

PROFS. FABIO SEPÚLVEDA, CARMEN SÁNCHEZ, MARIANELA LUZARDO. VARIACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS HOMICIDIOS EN ANTIOQUIA (2012-2013) A PARTIR DE UN MODELO DE REGRESIÓN GEOGRÁFICAMENTE PONDERADO. 243-268. REVISTA CENIPEC. 33. 2018-2021. ESPECIAL. ISSN: 0798-9202

PROF. FABIO SEPÚLVEDA
PROFA. CARMEN SÁNCHEZ
PROFA. MARIANELA LUZARDO

**VARIACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS HOMICIDIOS EN ANTIOQUIA
(2012-2013) A PARTIR DE UN MODELO DE REGRESIÓN
GEOGRÁFICAMENTE PONDERADO**

Recepción: 22/09/2022. **Aceptación:** 04/11/2022.

Prof. Fabio Sepúlveda
fhsepulveda@udemedellin.edu.co
Prof. Carmen Sánchez
ccsanchez@udemedellin.edu.co
Prof. Marianela Luzardo
mluzardo@udemedellin.edu.co
UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN
MEDELLÍN - COLOMBIA

Resumen

Las regiones de Antioquia presentan características culturales heterogéneas que inciden en la naturaleza de sus problemáticas sociales; una de estas es el homicidio. Para conocer la distribución espacial y los factores que explican este delito en la región, se realizó un análisis exploratorio de datos y se implementó un modelo de regresión geográficamente ponderada, obteniendo entre otros, que existe variación espacial significativa entre la edad, la escolaridad y densidad poblacional.

Palabras clave: homicidio, violencia, autocorrelación geográfica.

Spatial Variation of Homicides in Antioquia (2012-2013) based on a Geographically Weighted Regression Model

Abstract

The different regions of Antioquia are characterized by culturally heterogeneous characteristics which affect the nature of social problems, including homicide. A geographically weighted regression model was used to explore the spatial distribution of homicide and the factors that explain this crime. Key results showed significant spatial variation in relation to age, level of education and population density.

Key words: homicide, violence, geographic autocorrelation.

Variation géographique des meurtres dans le département d'Antioquia (2012-2013) à partir d'un Modèle de Régression Géographiquement Pondéré

Résumé

Les sous-régions d'Antioquia présentent des caractéristiques culturelles hétérogènes qui influent sur la nature de leurs problématiques sociales, voire le meurtre. Afin de connaître la distribution spatiale et les facteurs qui expliquent ce délit dans la région, il a été procédé à la mise en œuvre d'une analyse exploratoire de données et d'un modèle de régression géographiquement pondéré, lesquels ont démontré, entre autres résultats, qu'il existe une variation spatiale considérable entre l'âge, la scolarité et la densité de la population.

Mots clés: meurtre, violence, autocorrélation géographique.

Variação geográfica dos homicídios em Antioquia (2012-2013) a partir de um modelo de regressão geograficamente ponderado

Resumo

As regiões de Antioquia apresentam características culturais heterogêneas que incidem na natureza de suas problemáticas sociais; uma delas é o homicídio. Para conhecer a distribuição espacial e os fatores que explicam este delito na região, foi realizada uma análise exploratória de dados, e se implementou um modelo de regressão geograficamente ponderada, obtendo-se dentre outros resultados, que existe variação espacial significativa entre a idade, a escolaridade e a densidade populacional.

Palavras chave: homicídio, violência, autocorrelação geográfica.

1.- Introducción*

Cuando se habla de homicidio, se está haciendo referencia a una de las formas de violencia más neurálgicas de los delitos contra la vida (Sánchez-Jabba, 2012); el mismo está considerado como uno de los problemas más graves y perjudiciales tanto a nivel social como económico (Padrón Galarraga y García Pérez, 2018), y el conocer el comportamiento de los mismos en una ciudad tiene un valor agregado ya que a partir de estos, se pueden registrar el origen de la violencia sobre los cuales se pueden implementar políticas públicas que contribuyan a que los ciudadanos gocen de mejores condiciones de vida (Arango, Ortega y Olaya, 2009).

Se debe resaltar que el tema de homicidio es de gran importancia en cualquier esfera social, ya que es uno de los indicadores más significativos a la hora de medir la violencia de una zona, y su estudio proporciona información de variables tales como: intensidad de ocurrencia, lugares más afectados, sexo de quien incurre, entre otras, que van a permitir a que las entidades gubernamentales desarrollen estrategias y políticas públicas para combatir y controlar este fenómeno que tanto le hace daño a la sociedad.

En este orden de ideas, según el DANE (2021), la tasa de Homicidios (TH) se define como:

“... el número de defunciones causadas por agresiones (homicidios/ asesinatos) por cada 100.000 habitantes, en un período determinado y área geográfica. Por tanto, en este caso, el numerador, número de homicidios, se mide en el lugar de ocurrencia, y el denominador es el número de personas que residen donde ocurrieron los homicidios. Se emplea el término TH debido a que es el utilizado comúnmente. La razón para escoger estas definiciones de los indicadores es por su utilidad en el diseño de políticas públicas...”.

Según la UNODC, (2019) citado en Hernández Bringas (2022), para 2018 la TH a nivel mundial fue en promedio de 5,8 por cada 100.000

* Este trabajo fue financiado por vicerrectoría de investigaciones de la Universidad de Medellín y el Instituto de Medicina Legal y Ciencias Forenses Regional Noroccidente-Medellín.

habitantes. A nivel continental Europa presentó el valor más bajo con 2,1 por 100.000, seguido de Asia con 2.3 por 100.000, 2,9 por 100.000 en Oceanía, 13 por 100.000 en África y el más alto lo presenta el continente americano con una tasa de 16 por cada 100.000.

Para Colombia, según el Dane (2021) las TH más altas se concentran Arauca (59,3); en el Valle del Cauca (53,6); Caquetá (53,3) y Cauca (50,6); con una TH moderada se encuentran Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (38,2); Chocó (37,9); Norte de Santander (37,6); Quindío (36,3); Antioquia (35,5) y Nariño (35,1), los demás departamentos tienen TH por debajo de 30. Para el caso particular de Medellín, en 2020 los territorios de La Candelaria, Altavista y Santa Elena fueron los que registraron mayor TH por cada 100 mil habitantes, con 67,5; 25,1 y 19,7 respectivamente. (Medellín como vamos, 2021).

Son diversos los trabajos que se han realizado sobre el homicidio en Colombia, la mayoría exploratorio-descriptivos, como son el de Echandía (1999), quien asevera que en Colombia existe una alta correlación a nivel municipal entre los indicadores de violencia y la presencia de grupos al margen de la ley; por su parte, Rubio (1999), afirma que "la noción de que la violencia Colombiana es algo fortuito, causada principalmente por las riñas, parece pertinente únicamente para una pequeña fracción de los homicidios Colombianos, precisamente los que ocurren en los lugares más pacíficos".

Llorente et al (2001), en su trabajo estima que la medida de restricción en la venta de alcohol (ley zanahoria), tan sólo explica un 8% de la reducción en la tasa de homicidios entre 1995 y 2000. Sánchez et al (2001), realiza un trabajo para 7 ciudades principales y para los municipios de Colombia, encontrando que la violencia obedece a factores tales como la existencia de grupos armados o la presencia de actividades ilegales, mientras que "la desigualdad y la exclusión no producen en Colombia una violencia diferente a la que puede producir en otros países o regiones".

Estudios de este fenómeno para el departamento de Antioquia los han particularizado para su capital-Medellín. García et al (1992), afirma que el desarrollo de la violencia homicida ocurre en estratos socioeconómicos bajos,

de igual forma, aseveran que existe mayor posibilidad de que ocurran en las noches, en fines de semana y en la calle. Suarez et al (2005), dice que en la ciudad existe una paradójica desproporción entre la magnitud y los efectos de la violencia, y los avances conceptuales y metodológicos para el conocimiento de la misma.

Dada el involucramiento de la economía y la estadística espacial al estudio de sucesos sociales, aparecen trabajos en Colombia donde incorporan componentes geográficos en estudios de crimen. Formisano (2002), hace uso de la econometría espacial para encontrar los determinantes de los homicidios en Bogotá. Martínez (2002), lleva a cabo una descripción espacial para el estudio de la violencia en Colombia a nivel municipal, con el fin de hallar el proceso de difusión de los homicidios entre los municipios. Medina (2009), realizó un análisis espacial de los homicidios en el municipio de Cali-Colombia realizando modelos geoestadísticos, hallando que este fenómeno presenta correlación espacial positiva.

Franco (2012), realizaron un estudio descriptivo-analítico retrospectivo entre 1980-2007 para Medellín, Colombia a partir de bases de datos públicas y de registros obtenidos de las redes hospitalarias; los autores llevaron a cabo un grupo focal y revisaron la bibliografía que tenían a disposición. Dentro de los resultados obtenidos se tiene que la ciudad presentó 84.863 homicidios, de los cuales el 93% eran hombres y el 7% mujeres, la mayor TH la registraron los hombres entre 20 y 29 años, con una tasa de 1.709 por cada 100.000 habitantes, seguidos por los hombres entre 15 y 19 años, la mayoría de los estratos 1 a 3; identificando entre otras las principales causas de este comportamiento.

Sánchez-Jabba (2012) analiza la evolución de la distribución geográfica del homicidio entre 2003 y 2010 en Colombia, a partir de un análisis espacial de la tasa de homicidio municipal, empleando tres enfoques; los resultados muestran que en Colombia hay una tendencia constante a la concentración de municipios tranquilos y violentos. Los patrones hallados sugieren que los conflictos asociados al control territorial de áreas estratégicas para la producción y tráfico de estupefacientes es uno de los factores que origina la violencia y determina su alcance.

Galeano (2018) estudia la dimensión espacial y los determinantes de la criminalidad a nivel intra-urbano en la ciudad de Medellín (Colombia) a partir de modelos de regresión con dependencia espacial, encontrando que la tasa de homicidios muestra estándares espaciales significativos, con altas concentraciones en el centro y noroccidente de la ciudad. Se obtuvo además que, a medida que el hogar es más pobre y hay mayor porcentaje de migrantes, los niveles de crimen son mayores, caso contrario sucede donde hay más mujeres, mejor nivel de formación, más indígenas y mejores niveles de empleo en el sector terciario.

De León (2021), identificó, en tiempos de Covid-19, los patrones espaciales de violencia homicida en la región norte de Centroamérica a partir de técnicas exploratorias de datos espaciales. Se observó que aquellos municipios ubicados en regiones cálidas tenían altos índices de contagio, de igual manera, la violencia se ha mudado hacia las ciudades más pequeñas.

Por las conclusiones a las que han llegado estos autores y la afirmación de Llorente (2013): "que los niveles de violencia y sus aumentos o disminuciones relativas varían mucho entre regiones, departamentos o municipios. Una mirada detenida a estas diferencias muestra más bien que la violencia en Colombia es cambiante", es de suma importancia involucrar herramientas estadísticas que hagan uso de la ubicación geográfica de la información, de la naturaleza de los datos, donde dos efectos espaciales están presentes, que son: falta de independencia entre las observaciones y falta de estabilidad en el espacio del comportamiento de los fenómenos (heterogeneidad espacial), en particular el homicidio. Páez (2006).

Los modelos tradicionales parten del supuesto que la relación entre la variable dependiente y las variables explicativas no varía en el espacio de estudio, esta relación estacionaria puede ocultar algunos factores espaciales importantes que afectan la variable respuesta y la estimación de los parámetros. Para contrarrestar estas dificultades se están usando técnicas que involucren la componente espacial de ocurrencia de los hechos, como la Regresión Geográficamente Ponderada (RGP). Brunson et al (1996), introdujeron esta herramienta para involucrar el espacio, donde se puede observar las variaciones espaciales de los parámetros estimados y poder saber dónde y cuánto es el peso de una variable independiente sobre la variable respuesta.

Se utilizó la regresión geográficamente ponderada para modelar la variación espacial entre la tasa de homicidios y algunas características explicativas del homicidio en el departamento de Antioquia, y mapear así, las estimaciones de los parámetros que permitan visualizar las zonas donde sus respectivas variables son significativas.

Este trabajo constituye uno de los resultados obtenidos del proyecto de investigación "Análisis Estadístico de las Características Sociodemográficas de las Lesiones Fatales y no Fatales Ocurridas en el Departamento de Antioquia durante 2012-2013", y está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se cita el área de estudio, en la sección 3 se describe el modelo de regresión geográficamente ponderado, posteriormente en la sección 4 se presenta la metodología usada para el análisis de la información; los resultados obtenidos se muestran en la sección 5 y finalmente se presentan algunas conclusiones.

2.- Área de estudio y datos

Antioquia es un departamento que se ubica al noroeste de Colombia. Constituye uno de los 32 departamentos que conforman la división territorial del país; y es uno de los que más municipios tiene, 125 en total, los cuales, a su vez, se agrupan en 9 subregiones. Con capital en la ciudad de Medellín, el departamento de Antioquia cuenta con un extenso territorio y variada topografía que han hecho de éste un escenario propicio para que se gesten diferentes actores violentos entre grupos armados de extrema derecha y extrema izquierda, así como de delincuencia común, que han llevado a que haya sido caracterizado por varios años como uno de los más afectados por la violencia, situación que se evidencia cuando en el informe final de la comisión para la verdad "hay futuro si hay verdad" (p. 144.) se identifica entre los departamentos donde más masacres se realizaron (125980 correspondientes al 28%), una violencia que ha afectado principalmente su área rural. Incluso, después de firmado el acuerdo de paz, entre 2020 y 2022 en el país se han presentado 231 masacres que suman 877 homicidios, y el departamento de Antioquia sigue estando entre los más afectados por este flagelo, siendo los campesinos y desplazados los más afectados (Comisión de la verdad, p.146).

El presente trabajo se enfoca en los municipios del departamento de Antioquia, inicialmente se realiza un análisis exploratorio del comportamiento de los homicidios según las regiones y municipios en el departamento, y posteriormente se implementa un modelo de regresión geográficamente ponderado (RGP) en un umbral de tiempo que comprende los años 2012 y 2013, cuando el departamento contaba con 6.429.605 habitantes.

3.- Marco teórico

3.1.- Modelo de regresión geográficamente ponderado

La Regresión Geográficamente Ponderada fue definida por Fotheringham, Brunson & Charlton (2002) y se ha considerado como un modelo de regresión lineal que ajusta las relaciones que varían espacialmente; es decir, es un modelo de regresión local que realiza una ecuación para cada uno de los elementos de la base de datos de la variable dependiente, con la finalidad de capturar todas las posibles variaciones geográficas entre ellos.

Fotheringham (2002, p. 53) describe el procedimiento de esta regresión de la siguiente manera:

“... Si se traza un círculo de radio, por ejemplo, r alrededor de un punto concreto p_i y se realiza una regresión por mínimos cuadrados ordinarios de este modelo basado únicamente en las observaciones que están geográficamente dentro del círculo trazado, entonces el parámetro β_j obtenido, se puede interpretar como un estimador de las variables independientes alrededor de p_i ; en conclusión, son estimaciones de β_{ij} . Al evaluar para cada p_i se puede obtener un conjunto de estimadores con variabilidad espacial...”.

La forma general del modelo de RGP donde incorpora en su ecuación el valor de las coordenadas geográficas de los datos, está dado por:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i)x_{ik} + \varepsilon_i \quad (1)$$

donde (u_i, v_i) denota las coordenadas del i – ésimo punto en el espacio y $\beta_k(u_i, v_i)$ es el k – ésimo parámetro de la observación i , Fotheringham et al (2002). El modelo (1) permite que la estimación de los parámetros varíe sobre la región de estudio y posibilita la representación visual de éstos en un mapa (Mennis, 2006).

La estimación de los parámetros se lleva a cabo por el método de mínimos cuadrados ponderado, teniendo presente que las observaciones más cercanas a un punto i en particular tienen mayor influencia que los puntos alejados al punto i . La matriz que contiene los parámetros estimados está dada por la expresión:

$$\hat{\beta}(u_i, v_i) = (X^T W(u_i, v_i) X)^{-1} X^T W(u_i, v_i) y \quad (2)$$

donde $W(u_i, v_i)$ denota una matriz cuadrada cuyos elementos fuera de la diagonal principal son cero y donde los elementos de la diagonal son las ponderaciones geográficas de cada uno de los datos observados.

3.2.- Elección de la función de ponderación espacial (Kernel)

La función de ponderación espacial está relacionada con las distancias entre las observaciones, y ésta es fundamental a la hora de hacer uso de la regresión geográficamente ponderada. Para una observación i , se tiene que las observaciones que están más cerca tendrán mayor peso, que aquellas que se encuentran más alejadas a la observación i , y por ende tendrán más efecto sobre los parámetros estimados en la observación i , Leung et al (2000a), esto implica que los pesos en la matriz $W(u_i, v_i)$ serán mayores a medida que las distancia se hacen más pequeñas. Una posible selección para la función de ponderación donde se relaciona las observaciones i y j está dada por:

$$w_{ij} = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{d_{ij}}{b} \right)^2 \right] \quad (3)$$

donde d_{ij} denota la distancia entre la observación i y j , y b es el *bandwidth* (ancho de banda). Una función alternativa es la función *bi-square*, dada por:

$$w_{ii} = \begin{cases} \left[1 - \left(\frac{d_{ii}}{b}\right)^2\right]^2, & s \quad d_{ii} < b \\ 0, & 0 \quad v \end{cases} \quad (4)$$

Los pesos varían de forma continua sobre la región de estudio en las funciones (3) y (4), Brunsdon et al (1996).

3.3.- Calibración de la función de ponderación espacial

Además de la importancia de la función de ponderación espacial, igualmente se hace primordial la selección de un óptimo *bandwidth*, b . Para ello, existen dos criterios que se pueden usar para su selección:

Un primer camino es usando la *cross-validation*, CV (validación cruzada), dada por:

$$C = \sum_i [y_i - \hat{y}_{\neq i}(b)]^2 \quad (5)$$

donde $\hat{y}_{\neq i}(b)$ es el valor ajustado y_i cuando la observación i es descartada.

Una segunda herramienta es el Criterio de Información de Akaike (AIC), dado por:

$$A_c = 2n \log(\hat{\sigma}) + n \log(2\pi) + n \left\{ \frac{n + t_1(S)}{n - 2 - t_1(S)} \right\} \quad (6)$$

donde n es el tamaño muestral, $\hat{\sigma}$ es la desviación estándar estimada del término del error y $t_1(S)$ es la traza de la matriz $S = (X^T W(u_i, v_i) X)^{-1} X^T W(u_i, v_i)$.

4.- Metodología

El diseño metodológico de la presente investigación es de tipo exploratorio, descriptivo correlacional y de corte transversal. Según Hernández, Fernández-Collado y Baptista (2016) una investigación de tipo descriptiva correlacional pretende especificar las características o propiedades de individuos, procesos y objetos mediante la medición o recolección de información sobre diversas variables y permite identificar la relación existente entre dos o más variables o categorías, en determinados contextos.

Es de carácter exploratorio ya que busca develar el comportamiento de los homicidios en el departamento de Antioquia en los últimos 20 años, descriptiva en la medida que se quiere identificar el comportamiento de los homicidios en el departamento según la regiones y municipios que lo conforman, y correlacional porque pretende establecer la relación entre el número de homicidios y los municipios donde ocurrió el hecho, según un conjunto de variables predictores; y finalmente se tiene un corte de tipo transversal puesto que hace un cruce de las datas de medicina legal con la información suministrada por el DANE. (Hernández et al., 2016)

En consecuencia, se puede decir que el artículo se desarrolla en dos fases, una fase exploratoria donde se realiza un sondeo de la información a lo largo del tiempo según los municipios, y una segunda fase, donde se realiza el análisis georreferenciado. Se parte entonces con la unificación de las bases de datos seleccionadas con el objetivo de procesar la información de una manera más efectiva y eficiente. Una vez consolidadas, se implementa el proceso de limpieza de datos de manera tal que se pueda contar con unos datos de calidad que permitan aplicar cada una de las técnicas apropiadas para obtener resultados confiables.

Fuentes de información: Las bases de datos utilizadas en esta investigación corresponde a la data de muertes violentas, homicidios, que contienen el registro producto de la actividad pericial las cuales fueron proporcionadas por las Unidades Directas e Indirectas del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses, Regional Noroccidente-Medellín, Antioquia, correspondiente al año 2012 y 2013, mientras que las proyecciones de población, y la información complementaria sobre el número de homicidios en el complemento del umbral del tiempo fueron suministradas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística -DANE- de Colombia.

Población: la constituye las lesiones fatales causadas por homicidios en el departamento de Antioquia.

Muestra: la constituye las lesiones fatales causadas por homicidios en el departamento de Antioquia entre los años 2003 y 2021.

VARIABLES A UTILIZAR: Las variables independientes como posibles predictoras se tomaron de investigaciones previas donde muestran los factores significativos a la hora de explicar el fenómeno de estudio, tasa de homicidios en cada municipio-variable respuesta (Tabla 1).

Tabla 1. Definición de variables

Variable	Descripción
	Tasas por cien mil habitantes
Homicidio	Tasa de homicidios ocurridos en cada municipio
Escolaridad	Tasa de víctimas con educación secundaria (máximo)
Causa del Hecho	Tasa de homicidios según causa del hecho: Arma de fuego
Edad	Tasa de víctimas con edad entre 15 y 39 años
Hombres	Tasa de víctimas hombres
Densidad	Densidad de población de cada municipio
Soltero	Tasa de víctimas solteras

Herramientas utilizadas: para el análisis descriptivo se utilizó la herramienta R para ejecutar las rutinas que generan los resultados exploratorios. Para el análisis georreferenciado se utilizaron las herramientas Arcgis10.1¹, y OpenGeoda.² Con el primero se implementó el modelo de regresión geográficamente ponderada, y se utilizó la segunda herramienta para comprobar la presencia o no de autocorrelación espacial de las variables. En este trabajo se utilizó la función kernel adaptiva para la asignación de los pesos, ya que es la más utilizada en los modelos y es la que más se adapta a una distribución irregular del espacio, y para el umbral de observaciones a considerar en el modelo se utilizó el criterio de información de Akaike AIC.

5.- Resultados

Si bien el modelo de regresión geográficamente ponderado se implementa sobre los años 2012 - 2013, previo a su implementación se presenta una

¹ ArcGIS es un sistema completo que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica.

² Es un software fácil que se ha desarrollado desde 2003 para respaldar la infraestructura de investigación de análisis espacial libre y de código abierto.

exploración del comportamiento de este fenómeno a lo largo de los últimos 19 años. Dado el interés geográfico del trabajo, las curvas que se presentan en el tiempo muestran el comportamiento del fenómeno según la región, en tasas por cien mil habitantes, y según el sexo en cantidad de homicidios.

5.1.- Descripción de los homicidios en el tiempo en Antioquía

El comportamiento de los homicidios en el departamento de Antioquia ha sido un fenómeno que ha presentado múltiples fluctuaciones en el tiempo. En la Figura 1, se observa el comportamiento de la tasa de homicidios en el departamento de 2003 a 2021. En ella, se aprecia que la tasa de homicidios más alta en el departamento durante el umbral de tiempo ocurre en el año 2003 (83.54 homicidios por cada cien mil habitantes), luego se presenta un decrecimiento en la misma hasta el 2007, y continúa con fluctuaciones que alcanzan un máximo local en el año 2011, después de este año ocurren las tasas más bajas. En el 2012, el departamento alcanzó una tasa de 44.6 homicidios por cada cien mil habitantes, y para el año 2013 cayó a 42.44 homicidios por cada cien mil habitantes.

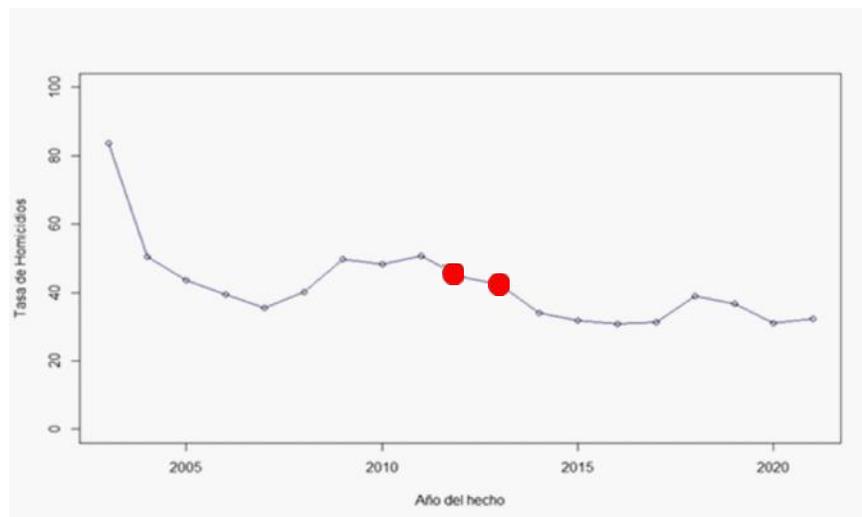


Figura 1 Comportamiento de la tasa de homicidios por cien mil habitantes en Antioquia 2003 - 2021

El comportamiento de las tasas de homicidios, según las subregiones del departamento, se pueden observar en la Figura 2. Nótese que, a lo largo del umbral de tiempo de estudio, la curva del Valle de Aburra presenta principalmente fluctuaciones con tendencia decreciente, terminado el período con la tasa por cien mil habitantes más baja del departamento (14.62 casos por cada cien mil habitante).

Por otra parte, la curva de la región del Bajo Cauca termina con la tendencia más alta al final del período, pese a que su tasa en el 2021 fue de 89.52 homicidios por cada cien mil habitantes, siendo superada este año por la región del Nordeste Antioqueño, con 114.89 homicidios por cada cien mil habitante (observe que la tendencia de la curva del Bajo Cauca es elevada al final del periodo por los valores extremos que se pueden observar en los tres años anteriores).

De igual manera, se aprecia además, que la región del Bajo Cauca es por su parte, la que presenta las tasas más fluctuantes de todo el departamento, iniciando el período con las tasas más bajas, pero con un gran crecimiento en la mayor parte del tiempo llevándola a culminar el periodo por encima de las demás. El Nordeste Antioqueño aparece como la segunda región con tasas más altas durante el periodo, y con un marcado crecimiento del 2007 en adelante. Con excepción de la subregión Oriente, que al igual que el Valle del Aburra, conserva las tasas más bajas, el resto de las regiones no mencionadas, presentan tendencias alrededor de una tasa de 50 homicidios por cada cien mil habitantes. Se concluye de la Figura 2, que el comportamiento de los homicidios en el departamento de Antioquia, a lo largo de estos 19 años, efectivamente ha variado dependiendo de la subregión donde ocurrió el hecho, como se puede apreciar de manera más concreta en la Figura 3.

La Figura 3, presenta la distribución de las tasas de homicidios en cada subregión durante los 19 años del umbral de estudio. Se observa claramente en ella, que la región geográfica donde ocurre el hecho tiene incidencia sobre la tasa de homicidios en el departamento. La distribución en las regiones Bajo Cauca, Magdalena Medio y Nordeste sobresalen de las demás, con excepción de las regiones Suroeste y Norte, ya que sus tasas

se encuentran por encima del resto, además, se puede observar una asimetría con tendencia a derecha en las subregiones de Magdalena Medio y Nordeste.

El Valle de Aburra que se indicó anteriormente con las tasas de homicidios más bajas junto con la región Oriente, se muestra en la Figura 3 con una dispersión significativa, y presencia de una tasa atípica a derecha, pero conservando una medida central alrededor de los 30 homicidios por cada cien mil habitantes, la segunda más baja entre las regiones. La región Oriental, presenta las tasas más bajas a lo largo de todo el periodo, aunque con presencia de valores extremos, que movieron su curva por encima de la del Valle de Aburra en la Figura 2. Una vez más se hace evidente la influencia de las regiones sobre las tasas de homicidios en el departamento de Antioquia.

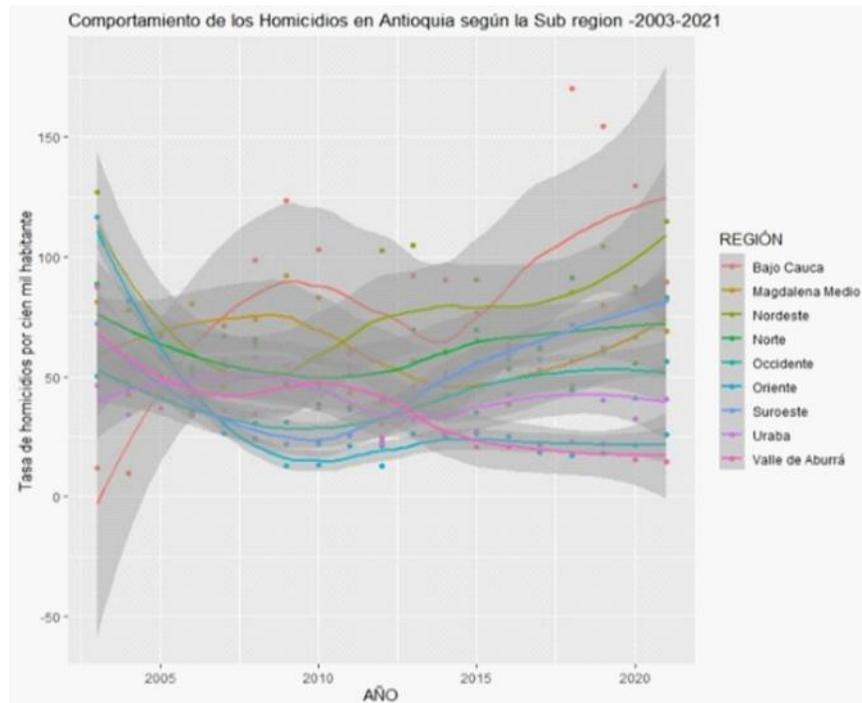


Figura 2 Tasa de homicidios en Antioquia según la Región 2003-2021

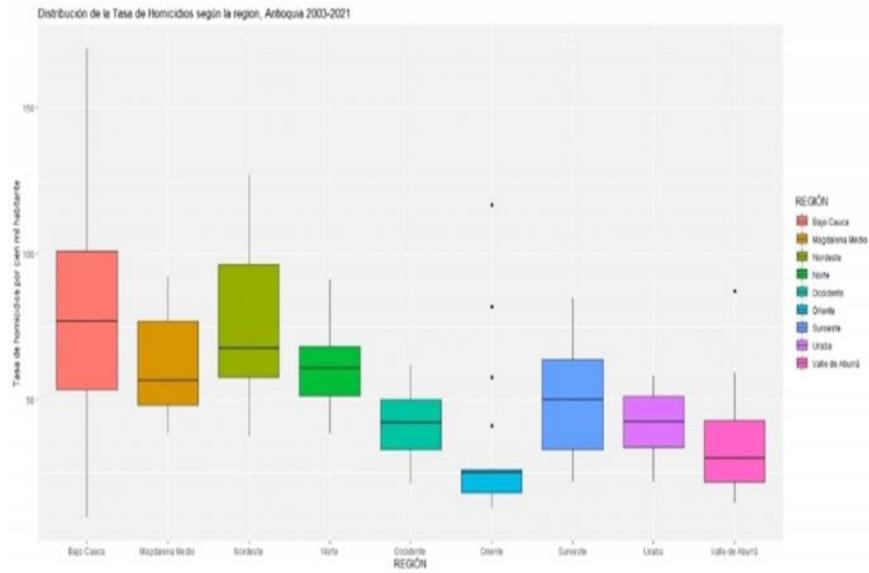


Figura 3 Distribuciones de las tasas de Homicidios según la subregión en Antioquia

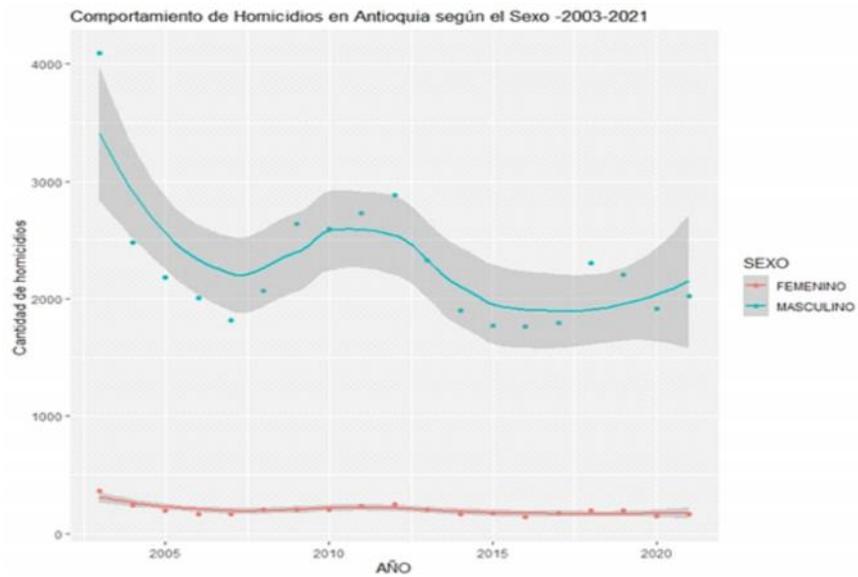


Figura 4 Cantidad de Homicidios en Antioquia según el Sexo 2003 - 2021

Si bien para el umbral tiempo del estudio completo (2003-2001) no se contó con la población por regiones según el sexo, se puede observar en la Figura 4 que la cantidad de hombres asesinados en el departamento es claramente superior a lo largo del tiempo. Aunque la curva de los homicidios de las mujeres se observa relativamente estable en el tiempo, no sucede lo mismo para el caso masculino, donde se puede identificar el comportamiento de la tendencia global de los homicidios en el departamento.

Claramente la cantidad de casos de homicidios de mujeres se puede observar en el Valle de Aburra (Figura 5), sin embargo, no se puede afirmar que exista alguna región en la que no se haya presentado el homicidio de una mujer en el umbral de tiempo, sin necesidad de que este haya sido clasificado como un feminicidio. Si bien, no se puede concretar el comportamiento de las tasas según el sexo, sí se puede evidenciar un comportamiento fluctuante según el sexo en las diferentes regiones, principalmente el sexo masculino (recuerde que se encuentra entre las variables seleccionadas para el modelo).

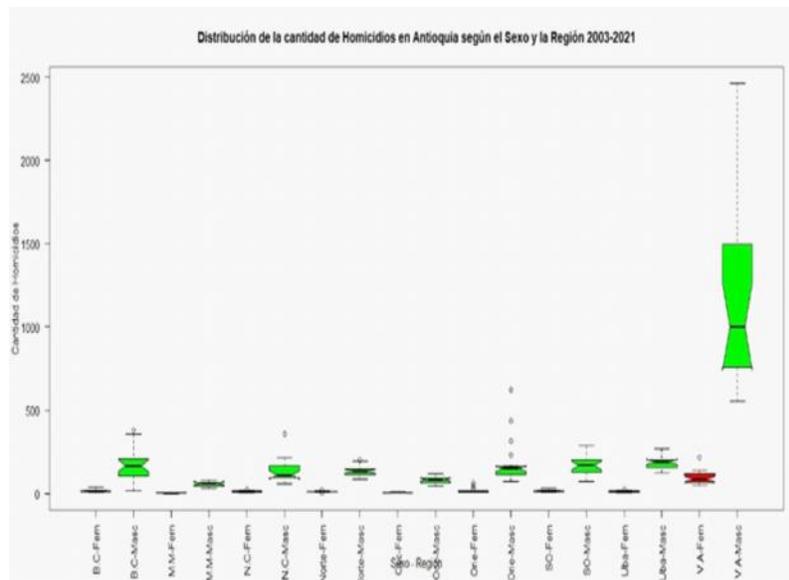


Figura 5 Distribución de la cantidad de homicidios en Antioquia según sexo y región

5.2.- Análisis de la correlación espacial

Para lograr obtener las variables que conformarían el modelo final, se realizaron una serie de simulaciones y se analizaron las matrices de correlación bivariada que permitieran identificar su posible multicolinealidad. En este orden de ideas, se seleccionó un modelo con un alto grado para explicar la tasa de homicidios que incorpora sólo tres variables independientes, Edad, Escolaridad y Densidad Poblacional.

Dada la naturaleza de la información utilizada se realizaron los análisis para determinar, si tanto la variable dependiente como las tres predictoras presentaban autocorrelación espacial. El valor-p del estadístico I de Moran es de 0.004, por tanto, todas las variables involucradas en el modelo presentan autocorrelación espacial significativa con un nivel de confianza del 95% (Figura 6).

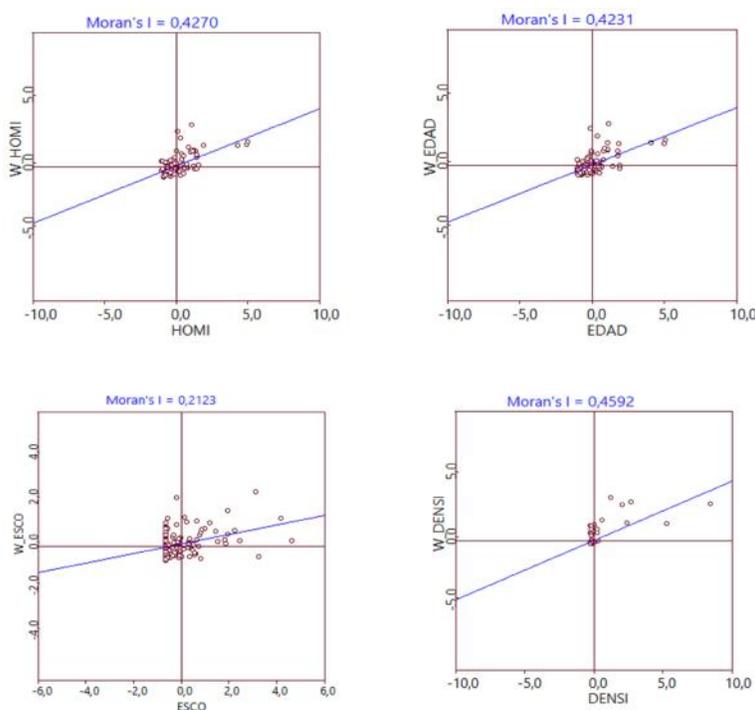


Figura 6 Scatterplot de Moran

El 96% de variabilidad de la tasa de homicidios es explicada por el modelo de RGP, el cual resultó mayor al obtenido por los otros modelos. Asimismo, el análisis de los residuos mostrados en los mapas de clústers y significancia descartan algún tipo de agrupamiento, esto verifica los buenos resultados de RGP (Figura 7).

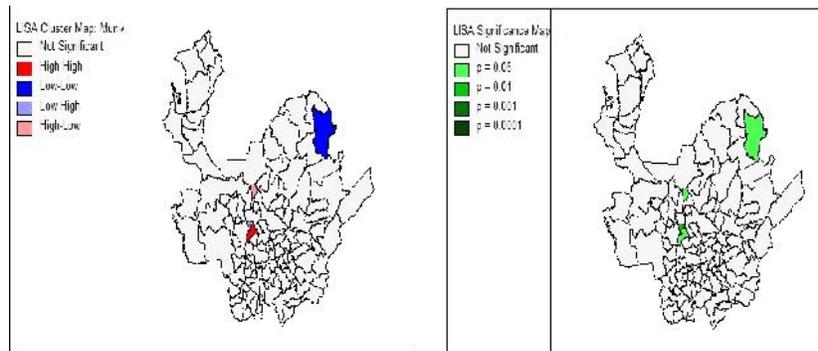


Figura 7 Clústers espaciales y significancia en los errores del modelo RGP

La Figura 8, muestra la variación espacial del poder explicativo del modelo a partir del R^2 local. Se visualiza que el modelo presentado, se desempeña mejor en la zona este que en el resto de la ciudad. Es decir, que la tasa de homicidios en dicha zona es mejor explicada por nuestras variables independientes, pero éstas tienen menos poder predictivo en otras zonas del departamento de Antioquia.

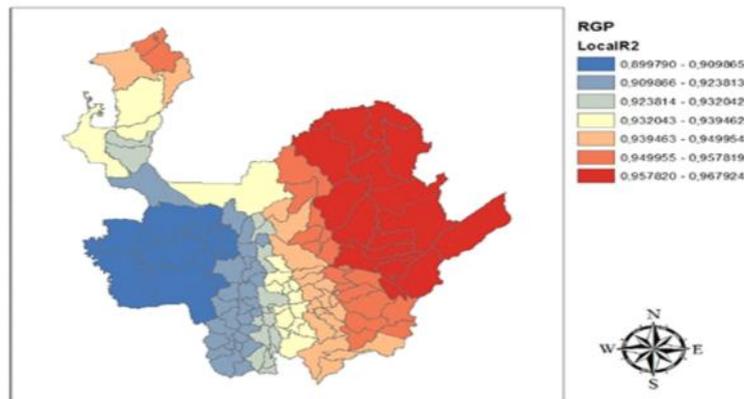


Figura 8 Distribución espacial del R^2 local

Finalmente, en las Figuras 9, 10, 11, se muestra la variación espacial de los coeficientes locales estimados de las variables independientes: edad, escolaridad y densidad, respectivamente. La elasticidad de la variable edad revela que la influencia en el modelo varía sobre el espacio, éstas son más fuertes en dirección este-oeste. A pesar de que la variable tiene un efecto positivo en todo el departamento tiende a incrementar la tasa de homicidio en la región noreste de Antioquia. El mapa de los coeficientes locales para la variable escolaridad muestra que el peso en el modelo varía en dirección sur-norte, aun cuando la variable tiene un efecto negativo en gran parte del departamento, centro y centro-norte, su efecto sobre la tasa de homicidio es mayor en la zona sur del departamento de Antioquia. El comportamiento espacial de la variable densidad es contrario al de la variable escolaridad. Es decir, su influencia en el modelo es en dirección norte-sur. Además, tiende a aumentar la tasa de homicidio en la zona norte del departamento.

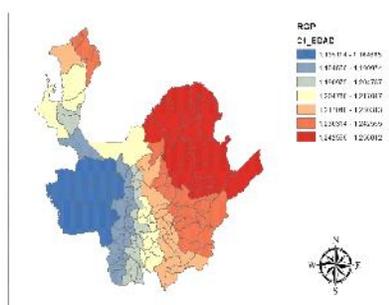


Figura 9 Distribución espacial de los coeficientes locales para la variable edad

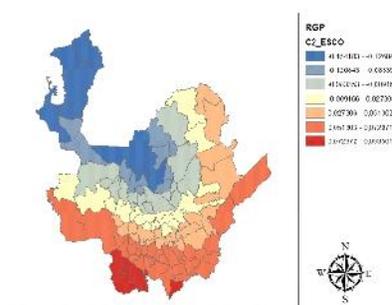


Figura 10 Distribución espacial de los coeficientes locales para la variable escolaridad

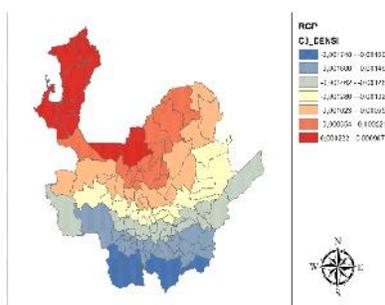


Figura 11 Distribución espacial de los coeficientes locales para la variable densidad

6.- Conclusiones

Los procedimientos llevados a cabo a lo largo de este trabajo han mostrado como los métodos estadísticos que hacen uso de la ubicación espacial de la ocurrencia de un suceso, los homicidios en nuestro contexto, se han estado desarrollando rápidamente en las últimas dos décadas con impactos muy significativos en las diferentes áreas del conocimiento, en particular en el campo social. En el estudio de los homicidios, en un territorio tan pluricultural y geográficamente heterogéneo, estas herramientas han llegado a ser de gran utilidad para darle un enfoque regional al estudio, donde la presencia de diferencias sistemáticas de los homicidios en las distintas regiones del departamento de Antioquia está presente.

El análisis exploratorio de las tasas de homicidios en el departamento a lo largo de los 19 años nos lleva a concluir que el comportamiento de este fenómeno está aparentemente relacionado con la región donde ocurrió el hecho. Mostrando las regiones Bajo Cauca, Nordeste y Magdalena Medio como las subregiones con las tasas de homicidios por cien mil habitantes más altas en la mayor parte del umbral de tiempo, además de ser estas mismas subregiones las que presentan las tasas con mayor dispersión en el departamento a lo largo del tiempo en estudio.

Por otra parte, las regiones que presentan las tasas de homicidios por cien mil habitantes más bajas son el Oriente y el Valle de Aburra. Mientras que las tasas en el Valle de Aburra presentan una dispersión más homogénea con las regiones no extremas; el Oriente por su parte, muestra un comportamiento significativamente diferente a las demás regiones del departamento, con las tasas más bajas en el umbral de tiempo, y la menor dispersión, cuenta con el mayor número de valores extremos, valores tan significativos que superan el 75% de las tasas del Bajo Cauca, la región con las tasas más altas.

El homicidio en el sexo masculino mostró también una relación de dependencia con las diferentes regiones, además de múltiples fluctuaciones en el tiempo, mientras que en las mujeres se encuentra un comportamiento relativamente constante en el tiempo. Dado la población en las regiones no es constante, se infiere de las curvas presentadas que el homicidio de mujeres en diferentes regiones tampoco lo es.

Los resultados del análisis georreferenciado y del modelo RGP se ejecutaron de manera más detallada sobre los municipios del departamento, descartando con estos la existencia de algún tipo de agrupamiento entre municipios. Y de las seis variables independientes que se consideraron inicialmente como posibles factores explicativos de la tasa de homicidio en el departamento de Antioquia, finalmente se consideraron para el modelo la edad, escolaridad y densidad de la población del municipio. A estas tres variables se les analizó la autocorrelación espacial en la región de estudio, el cual resultó significativo.

Entre las principales conclusiones obtenidas con el modelo RGP se tienen:

En la zona sur del departamento (regiones sur y suroeste) la variable grado de escolaridad presenta un mayor efecto sobre la tasa de homicidios.

Las variables incluidas en el modelo, edad, escolaridad y densidad de la población del municipio, presentaron autocorrelación espacial significativa con un nivel de confianza del 95%.

Pese a que se observó que la variable Edad tiene un efecto positivo en todo el departamento, tiende a incrementar la tasa de homicidio en la región noreste de Antioquia.

La escolaridad mostró un efecto mayor sobre la tasa de homicidio en la zona sur del departamento de Antioquia.

La variable densidad presenta un comportamiento contrario al de la variable escolaridad, por lo que tiende a aumentar la tasa de homicidio en la zona norte del departamento (regiones Norte y Urabá).

Los resultados tanto descriptivos como los modelos georreferenciados han mostrado que el comportamiento de las tasas de homicidios se ve afectado por la ubicación geográfica del hecho.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arango Londoño, D., Ortega Lenis, D., & Olaya Ochoa, J. (2009). Modelación del número de homicidios vía regresión de Poisson.
- Brunsdon C, Fotheringham AS, Charlton ME (1996), Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity. *Geogr Anal* 28:281-298.
- De León, P. D. Y. (2021). Análisis espacial de violencia homicida en la región norte de Centroamérica (2019-2020). *Revista Latinoamericana Estudios de la Paz y el Conflicto*, 2(4), 99-114.
- Echandía, C. (1999). El conflicto armado y las manifestaciones de violencia en las regiones de Colombia. Bogotá, Presidencia de la República, Oficina del Alto Comisionado para la Paz, Observatorio de Violencia, Biblioteca para la Paz, Serie: Aportes para la Paz, 1.
- Franco Galeano, V. (2018). Análisis espacial de la criminalidad a nivel intra-urbano: El caso de Medellín, Colombia (Doctoral dissertation, Universidad EAFIT).
- Franco, S., Mercedes, C., Rozo, P., Gracia, G. M., Gallo, G. P., Vera, C. Y., & García, H. I. (2012). Mortalidad por homicidio en Medellín, 1980-2007. *Ciência & Saúde Coletiva*, 17, 3209-3218.
- Formisano, Michel. (2002), "Econometría Espacial: Características de la violencia Homicida en Bogotá" Documento CEDE 2002-10, ISSN 1657-7191 (Edición electrónica).
- Fotheringham, A. S., Brunsdon, C., & Charlton, M. (2002). *Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships*. John Wiley & Sons
- García, H.I., Vélez CH. (1992) Caracterización de la violencia homicida en la década de los ochenta: aproximación a la construcción de escenarios y campos de conflicto [Tesis de Maestría]. Medellín: Facultad Nacional de Salud Pública. Universidad de Antioquia, p. 281.
- Hernández Bringas, H. (2022). Homicidios en América Latina y el Caribe: magnitud y factores asociados. *Notas de Población*.
- Leung, Y., Mei, C. L. and Zhang, W. X., (2000a), *Environment and Planning, A* 32, 9-32.
- Llorrente, M. V., Escobedo, R., Echandía, C., Rubio, M. (2001), "Violencia Homicida en Bogotá: Más que Intolerancia", Documento CEDE-Universidad de Los Andes.
- Llorrente, M. V., Fundación ideas para la paz. Disponible: <http://www.ideaspaz.org/publications/posts/912>

- Martínez, H. (2002), "Estudio Espacial de la Violencia en Colombia", Universidad de los Andes.
- Medellín cómo vamos 15 años, (2021), Informe de Calidad de Vida de Medellín, 2020
- Medina, J. (2009), "Análisis Espacial de los Homicidios Ocurridos en el Municipio de Santiago de Cali en el Periodo 2002, 2007, 2009".
- Mennis, J. (2006), *The Cartographic Journal* 43 (2): 171-179.
- Padrón Galarraga, C. X., & García Pérez, T. (2018). Trastornos mentales y homicidio. *Revista Cubana de Medicina General Integral*, 34(1), 4-13.
- Páez, A. (2006), "Exploring contextual variations in land use and transport analysis using a probit model with geographical weights". *Journal of Transport Geography* 14 (3), 167-176.
- Rubio, M. (1999), *Crimen e Impunidad: Precisiones sobre la Violencia*, Tercer Mundo editores y CEDE, Bogotá: Colombia.
- Sánchez-Jabba, A. (2012). *Evolución geográfica del homicidio en Colombia*. Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana; No. 169.
- Sánchez, F., Núñez, J. (2000) "Determinantes del Crimen Violento en un País Altamente Violento: El Caso de Colombia". Bogotá: CEDE-Universidad de Los Andes.
- Suárez, C., Giraldo, C., García, H., López, M., Cardona, M., Corcho, C. y Posada, C. (2005), "Medellín entre la Muerte y la Vida. Escenarios de Homicidios, 1990-2002". *Estudios Políticos* No. 26. Medellín, p. 185-205.
- UNODC (Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito) (2019), *Estudio mundial sobre el homicidio: resumen ejecutivo*, Viena.