

Riesgo de transmisión de SARS-CoV-2: evaluación espacial multicriterio en un municipio de Colombia, 2020

Risk of transmission of SARS-CoV-2: multi-criteria spatial evaluation in a municipality of Colombia, 2020

Larry Niño, Oscar Gutiérrez-Lesmes; Cesar A. Diaz-Celis y Fred Manrique-Abril

Recibido 21 mayo 2020 / Enviado para modificación 24 mayo 2020 / Aceptado 30 mayo 2020

RESUMEN

Objetivo Zonificar el riesgo de transmisión de SARS-CoV-2 en Villavicencio, Colombia, mediante una evaluación espacial multicriterio.

Materiales y Métodos Se implementó un modelo de evaluación multicriterio, a través de un proceso de análisis jerárquico integrado a un sistema de información geográfica. Como criterios fueron incluidos atributos descriptores de las amenazas y vulnerabilidades de transmisión viral identificados mediante un modelo epidemiológico en una misma escala numérica adimensional y proporcional a la probabilidad de contagio. Las alternativas evaluadas corresponden a entidades espaciales representadas por píxeles. Los criterios fueron ponderados de acuerdo con el juicio experto de los evaluadores, con los cuales se realizó el cálculo de una matriz de prioridades relativas normalizada, que permitió la estimación de un vector de pesos, cuyo grado de inconsistencia fue admisible. La magnitud del riesgo se calculó con una sumatoria ponderada de la valoración de los criterios, de acuerdo con un geoproceto de álgebra de mapas.

Resultados La heterogeneidad espacial del riesgo de transmisión de SARS-CoV-2 fue descrita en Villavicencio, lo que permitió identificar las áreas con mayor probabilidad de transmisión localizadas en barrios caracterizados por una alta vulnerabilidad socioeconómica.

Conclusiones La representación cartográfica derivada de la implementación de un modelo multicriterio, integrado a un Sistema de Información Geográfica, en el análisis de riesgo de transmisión de SARS-CoV-2 constituye un aporte metodológico relevante para la toma de decisiones que definan estrategias de mitigación a escala local y que faciliten la localización y optimización de recursos por parte de las autoridades sanitarias.

Palabras Clave: Pandemia; infecciones por coronavirus; transmisión; análisis espacial; mapa de riesgo; geografía médica (*source: DeCS, BIREME*).

ABSTRACT

Objective To zoning the risk of SARS-CoV-2 transmission in Villavicencio, Colombia, through a multi-criteria spatial evaluation.

Materials and Methods A multi-criteria evaluation model was implemented, through a hierarchical analysis process, integrated into a Geographic Information System. As criteria, descriptive attributes of the threats and vulnerabilities of viral transmission identified by means of an epidemiological model were included, on the same dimensionless numerical scale and proportional to the probability of contagion; the alternatives evaluated correspond to spatial entities represented by pixels. The criteria were weighted according to the expert judgment of the evaluators, with whom the calculation of a normalized matrix of relative priorities was performed, which allowed the estimation of a vector of weights, the degree of inconsistency of which was admissible. The magnitude of the risk was calculated with a weighted summation of the evaluation of the criteria, according to a map algebra geoprocessing.

LN: Biólogo. Esp. Epidemiología. M. Sc. Geografía. Ph.D.(c) Ciencias-Biología. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

lnino@unal.edu.co

OG: RN. Esp. Epidemiología. M. Sc. Gestión Ambiental. Ph.D.(c) Epidemiología. Escuela de Salud Pública, Universidad de los Llanos. Villavicencio, Colombia.

oagutierrez@unillanos.edu.co

CD: Ing. Sistemas. M. Sc. Sistemas de Información Geográfica. Ph.D.(c) Software, Sistemas y Computación. Escuela de Ingeniería, Universidad de los Llanos. Villavicencio, Colombia.

cesar.diaz@unillanos.edu.co

FM: AB. M. Sc. Salud Pública. Ph. D. Salud Pública. Ph.D. Medicina Clínica. Profesor Titular, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, Colombia.

fgmanrique@unal.edu.co

Results The spatial heterogeneity of the risk of SARS-CoV-2 transmission was described in Villavicencio, allowing the identification of the areas with the highest probability of transmission, located in neighborhoods characterized by high socioeconomic vulnerability.

Conclusions The cartographic representation derived from the implementation of a multicriteria model, integrated to a Geographical Information System, in the SARS-CoV-2 transmission risk analysis, constitutes a relevant methodological contribution for decision-making defining strategies of mitigation at the local level, facilitating the location and optimization of resources by the health authorities.

Key Words: Pandemics; coronavirus infections; transmission; spatial analysis; risk map; geography; medical (*source: MeSH, NLM*).

Las enfermedades respiratorias transmisibles como la COVID-19, ocasionada por el coronavirus SARS-CoV-2 (1), están determinadas por la tasa de contacto y por el riesgo de infección, definido como la probabilidad de que el COVID-19 sea transferido a un individuo sin inmunidad (susceptible). La tasa de contacto y el riesgo de infección establecen la tasa de transmisión (2,3). La tasa de transmisión es modulada por factores y dinámicas sociales que determinan las relaciones entre sujetos en territorio (4), definiéndose un patrón espacial de contagio (5,6). Esta investigación evaluó el riesgo de transmisión para la ciudad de Villavicencio para el 22 de abril de 2020 de COVID-19.

La dinámica de la interacción social fue intervenida para reducir el contacto social con el fin de disminuir la tasa de contacto y la transmisión (7,9) con medidas como el toque de queda nocturno y la restricción de la movilidad para abastecerse. La nueva dinámica en la ciudad ocurría ahora por dos vías: la primera por personas autorizadas para circular en el territorio, de acuerdo con el decreto que definía un grupo poblacional sin restricción de movilidad, y la segunda vía, establecida por aspectos de la cultura ciudadana dentro del territorio, incluyendo el incumplimiento de la restricción de la movilidad (a la fecha se habían impartido 2 191 comparendos en el área de estudio). Esta nueva dinámica social pone en evidencia una multicausalidad que determina tasas de transmisión específicas de acuerdo con zonas donde confluyen características distintivas, lo cual hace necesario el uso de tecnologías geoespaciales como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y metodologías como la Evaluación Multicriterio (EMC) que permiten la integración y ponderación las variables incluidas en la estimación del riesgo de transmisión.

Los SIG computarizados permiten analizar, visualizar y detectar patrones de eventos de interés en salud que se han incrementado exponencialmente (10); en la actualidad, constituyen una herramienta fundamental en el estudio de la distribución espacial de las enfermedades infecciosas (5). Durante la pandemia actual, los SIG y el análisis espacial han permitido cartografiar a diferentes escalas los eventos de infección, las reacciones sociales en

redes frente a la diseminación de la enfermedad, la predicción del riesgo con base en datos de viajeros y la propagación del contagio de acuerdo con trayectorias comunes de infectados y contactos; esta información es indispensable para entender las nuevas fuentes de contagio, la dinámica epidemiológica y la puesta en marcha de estrategias para el control de la COVID-19 (11). Como respuesta a la epidemia, numerosas instituciones han desarrollado sistemas de información que incluyen visores geográficos basados en programas comerciales; no obstante, estos recursos se limitan a funciones básicas de visualización que no permiten la modificación ni integración de parámetros a escalas apropiadas (6).

La EMC es implementada en problemáticas cuyos criterios y alternativas son finitos y explícitos. Corresponde a un conjunto de técnicas orientadas al apoyo en los procesos de evaluación, la cual permite ponderar diferentes criterios de acuerdo con las preferencias del investigador y la construcción de escenarios que disminuyan la incertidumbre en la evaluación de las alternativas consideradas (12). El estándar de la EMC corresponde a una matriz de evaluación donde el problema se define con criterios dispuestos en filas y el desempeño de las alternativas en las columnas; los pesos reflejan la importancia relativa entre los criterios considerados en la evaluación. Estos se establecen de forma subjetiva y representan la opinión experta del investigador (13). El proceso de análisis jerárquico (AHP, por su sigla en inglés) corresponde a un método EMC que permite la incorporación de aspectos de diversa naturaleza a un modelo, tomando en consideración las influencias entre las alternativas respecto a un conjunto de atributos. La metodología AHP considera tres etapas: i) modelización o estructuración de variables relevantes en el proceso de evaluación; ii) valoración o incorporación de las preferencias de los evaluadores, de acuerdo con juicios establecidos en una matriz de comparaciones pareadas; iii) priorización o cálculo del vector de pesos de los criterios considerados en la evaluación (14). El análisis SIG basado en EMC corresponde a un proceso que transforma y combina datos geográficos y juicios de valor con el objetivo de obtener información relevante para la toma de decisiones (15). La articulación SIG-EMC es

implementada con frecuencia para obtener mapas de riesgo epidemiológico, los cuales se obtienen integrando capas cartográficas de los criterios una vez se obtiene el vector de pesos (16-18). En la evaluación y zonificación del riesgo de transmisión de SARS-CoV-2 se incluyeron como criterios variables descriptoras de amenazas por probable circulación viral y vulnerabilidades asociadas a la densidad poblacional y tránsito de personas; como alternativas, se consideraron las entidades espaciales por evaluar, en niveles de riesgo acordes con el grado de severidad.

La emergencia sanitaria global por COVID-19, caracterizada por su alta velocidad de transmisión, prolongado periodo de incubación, alta proporción de asintomáticos y potencial capacidad de colapsar los sistemas de salud (1,4,6,19), provocó la necesidad de desarrollar herramientas que incluyan las nuevas dinámicas sociales y que apoyen la toma de decisiones en la priorización de áreas a escalas adecuadas, para realizar intervenciones que conduzcan a la interrupción de la cadena de transmisión viral por parte de las autoridades sanitarias y gubernamentales a nivel local. El objetivo del presente trabajo fue realizar una evaluación espacial del riesgo de transmisión de SARS-CoV-2 implementando un modelo multicriterio AHP, en el cual se integraron amenazas y vulnerabilidades

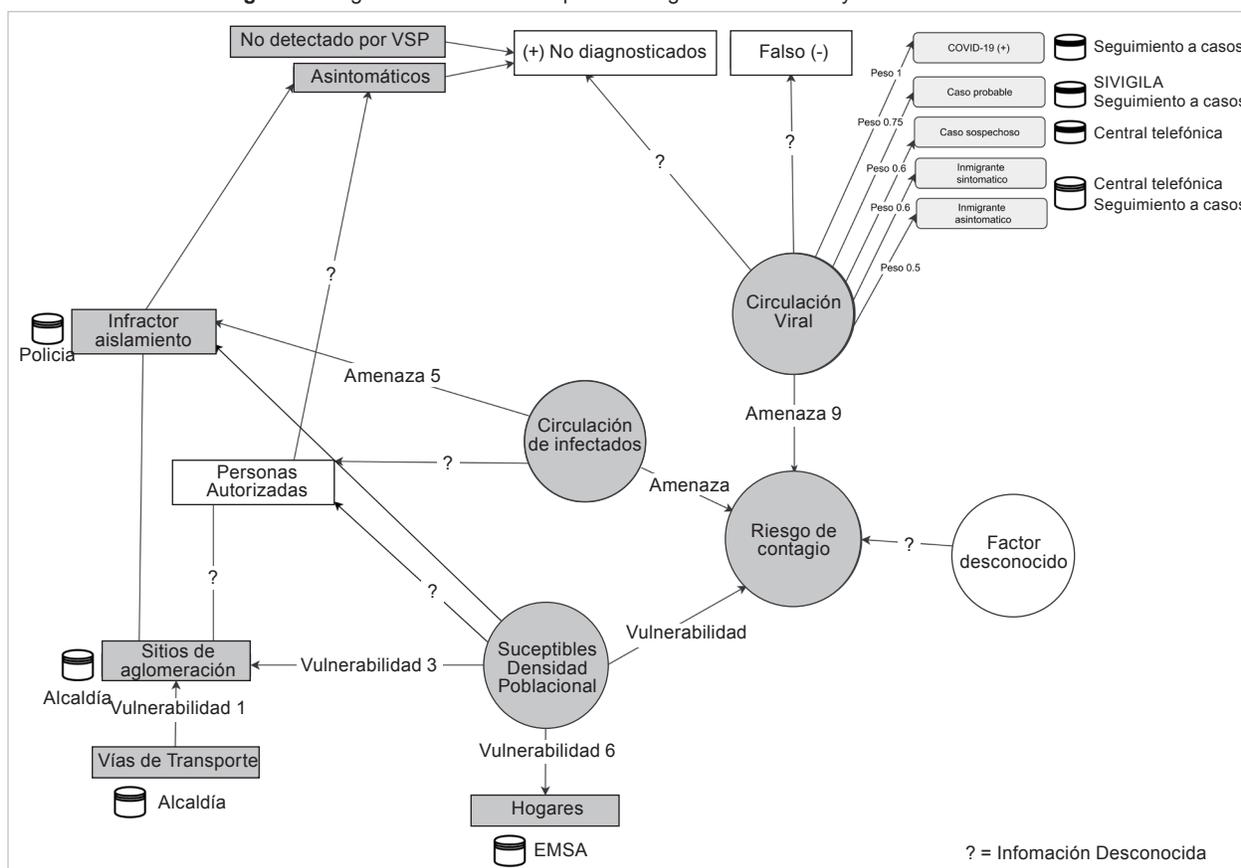
de transmisión viral como atributos geográficos, la aplicabilidad de los SIG y el análisis espacial como métodos eficaces para la evaluación y zonificación del riesgo de infección para facilitar la toma de decisiones en Salud Pública.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un estudio de tipo transversal y observacional descriptivo en la zona urbana del municipio de Villavicencio, departamento del Meta. El área de estudio se encuentra localizada entre las coordenadas 4,20° y 4,04° de latitud Norte y 73,72° y 73,50° de longitud Oeste. La proyección de habitantes en Villavicencio para 2020 corresponde a 502 047 personas en zona urbana (20), entre los cuales se han detectado 149 casos positivos para COVID-19 (14 importados, 135 relacionados), 677 casos probables (373 contactos estrechos de los casos positivos y 304 casos probables notificados al sistema de vigilancia epidemiológica de la red hospitalaria).

Se determinó un modelo teórico de riesgo de transmisión (Figura 1), desde factores reconocidos como factores en la transmisión del COVID-19 (1,4,7,9). Se definieron tres variables primarias observables y una cuarta como desconocida en el proceso causal: i) vulnerabilidad a

Figura 1. Diagrama acíclico teórico para el riesgo de transmisión y fuente de los datos



transmisión SARS-CoV-2 por densidad poblacional, representada por población susceptible a infección y que corresponde a todas las personas al inicio de la pandemia; ii) amenaza de transmisión SARS-CoV-2 por circulación de personas, definida por la población que circula incumpliendo el aislamiento social, personal autorizado para movilizarse y aglomeraciones en sitios públicos; iii) amenaza de transmisión SARS-CoV-2 por población con infección viral probable o confirmada, representada por casos con diagnóstico positivo, casos probables, migrantes, falsos positivos y asintomáticos. En la Figura 1, los rectángulos vacíos constituyen rutas que hacen parte de la línea causal, donde la información es desconocida por los investigadores y las autoridades municipales. De lo anteriormente expuesto, se establece que el modelo causal propuesto busca aproximarse a la realidad, aunque los factores desconocidos y el azar limiten la explicación del riesgo de contagio, lo cual es propio de todos los modelos poblacionales causales en epidemiología.

Dado que los datos estaban referenciados a las direcciones domiciliarias de la población, se requirió de un proceso de geocodificación para su ingreso a la evaluación espacial multicriterio, lo cual permite visualizar las localizaciones en un marco espacial estandarizado y reconocer la distribución geográfica de la información (21). La ubicación de los infractores al aislamiento se realizó con los datos de localización suministrados por la Policía Nacional (PONAL).

Se seleccionaron cinco variables como criterios de evaluación espacial del riesgo de transmisión de SARS-CoV-2, de acuerdo con la disponibilidad, vigencia, representatividad y disposición a espacializar. Los criterios y su importancia relativa respondieron a amenazas y vulnerabilidades representadas por localizaciones de transmisión confirmada o sospechosa, el incumplimiento de medidas de aislamiento social, densidad poblacional y tránsito de personas en espacios geográficos comunes. La amenaza por circulación viral (ACV) se estimó de acuerdo con valoraciones relativas de probabilidad en un rango de 0 a 1, asociadas a localizaciones residenciales geocodificadas de personas con categorías de: caso confirmado por laboratorio (1), caso probable (0,75), caso sospechoso (0,6), viajero internacional con síntomas (0,6) y viajero internacional sin síntomas (0,5). Con estos datos vectoriales tipo punto se realizó una interpolación espacial de ponderación de distancias inversas (IDW, por su sigla en inglés), la cual implementa las localizaciones con valores conocidos para estimar una variable que se desconoce, lo que permite producir información continua a partir de datos puntuales y facilitar su integración con las demás variables geográficas incluidas en el estudio (22,23). El IDW es un método que incluye en la estimación una muestra

de vecinos cercanos, no modifica los valores incluidos en los puntos de control y, al ser de carácter determinístico, no proporciona los errores de los cálculos (24). La precisión de la estimación IDW fue realizada con una validación cruzada, en la cual se omite uno de los puntos de control a la vez y se calculan alternadamente; los valores observados y estimados permiten calcular la raíz del error cuadrático medio (RMS, por sus siglas en inglés), que establece la precisión de la interpolación con respecto a su cercanía a cero (25,26).

La vulnerabilidad por susceptibles (vsu), establecida de acuerdo con la población susceptible de infectarse y que al inicio de la pandemia corresponde a la totalidad de personas, se representó de forma continua, en la cual se describe la distribución de la densidad poblacional humana. Dicha estimación incluyó la proyección de población del DANE y el conteo en un rango espacial de 30 m de 165 371 medidores eléctricos residenciales en el área de estudio, geocodificados a partir de datos de la Electrificadora del Meta (EMSA). La amenaza por incumplimiento de cuarentena (AIC), correspondiente a los comparendos sancionados por la PONAL a personas que no acataron las medidas de aislamiento social, correspondió a la estimación de densidades de localizaciones o puntos de imposición de las sanciones, de acuerdo a una distancia de 300 m, en una geometría de círculo y con resolución espacial de 30 m. La vulnerabilidad por aglomeraciones de población (VAP) está representada por la localización de los puntos del municipio donde se presentan concentraciones de personas en búsqueda de bienes o servicios. Alrededor de estos puntos georreferenciados se trazaron áreas de influencia (*buffers*) a 200, 400 y 600 m, a las cuales se les asignó valoraciones de 0 a 1 de acuerdo con la magnitud de vulnerabilidad con respecto a su cercanía a la aglomeración. La vulnerabilidad por rutas de transporte (VRT), establecida por el tránsito común de personas sobre las principales vías del municipio, corresponde al trazado de áreas de influencia sobre el recorrido representado por líneas, a distancias de 25, 75 y 125 m, a las cuales les fue asignada una valoración de 0 a 1, de acuerdo con el grado de vulnerabilidad, proporcional a la distancia al trazado de las rutas. Con las capas cartográficas generadas se estructuró un SIG en formato raster a 30 m de resolución espacial y en el sistema de coordenadas UTM 18N, los valores de la vulnerabilidad de susceptibles y la amenaza por incumplimiento de cuarentena fueron transformados a una escala de 0 a 1, con la implementación de una función lineal, con el objetivo de que la totalidad de las variables incluidas en el modelo estuvieran expresadas en la misma escala numérica adimensional y de acuerdo con el grado de exposición a la transmisión viral.

Los pesos de los criterios se estimaron con el método Saaty (27,28), el cual es un procedimiento que cuantifica las preferencias del evaluador, con respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios incluidos en el AHP. El método tiene como objetivo construir un vector de prioridades o pesos que permita la evaluación jerárquica y numérica de los criterios en consideración. Inicialmente se configuró una matriz cuadrada con las comparaciones pareadas, la cual describe una escala que define la correspondencia entre la valoración cualitativa del evaluador y una asignación numérica (27,28). Posteriormente se calculó la matriz normalizada siguiendo los lineamientos metodológicos y las consideraciones teóricas presentadas por Niño (29), con la cual fue estimado el vector de pesos de los criterios considerados en la evaluación del riesgo de transmisión de SARS-CoV-2. Una vez se obtuvo el vector de pesos, se realizó la ponderación de cada criterio de acuerdo con el peso asignado, lo cual corresponde al producto de estos valores en cada una de las alternativas o píxeles de las capas cartográficas raster y que representan las variables espacializadas incluidas en la evaluación. A continuación, se realizó una sumatoria lineal ponderada, en la cual se obtuvo un único valor de riesgo con la suma de los valores de los criterios ajustados, de acuerdo con el peso asignado para cada variable. La Figura 2 muestra la sinopsis del modelo presentado, el cual corresponde a un proceso analítico jerárquico que estructura el problema de evaluación en niveles, de acuerdo con la comprensión y perspectiva de los evaluadores sobre la situación (30); en orden descendente y para el modelo realizado, las alternativas o entidades espaciales representadas por píxeles fueron ordenadas en función de un conjunto de criterios ponderados por los evaluadores, de acuerdo con el objeti-

vo de zonificar el riesgo de transmisión viral en el municipio de Villavicencio.

RESULTADOS

En la interpolación IDW de la amenaza por circulación viral se implementó el uno como exponente de ponderación espacial, puesto que se consideró que la tasa de cambio de la variable es constante entre los puntos de control y se mantiene a cortas distancias bajo medidas de aislamiento social. Como parámetros complementarios de la interpolación, se incluyeron 10 localizaciones próximas con valores conocidos en sectores de 100 m a la redonda. De acuerdo con la validación cruzada, se obtuvo un RMS de 0,096, lo cual se consideró como una precisión aceptable de la estimación espacial.

La Tabla 1 muestra la matriz normalizada, con la cual se calculó el vector de pesos de los criterios considerados en la evaluación del riesgo de transmisión viral. El grado de inconsistencia de los juicios del decisor fue estimado con el índice de consistencia, donde el promedio del autovalor λ (5,266) indicó valoraciones congruentes en la matriz de prioridades normalizada, puesto que sus valores fueron próximos y nunca menores al número de criterios (cinco); el índice de consistencia calculado fue de 0,066, el cual fue posteriormente computado en el cálculo de la razón de consistencia con un índice de consistencia aleatorio correspondiente a 1,109, cifra antes reportada por Alonso & Lamata (31) quienes implementaron 500 000 matrices aleatorias para cinco criterios. La razón de consistencia resultante fue 0,060, valor inferior a 0,1, por lo cual se considera que el vector de pesos presenta una inconsistencia admisible.

Tabla 1. Matriz de prioridades normalizada

	VRT	VAP	AIC	VUS	ACV	Peso	Ponderación	λ
VRT	1,000	0,333	0,200	0,167	0,111	0,036	0,186	5,130
VAP	3,000	1,000	0,333	0,200	0,167	0,072	0,361	5,016
AIC	5,000	3,000	1,000	0,333	0,200	0,138	0,720	5,217
VUS	6,000	5,000	3,000	1,000	0,333	0,258	1,414	5,492
ACV	9,000	6,000	5,000	3,000	1,000	0,496	2,717	5,475

Según el vector de pesos, el riesgo de transmisión de SARS-CoV-2 se calculó con un geoproceto de álgebra de mapas sobre las capas cartográficas tipo raster de los criterios considerados, de acuerdo con la expresión:

$$\text{Riesgo} = (\text{ACV} \cdot 0,496) + (\text{VUS} \cdot 0,258) + (\text{AIC} \cdot 0,138) + (\text{VAP} \cdot 0,072) + (\text{VRT} \cdot 0,036).$$

Una vez se integró el vector de pesos a la información geográfica de los criterios, se obtuvo una salida cartográfica de la distribución espacial del riesgo de transmisión viral (Figura 3), la cual permite distinguir las áreas con

mayor probabilidad de contagios. Los barrios donde se observa mayor riesgo, en la zona central de Villavicencio, corresponden a Barzal, Porvenir, San Gregorio, Veinte de Julio, Santa Inés y Villa Julia; hacia el sur, las áreas con mayor riesgo abarcan los barrios Serranía y Comuneros; al oeste del municipio se presenta alta probabilidad de transmisión viral en los barrios Danubio, San Carlos, Morichal y Ciudad Salitre; Sobre el río Ocoa, en el costado suroeste, los barrios con alto riesgo corresponden a Kirpas y Gaviotas, mientras que al extremo sureste, en Ciu-

Figura 2. Sinopsis metodológica del modelo espacial de evaluación multicriterio

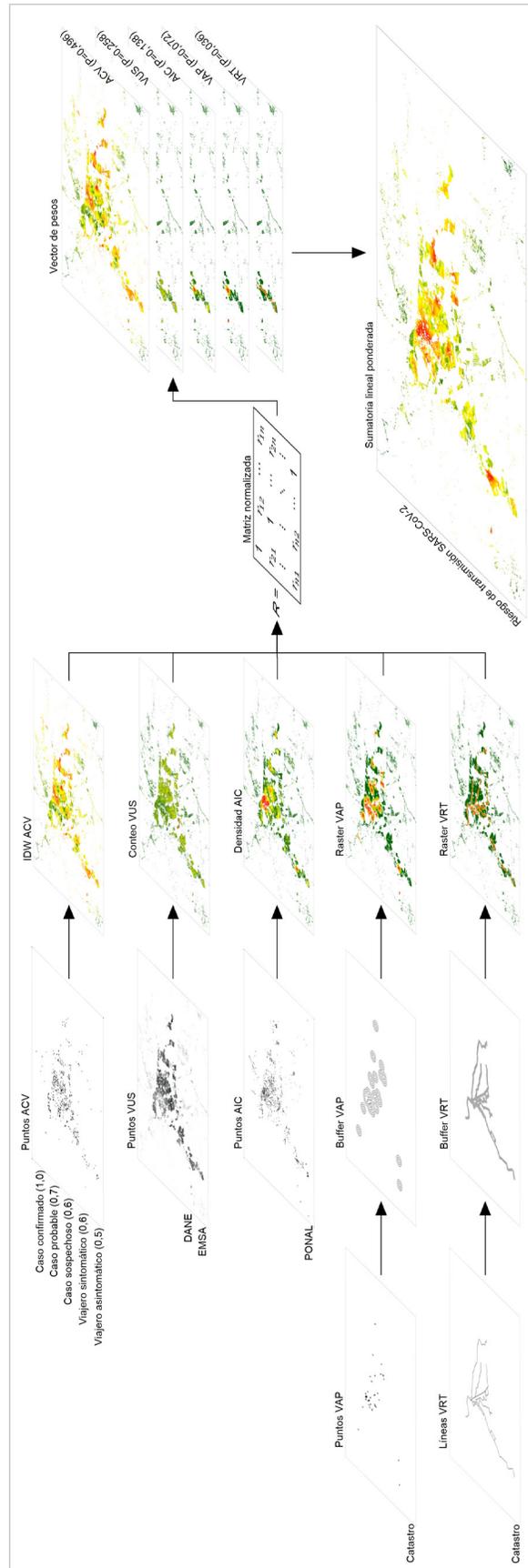
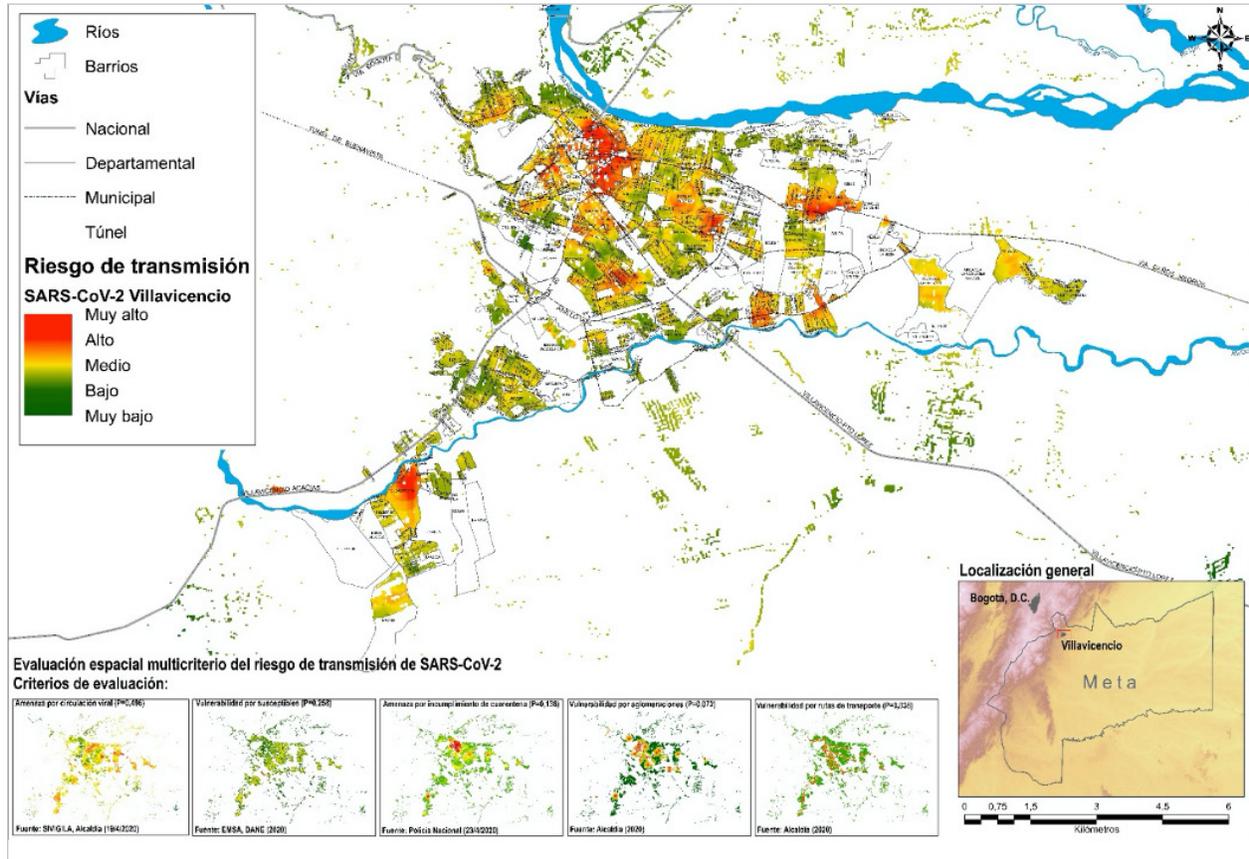


Figura 3. Distribución espacial del riesgo de transmisión de SARS-CoV-2 en Villavicencio



dad Porfía, se observa una alta probabilidad de contagio. Particularmente en estos barrios y sectores aledaños, son frecuentes los asentamientos subnormales de población con alta vulnerabilidad socioeconómica.

El análisis espacial y la cartografía temática en salud para el manejo de brotes de enfermedades, particularmente durante la actual pandemia, proporcionan diversas oportunidades prácticas para las autoridades sanitarias municipales, al detectar y monitorear probables rutas de contagio y predecir las áreas donde se corre mayor riesgo de transmisión viral (32).

La actual pandemia se caracteriza por un largo periodo de incubación, alta infectividad y la falta de diagnóstico en asintomáticos (33), lo cual requiere de tecnologías geoespaciales que permitan el análisis de datos de forma oportuna y la comunicación de información fehaciente de la dinámica epidemiológica (6). 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 (34). De igual manera, los mapas generados

facilitan la disseminación de información clara y concisa a la población, que, bajo las actuales circunstancias, está alerta ante la información que les permita tomar medidas de protección (3).

En las enfermedades contagiosas, la expansión de un brote inicia desde el caso índice, y se extiende en el territorio mediante una cadena de individuos ordenados de acuerdo con el momento de contagio, el cual requiere de contacto estrecho y la transmisión viral, regulada por la densidad e interacción de la población. Los datos de localización de los casos son fundamentales en la toma de decisiones para el control de las enfermedades y, en el contexto de la actual pandemia, existe evidencia de que los países que iniciaron la detección y el seguimiento espacial de personas infectadas de forma temprana han sido más exitosos que aquellos que no realizaron estos procesos (32).

Todas las áreas de la ciudad tienen asociado un nivel de riesgo de contagio, puesto que toda la población (representada en el modelo por la densidad poblacional) es susceptible de infectarse y enfermar por el SARS-CoV2 (9,33) y por la circulación del virus en el territorio, evidenciado por casos positivos para COVID-19.

La evaluación espacial del riesgo de transmisión de SARS-CoV-2 presentada, en un espacio geográfico con

creto y a escala municipal, ha sido de gran utilidad social, epidemiológica y de salud pública para el abordaje de la intervención de la COVID-19. Logra comunicar de forma eficiente información espacial compleja, hecho que les facilita su entendimiento a los tomadores de decisiones para que optimicen los recursos al focalizar las intervenciones en el territorio (5,6,32) por parte de la Alcaldía de la ciudad; además, en el contexto de la población local, esta cartografía temática adquiere relevancia al hacer visible el riesgo, ubicándolo como un evento próximo y real (11), derivado en parte de su comportamiento social, que requiere un cambio en función del autocuidado.

En respuesta a la identificación de zonas con mayor riesgo de contagio, la Alcaldía, la PONAL y los organismos de Socorro de Villavicencio, priorizaron medidas de salud pública en la comuna tres, una de las zonas con mayor riesgo de transmisión, con el objetivo de reducir aún más la tasa de contacto y el riesgo de infección mediante acciones como la búsqueda activa de casos, intervención del riesgo psicosocial, instalación de puntos de información, mejoramiento de las condiciones sanitarias y el aumento de fuerza pública para el control del aislamiento.

Esta investigación es considerada pionera en la zonificación del riesgo de transmisión de SARS-CoV-2 a escala local en Colombia, donde es común la representación geográfica de valores numéricos asociados a entidades discretas (polígonos) de tipo territorial o administrativo, o “puntos de calor”, que referencian densidades de localizaciones de eventos relacionados con COVID-19 a distancias sin reporte de sustento epidemiológico; constituye un aporte metodológico a la caracterización de la distribución espacial de la probabilidad de contagio viral a escala detallada, representado por la integración de amenazas y vulnerabilidades, localizadas en el espacio geográfico de un municipio.

Esta investigación presentó limitaciones como la falta de datos relacionados con los falsos negativos, los casos asintomáticos no detectados y la circulación de personas con permiso por regulación nacional ♣

Agradecimientos: A la Alcaldía municipal de Villavicencio, a la Policía Metropolitana de Villavicencio, por el acceso a la información requerida para el desarrollo de la presente investigación.

Conflictos de intereses: Ninguno.

REFERENCIAS

1. Yang X, Yu Y, Xu J, Shu H, Liu H, Wu Y, et al. Clinical course and outcomes of critically ill patients with SARS-CoV-2 pneumonia in Wuhan, China: a single-centered, retrospective, observational study. *The Lancet Respiratory Medicine*. 2020. DOI:10.1016/S2213-2600(20)30079-5.
2. Ridenhour B, Kowalik JM, Shay DK. El número reproductivo básico (RaD): consideraciones para su aplicación en la salud pública. *American Journal of Public Health* [Internet]. 2018; 108(S6):S455-S465. DOI:10.2105/AJPH.2013.301704s.
3. Cruz MP, Santos E, Cervantes MV, Juárez ML. COVID-19, a worldwide public health emergency. *Revista Clínica Española (English Edition)*. 2020. DOI:10.1016/j.rce.2020.03.001.
4. Sun Z, Thilakavathy K, Kumar SS, He G, Liu SV. Potential factors influencing repeated SARS outbreaks in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020; 17(5):1633. DOI:10.3390/ijerph17051633.
5. Mollalo A, Vahedi B, Rivera K. GIS-based spatial modeling of COVID-19 incidence rate in the continental United States. *Science of the Total Environment*. 2020;1-8. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.138884.
6. Zhou C, Su F, Pei T, Zhang A, Du Y, Luo B, et al. COVID-19: challenges to GIS with big data. *Geography and Sustainability*. 2020. DOI:10.1016/j.geosus.2020.03.005.
7. Tang B, Xia F, Tang S, Bragazzi NL, Li Q, Sun X, et al. The effectiveness of quarantine and isolation determine the trend of the COVID-19 epidemics in the final phase of the current outbreak in China. *International Journal of Infectious Diseases*. 2020. DOI:10.1016/j.ijid.2020.03.018.
8. Alvarez R, Harris P. COVID-19 en América Latina: Retos y oportunidades. *Rev Chil Pediatr*. 2020; 91(2):179-82. DOI:10.32641/rchped.vi91i2.2157.
9. Manrique-Abril F, Agudelo-Calderon C, González-Chordá VM, Gutiérrez-Lesmes O, Téllez-Piñerez C, Herrera-Amaya G. Modelo SIR de la pandemia de Covid-19 en Colombia. *Rev. Salud Pública (Bogotá)*. 2020; 22(2):1-9. DOI:10.15446/rsap.v22n2.85977.
10. Lyseen A, Nøhr C, Sørensen E, Gudes O, Geraghty E, Shaw N, et al. A review and framework for categorizing current research and development in health related geographical information systems (GIS) studies. *Yearbook of medical informatics*. 2014; 23(1):110-24. DOI:10.15265/IY-2014-0008.
11. Boulou MN, Geraghty EM. Geographical tracking and mapping of coronavirus disease COVID-19/severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) epidemic and associated events around the world: how 21st century GIS technologies are supporting the global fight against outbreaks and epidemics. 2020. DOI:10.1186/s12942-020-00202-8.
12. Gómez M, Cano B, Ignaciocoaut J. Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. España; 2006.
13. Fülöp J, editor *Introduction to decision making methods*. Washington: BDEI-3 workshop; 2005.
14. Jiménez J. El proceso analítico jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones. *Rect@ Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*. 2002; 1:28-77.
15. Malczewski J. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International journal of geographical information science*. 2006; 20(7):703-26. DOI:10.1080/13658810600661508.
16. Stevens K, Gilbert M, Pfeiffer D. Modeling habitat suitability for occurrence of highly pathogenic avian influenza virus H5N1 in domestic poultry in Asia: a spatial multicriteria decision analysis approach. *Spatial and Spatio-temporal Epidemiology*. 2013; 4:1-14. DOI:10.1016/j.sste.2012.11.002.
17. Pfeiffer D, Robinson TP, Stevenson M, Stevens KB, Rogers DJ, Clements AC. *Spatial analysis in epidemiology*. Oxford: Oxford University Press; 2008.
18. Ruget A-S, Tran A, Waret-Szkuta A, Moutoufi YO, Charafouddine O, Cardinale E, et al. Spatial multicriteria evaluation for mapping the risk of occurrence of Peste des Petits Ruminants in Eastern Africa and the Union of the Comoros. *Frontiers in Veterinary Science*. 2019; 6:455. DOI:10.3389/fvets.2019.00455.
19. Sedes P, Sanz M, Saera M, Rodríguez-Rey L, Ortega Á, González M, et al. Plan de contingencia para los servicios de medicina intensiva frente a la pandemia COVID-19. *Enfermería Intensiva*. 2020; 1-8. DOI:10.1016/j.enfi.2020.03.001.
20. Departamento Nacional de Estadística. Serie de proyecciones de población con desagregación nacional, departamental, municipal y cabe-

- cera 2020. Available from: <https://bit.ly/32jpfVx>.
21. Goldberg D, Wilson J, Knoblock C. From text to geographic coordinates: the current state of geocoding. *URISA Journal*. 2007; 19(1):33. Available from: <https://bit.ly/3bUhlQc>.
 22. Niño L. Interpolación espacial de la abundancia larval de *Aedes aegypti* para localizar focos de infestación. *Rev Panam Salud Publica*. 2011; 29:416-22. Available from: <https://bit.ly/3hkNVAY>.
 23. Waller LA, Gotway CA. *Applied spatial statistics for public health data*: John Wiley & Sons; 2004.
 24. Chang K. *Introduction to geographic information systems*: McGraw-Hill Higher Education Boston; 2006.
 25. Albrecht J. *Key concepts and techniques in GIS*. London: Sage; 2007.
 26. Villatoro M, Henríquez Henríquez C, Sancho F. Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense*. 2007; 32:95-105. Available from: <https://bit.ly/3hoMKR3>.
 27. Saaty TL. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *Interfaces*. 1994; 24(6):19-43. DOI:10.1016/0377-2217(90)90057-I.
 28. Saaty TL, Shang JS. An innovative orders-of-magnitude approach to AHP-based multi-criteria decision making: Prioritizing divergent intangible humane acts. *European Journal of Operational Research*. 2011; 214(3):703-15. DOI:10.1016/j.ejor.2011.05.019.
 29. Niño L. Zonificación minera basada en la integración de la evaluación ambiental estratégica y modelado con múltiples criterios en la región de La Macarena, departamento del Meta, Orinoquía Colombiana. *Revista BIOLLANIA*. 2018; 1(15):634-66.
 30. Munda G. Teoría de Evaluación Multicriterio: una breve perspectiva general. In: *Evaluación ambiental integrada: evaluación multicriterio*. Barcelona: Universidad Autónoma de Barcelona; 1998. p.1-30.
 31. Alonso J, Lamata M. Consistency in the analytic hierarchy process: a new approach. *International journal of uncertainty, fuzziness and knowledge-based systems*. 2006; 14(04):445-59. DOI:10.1142/S0218488506004114.
 32. Rezaei M, Nouri A, Park G, kim D. Application of Geographic Information System in Monitoring and Detecting the COVID-19 Outbreak. *Iranian Journal of Public Health*. 2020; 49:114-6. DOI:10.18502/ijph.v49iS1.3679.
 33. Zhu N, Zhang D, Wang W, Li X, Yang B, Song J, et al. A novel coronavirus from patients with pneumonia in China, 2019. *New England Journal of Medicine*. 2020; 382:727-733. DOI:10.1056/NEJMoa2001017.
 34. Koch T. Social epidemiology as medical geography: Back to the future. *GeoJournal*. 2009; 74(2):99-106. Available from: <https://bit.ly/3ilKJXc>.