62.11

Focks, D.A., & Alexander, N. (2006). *Multicountry study of* Aedes aegypti *pupal productivity survey methodology: findings and recommendations. World Health Organization and Special Programme for Research and Training in Tropical Diseases*. Geneva, Switzerland: World Health Organization.

Halstead, S. (2008). Dengue Virus–Mosquito Interactions. *Annual Review of Entomology, 53*, 273-91. https://doi.org/10.1146/annurev.ento.53.103106.093326

Instituto Nacional de Salud (INS) (2018). Boletín Epidemiológico Semanal. Semana Epidemiológica 52 de 2018. Recuperado de https://www.ins.gov.co/buscadoreventos/BoletinEpidemiologico/2018%20Bolet%C3%ADn%20epidemiol%C3%B3gico%20semana%2052.pdf

Islam, S., Haqueb, E., Hossainc, S., & Rochond, K. (2019). Role of container type, behavioural, and ecological factors in *Aedes* pupal production in Dhaka, Bangladesh: An application of zero-inflated negative binomial model. *Acta Trópica, 193*,50-59. https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2019.02.019

Kyle, J., & Harris, E. (2008). Global spread and persistence of dengue. *Annual Review of Microbiology, 62*, 71-92. https://doi.org/10.1146/annurev.micro.62.081307.163005

Koch, T. (2009). Social epidemiology as medical geography: back to the future. *GeoJournal, 74*(2), 99-106. https://doi.org/10.1007/s10708-009-9266-9

Maciel-de-Freitas, R., & Lourenco-de-Oliveira, R. (2011). Does targeting key-containers effectively reduce *Aedes aegypti* population density? *Tropical Medicine & International Health, 16*(8), 965-73. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3156.2011.02797.x

Niño, L. (2008). Uso de la función semivariograma y estimación Kriging en el análisis espacial de un indicador entomológico de *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae). *Biomédica, 28*(4), 578-86. https://doi.org/10.7705/biomedica.v28i4.64

Niño, L. (2011). Interpolación espacial de la abundancia larval de Aedes aegypti para localizar focos de infestación. *Revista Panamericana de Salud Pública, 29*(6), 417. https://doi.org/10.1590/S1020-49892011000600006

Niño, L. (2018). La zonificación del riesgo en salud: la fiebre amarilla desde una perspectiva geográfica en La Macarena, departamento del Meta, Colombia. *Salud Colectiva, 14*(1), 19-32. https://doi.org/10.18294/sc.2018.1087

OPS-OMS. (2018). *Integrated Management Strategy for Dengue Prevention and Control in the Region of the Americas.* Washington, D.C.: PAHO.

Parra-Henao, G.J. (2010). Sistemas de información geográfica y sensores remotos. Aplicaciones en enfermedades transmitidas por vectores. CES Medicina, *24*(2), 75-89.

Puga, H. (2008). Conjuntos de Voronoi, triangulación de Delaunay y generación de caminos. *Gaceta ide@s CONCYTEG*, 31, 3-6.

Quintero, J., García-Betancourt, T., Cortés, S., García, D., Alcalá, L., González-Uribe C., Brochero, H., & Carrasquilla, G. (2015). Effectiveness and feasibility of long-lasting insecticide-treated curtains and water container covers for dengue vector control in Colombia: a cluster randomised trial. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygene, 109*(2), 116-25. https://doi.org/10.1093/trstmh/tru208

Regis, L., Monterior, A.M., Varial, M.A., Silveira, J.C. Jr, Furtado, A.F., Acioli, R.V., Santos, G.M., Nakazawa, M., Carvalho, M.S., Ribeiro Jr, P.J. & de Souza, W.V. (2008). Developing new approaches for detecting and preventing *Aedes aegypti* population outbreaks: basis for surveillance, alert and control system. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz. 103*(1), 50-9. https://doi.org/10.1590/S0074-02762008000100008

Regis, L., Souza, W., Furtado, A., Fonseca, C., Silveira, J.Jr., Ribeiro, P.Jr., ... & Monteiro, A.M.V. (2009). An entomological surveillance system based on open spatial information for participative dengue control. *Anais da Academia Brasileira de Ciências, 81*(4), 655-662. https://doi.org/10.1590/S0001-37652009000400004

Rincón-Romero, M.E., & Londoño, J.E. (2009). Mapping malaria risk using environmental and anthropic variables. *Revista Brasileira de Epidemiologia*, *12*(3), 338-354. https://doi.org/10.1590/S1415-790X2009000300005

Romero-Vivas, C.M., Wheeler, C.J., & Falconar, A.K.I. (2002). An inexpensive intervention for the control of larval *Aedes aegypti* assessed by an improved method of surveillance and analysis. *Journal of the American Mosquito Control Association, 18*(1), 40-46.

Romero-Vivas, C.M., Arango-Padilla, P., & Falconar, A.K.I. (2006). Pupal-productivity surveys to identify the key container habitats of *Aedes aegypti* (L.) in Barranquilla, the principal seaport of Colombia. *Annals of Tropical Medicine and Parasitology*, 100:sup.1, 87-95. https://doi.org/10.1179/136485906X105543

Ruiz-López, F., Gonzáles-Mazo, A., Vélez-Mira, A., Gómez, G.F., Zuleta, L., Uribe, S., & Vélez, I.D. (2016). Presencia de *Aedes* (Stegomyia) *aegypti* (Linnaeus, 1762) y su infección natural con el virus del dengue en alturas no registradas para Colombia. *Biomédica, 36*(2), 303-308 https://doi.org/10.7705/biomedica.v36i2.3301

Seng, C.M., Setha, T., Nealon, J., & Socheat, D. (2009). Pupal sampling for *Aedes aegypti* (L.) surveillance and potential stratification of dengue high-risk areas in Cambodia. *Tropical Medicine & International Health, 14*(10), 1233-1240. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3156.2009.02368.x

Souza, R., & Carvalho, M.S. (2000). Análise da distribuição espacial de larvas de Aedes aegypti na Ilha do Governador, Rio de Janeiro, Brasil. *Cadernos de Saúde* Pública, *16*(1), 31-42. https://doi.org/10.1590/S0102-311X2000000100004

Tun-Lin, W., Lenhart, A., Nam, V.S., Rebollar-Téllez, E., Morrison, A.C., Barbazan, P., ... & Petzold, M. (2009). Reducing costs and operational constraints of dengue vector control by targeting productive breeding places: A multi-country non-inferiority cluster randomized trial. *Tropical Medicine & International Health*, *14*(9), 1143-53. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3156.2009.02341.x

Villatoro, M., Henríquez, C., & Sancho, F. (2008). Comparación entre los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE, y P del suelo. *Agronomía Costarricense*, *32*(1), 95-105.

Waller, L., & Gotway, C. (2004). *Applied Spatial Statistics for Public Health Data*. https://doi.org/10.1002/0471662682