

# ANÁLISIS Y MODELAMIENTO ESPACIAL DE LA CONTAMINACIÓN SONORA EN LA LOCALIDAD DE ENGATIVÁ MEDIANTE LA APLICACIÓN DE TÉCNICAS GEOESTADÍSTICAS

ANALYSIS AND SPACE MODELING OF THE NOISE POLLUTION IN THE LOCATION OF ENGATIVÁ BY MEANS OF THE APPLICATION OF GEOSTATISTICAL TECHNIQUES

Fecha de recepción: 15 de noviembre de 2010 / Fecha de aprobación: 21 de enero de 2011

Arana Sosa Juan Carlos  
Gaona Córdoba Francisco Javier

## Resumen

Teniendo como base los efectos producidos por la contaminación sonora en la localidad de Engativá se estableció la necesidad de analizar el ruido de forma espacial con el fin de generar mapas acústicos donde se pueda establecer aquellas zonas en las cuales se sobrepasan los límites sonoros de acuerdo con la normatividad existente. Este estudio tomó diferentes puntos de emisión sonora medidos en la localidad, y mediante la aplicación de técnicas geoestadísticas, las cuales combinan la información de las fuentes de emisión con la ubicación espacial de los puntos monitoreados se pretende analizar y modelar el comportamiento del fenómeno acústico que refleje la variación de la correlación espacial de la variable con respecto a la distancia y por medio de los métodos de interpolación *kriging* generar mapas de pronósticos en las áreas no muestreadas.

**Palabras claves:** ruido, geoestadística, modelo, *kriging*.

## Abstract

On the basis of the effects of noise pollution in the town of Engativá was the need to analyze noise spatially to generate acoustic maps in which to establish those areas where noise limits are exceeded in accordance with existing regulations. This study took different measured noise emission points in the town and through the application of geostatistical techniques which combine information from emission sources with the spatial location of monitored points seeks to analyze and model the behavior of acoustic phenomena reflect the variation of the spatial correlation of the variable for distance and through interpolation methods *kriging* to generate maps of forecast in the area not sampled.

**Keywords:** noise, geostatistics, model, *kriging*.

## 1. Introducción

Técnicamente, el ruido es un tipo de energía secundaria que se propaga en el ambiente en forma ondulatoria compleja desde el foco emisor hasta el receptor a una velocidad determinada y disminuyendo su intensidad con la distancia y el entorno físico. El ruido en las ciudades está relacionado con el desempeño de las actividades humanas, por lo tanto, podría relacionarse con la densidad de población. Agentes como: el tráfico automotor, el transporte aéreo, la industria, el comercio y los establecimientos de entretenimiento, hacen que se haya desviado la atención hacia este aspecto.

El presente estudio plantea la alternativa de analizar y modelar la variable espacial Leq AT dB(A), indicador empleado en la normatividad para evaluar los niveles de ruido ambiental que se producen sobre una región de estudio determinada, que para este caso es la localidad de Engativá. Con base en información levantada en campo<sup>1</sup> y por medio de la aplicación de técnicas geoestadísticas se busca obtener resultados que sirvan de apoyo al control y seguimiento de esta problemática ambiental.

A partir de los datos suministrados de la variable espacial Leq AT dB(A), y de forma análoga a como se procede en el procesamiento de información estadística, los datos son sometidos a una primera etapa, el análisis exploratorio de datos, donde se aplican herramientas estadístico-gráficas que describen y visualizan las distribuciones espaciales, identificando datos atípicos, descubriendo formas de asociación (autocorrelación espacial) que a su vez, pueden ser de carácter global o local, y sugiriendo estructuras en el espacio geográfico (heterogeneidad espacial).<sup>2</sup> Posteriormente se procede al análisis estructural, donde se evalúa el semivariograma experimental y se ajusta a éste un modelo teórico que explique la variabilidad y correlación espacial. Finalmente se hace la predicción en los puntos de la región no muestreados por medio de la técnica *kriging*, proceso que calcula un promedio ponderado de las observaciones co-

nocidas, a las cuales les son asignados unos pesos determinados de acuerdo a la estructura de correlación espacial.

## 2. Metodología

### 2.1 Generalidades

Para evaluar la contaminación sonora de la localidad de Engativá se contó con mediciones en diferentes puntos, distribuidos geográficamente de forma irregular, donde están incluidos datos tanto de fuentes fijas (establecimientos comerciales, industrias, sitios de entretenimiento, zonas de tranquilidad, entre otros) como de fuentes móviles (vías de tráfico intenso o pesado, vías intermedias). Cabe aclarar que cada punto de monitoreo tiene asociado un valor tanto para el período diurno como para el período nocturno, tal y como lo establece la norma.<sup>3</sup>

La georreferenciación de los datos y el modelamiento obtenido ofrecen como resultado los mapas de ruido para el período diurno y para el período nocturno; estas representaciones serán como radiografías que dan un dimensionamiento de la contaminación sonora en la localidad de Engativá, permitiendo identificar zonas donde haya conflicto entre los niveles de ruido obtenidos y los niveles máximos permisibles de ruido establecidos por norma.<sup>4</sup> A continuación se citan las actividades involucradas en el desarrollo del estudio:

- Recopilación, evaluación, organización e integración de los datos. Se trató de recoger la mayor cantidad de información que busque dar más consistencia al estudio y de esta forma poder lograr los objetivos trazados inicialmente.
- Análisis exploratorio de los datos, donde se buscó establecer los supuestos necesarios para la aplicación de la técnica geoestadística más adecuada.

1 Universidad INCCA de Colombia. Elaboración del mapa digital de ruido de las localidades de Engativá, Fontibón y Santa Fe. Convenio 361/2006 entre la Universidad INCCA de Colombia y la Secretaría Distrital de Ambiente, 2007.

2 Chasco Yrigoyen, Coro. "Métodos gráficos del análisis exploratorio de datos espaciales". En: *Abstract*, Madrid, 2003.

3 Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 0627 (7 de abril), "Por la cual se establece la norma nacional de emisión de ruido ambiental", 2006, p. 6.

4 *Ibíd.*, p. 6.



- Análisis estructural, permitió definir los modelos y los métodos de ajuste adecuados.
- Comparación de los modelos, a partir de los cuales se generaron los mapas de ruido que nos describió la situación de la contaminación sonora en la localidad de Engativá.
- Conforme a la obtención de los modelos definitivos se hizo el respectivo análisis, con el fin

de concluir acerca de los resultados que se obtuvieron en el desarrollo del proyecto.

A continuación (figura 1) se presenta un esquema general de las etapas abordadas para la obtención de los mapas diurno y nocturno, a partir de los cuales se hicieron los respectivos análisis.

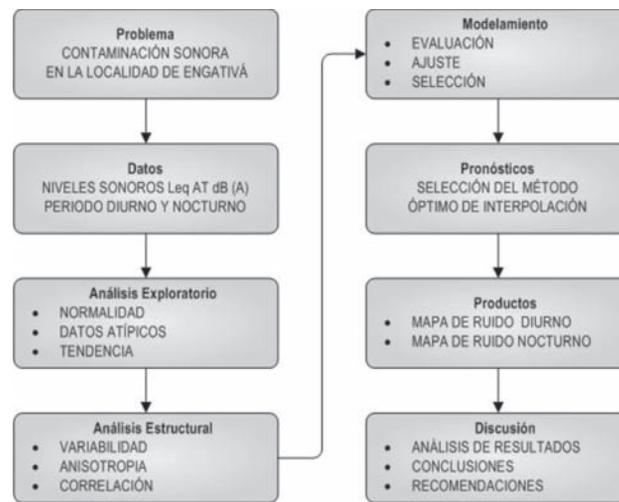


Figura 1. Esquema general metodológico  
Fuente: Autores

## 2.2 Monitoreo de ruido ambiental

Los datos empleados en el estudio de la contaminación sonora de la localidad de Engativá, fueron suministrados por la Universidad INCCA de Colombia, que mediante convenio 361/2006 con la Secretaría Distrital de Ambiente, elaboró los mapas digitales de ruido para las localidades de Engativá, Fontibón y Santa Fe. Vale la pena señalar que únicamente se suministraron los datos referentes a la localidad de Engativá y por ende el estudio se encuentra enmarcado dentro de esta localidad en particular.

Para fines prácticos es conveniente describir el procedimiento para realizar los monitoreos de ruido ambiental:

- “En las zonas urbanas y de expansión urbana el ruido ambiental se mide instalando el micrófono a una altura de cuatro (4) metros, medidos a

partir del suelo terrestre, y a una distancia equidistante de las fachadas, barreras o muros existentes a ambos lados del punto de medición; si éstos no existen en uno de los costados, el punto se sitúa a una distancia de cuatro (4) metros medidos horizontalmente desde el costado que las posea; si no existen en ninguno de los costados, se toma el punto equidistante entre los límites del espacio público correspondiente. Bajo ninguna circunstancia se pueden efectuar mediciones bajo puentes o estructuras similares”.<sup>5</sup>

5 Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 0627 (7 de abril), “Por la cual se establece la norma nacional de emisión de ruido ambiental”, 2006, p. 21.

$L_s$  = Nivel equivalente medido en la posición del micrófono orientada en sentido sur.

$L_e$  = Nivel equivalente medido en la posición del micrófono orientada en sentido este.

$L_v$  = Nivel equivalente medido en la posición del micrófono orientada en sentido vertical.



Se deben efectuar cinco (5) mediciones parciales distribuidas en tiempos iguales, cada una de las cuales debe tener una posición orientada del micrófono, así: norte, sur, este, oeste y vertical hacia arriba. El resultado de la medición es obtenido mediante la siguiente expresión:

$$L_{Aeq} = 10 \text{Log} \left( \frac{1}{5} \left( 10^{L_N/10} + 10^{L_O/10} + 10^{L_S/10} + 10^{L_E/10} + 10^{L_V/10} \right) \right) \quad (1)$$

donde:

$L_{Aeq}$  = Nivel equivalente resultante de la medición.

$L_N$  = Nivel equivalente medido en la posición del micrófono orientada en sentido norte.

$L_O$  = Nivel equivalente medido en la posición del micrófono orientada en sentido oeste.

Luego de conocer el procedimiento de monitoreo se hace referencia a los datos suministrados, para lo cual es oportuno describir el tipo de información con que se contó para realizar el modelamiento de la variable.

En primera instancia, fueron facilitados 120 datos, resultado de los monitoreos en campo y de un posterior procesamiento que requieren las mediciones. Están divididos en dos grupos, de los cuales 35 pertenecen al grupo caracterizado como fuentes móviles y los 85 restantes pertenecen al grupo denominado fuentes fijas; es importante resaltar que para cada uno de ellos se obtuvo un valor tanto para el período diurno como para el período nocturno, sin variar su ubicación espacial, lo que implica llevar a cabo un análisis independiente de la variable para cada uno de los períodos mencionados y por consiguiente un mapa para cada período. Los períodos de medición (tabla 1) están contemplados así:

Tabla 1. Períodos de medición

| Diurno                        | Nocturno                      |
|-------------------------------|-------------------------------|
| De las 7:01 a las 21:00 horas | De las 21:01 a las 7:00 horas |

Fuente. Resolución 0627 de 2006, p.1.

Para el caso del grupo de datos denominado fuentes fijas cabe aclarar un aspecto acerca de la codificación de éstos, y es la sigla que acompaña al valor numérico (tabla 2), obedeciendo al tipo de actividad económica:

Tabla 2. Resumen de fuentes fijas por actividad económica

| Código actividad | Actividad       | Número de puntos |
|------------------|-----------------|------------------|
| C                | Comercial       | 5                |
| E                | Entretenimiento | 21               |
| I                | Industrial      | 32               |
| O                | Otros usos      | 11               |
| Q                | Quejas          | 16               |
|                  | <b>Total</b>    | <b>85</b>        |

Fuente: Autores

### 2.3 Georreferenciación de puntos de monitoreo

Una de las fases de validación de la información es la georreferenciación de los datos (figura 2). Sin embargo, aquí surgió un inconveniente, y es la dificultad de poder lograr la ubicación correcta de los puntos de monitoreo, ya que sólo se cuenta con la dirección de los cruces vehiculares para el caso de las fuentes móviles y la dirección predial en el caso de las fuentes fijas. El conflicto se presenta debido a que en la ciudad de Bogotá hay sectores con doble nomenclatura, producto de un proceso de actualización de ésta, por consiguiente se trató de dar el mayor grado de certeza a la georreferenciación de los puntos, para lo cual se tuvo en cuenta la dirección de cada fuente y el apoyo de ayudas informáticas y cartografía digital, situación que no se aplica al punto 33, perteneciente al grupo de fuentes móviles, ya que no fue posible su localización, claro está que puede tratarse de un error en la toma de datos en campo, pero en lo que respecta a este estudio se procedió a excluirlo de la lista de puntos y no fue tenido en cuenta para ningún análisis, ni para el procesamiento respectivo.

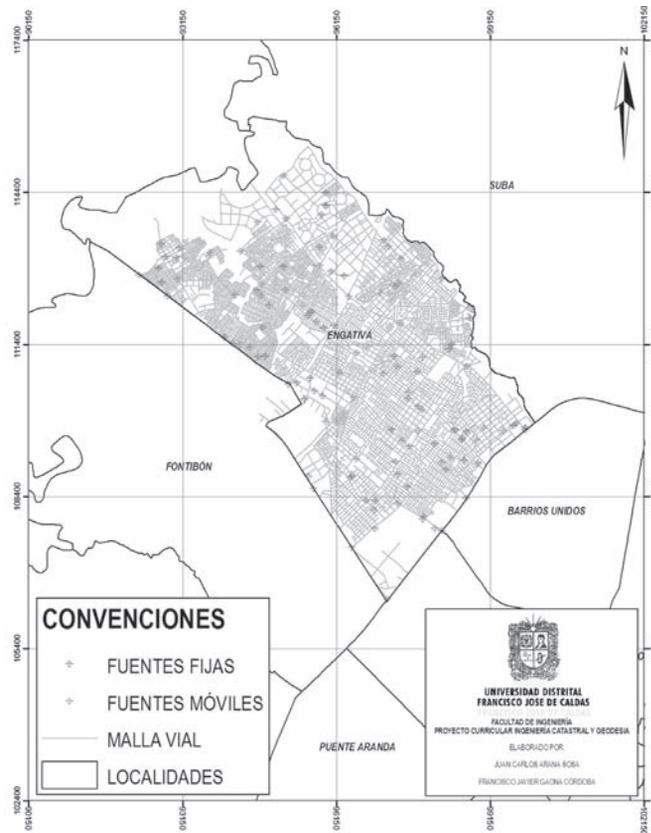


Figura 2. Localización de puntos de monitoreo

Fuente: Autores

## 2.4 Niveles máximos permisibles de ruido ambiental

A partir de los planos de los usos del suelo de las UPZ: 26 (Las Ferias), (29) Minuto de Dios, 30 (Boyacá Real), 31 (Santa Cecilia), 72 (Bolivia), 73 (Garcés Navas) y 105 (Jardín Botánico), aunque no son la totalidad de UPZ que conforman la localidad de Engativá, éstas se encuentran reglamentadas, mientras que las faltantes: 74 (Engativá) y 116 (Álamos) aún no han sido reglamentadas, por tal razón estas UPZ están cobijadas por el acuerdo 6 de 1990, esto último puede generar resultados que no se ajusten a la realidad: mientras que las UPZ reglamentadas se han ajustado a los parámetros definidos por el Plan de Ordenamiento Territorial, las que aún no están reglamentadas se puede decir que están descontextualizadas de la dinámica urbana. Sin embargo, esto no fue impedimento para realizar una delimitación de las áreas de actividad por UPZ de la localidad de Engativá (figuras 6 y 7), las cuales se citan a continuación: área integral urbana, comercio y servicios, dotacional, estructura ecológica principal, múltiple, residencial, residencial general, zona industrial.

Cabe anotar que los términos: residencial general, zona industrial, son propios del acuerdo 6 de 1990, los demás tienen continuidad en el decreto 619 de 2000 (Plan de Ordenamiento Territorial).

De acuerdo al área de actividad fue asociado un subsector de uso, el cual, a su vez, tiene asignado un valor de nivel sonoro máximo permisible; de esta forma se realizó la zonificación de la localidad según los usos de suelo.

De acuerdo al área de actividad fue asociado un subsector de uso, el cual, a su vez, tiene asignado un valor de nivel sonoro máximo permisible; de esta forma se realizó la zonificación de la localidad según los usos de suelo.

## 3. Análisis y discusión de resultados

### 3.1 Análisis exploratorio

El análisis de datos espaciales se diferencia del análisis de datos típico debido a la inclusión de infor-



mación espacial en el cálculo de modelos y predicciones. El análisis exploratorio nos proporciona métodos sencillos para detectar posibles problemas en el diseño y recogida de los datos, identificación de datos atípicos, además de evaluar si existe algún tipo de tendencia en los datos que puedan incurrir en minimizar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

El supuesto fundamental para la aplicación de las técnicas de interpolación geoestadística se basa en que los datos provienen de una distribución de probabilidad normal, ya que es considerado un método paramétrico. El análisis exploratorio es una herramienta de decisión para establecer si se garantiza el supuesto de normalidad, lo cual, sería muy útil para aumentar la exactitud en el modelamiento y predicción de la variable.

A efectos de los análisis posteriores se debe establecer la diferencia entre las variables  $Leq\ AT\ dB(A)$  día y  $Leq\ AT\ dB(A)$  noche, con el fin de ir en concordancia con la normatividad nacional (Resolución 0627 de 2006), la cual, establece generar un producto individual para cada uno de los periodos de medición.

Antes de mostrar los resultados es oportuno aclarar que en el momento de realizar el análisis exploratorio para los conjuntos de datos se detectó cierto grado de tendencia en los datos correspondientes al período diurno. En el gráfico de tendencia (figura 3) se interpretan los datos en dos direcciones sobre la extensión de la localidad, con respecto al eje X (dirección E – W) podemos ver unos niveles sonoros pronunciados en la zona central de la localidad; esto puede sugerir que sobre esa zona hay un mayor grado de conglomeración de actividades económicas y por ende un mayor flujo de tráfico vehicular; además se visualiza una disminución de los niveles sonoros hacia los costados oriental y occidental, debido a la presencia sobre el eje vial de la avenida 68 de áreas recreacionales y dotacionales al costado oriental, usos asociados a bajos niveles de emisión de ruido, mientras que en el costado occidental el comportamiento se debe a la presencia de una estructura ecológica principal. Con respecto al eje Y (dirección N-S) hay un comportamiento más homogéneo del ambiente sonoro respecto al eje.

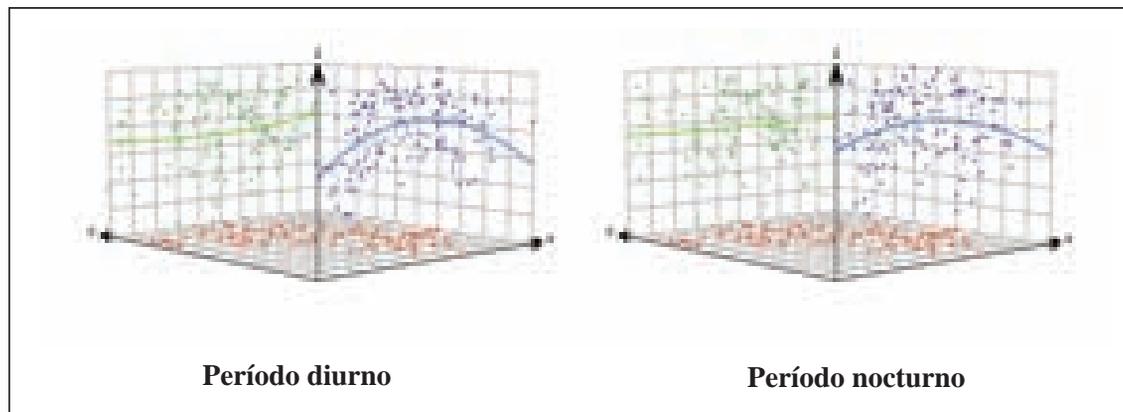


Figura 3. Gráfico de tendencia. Período diurno y nocturno  
Fuente: Autores

Debido al comportamiento de los datos correspondientes al período diurno, surgió la necesidad de aplicar un modelo de regresión de segundo orden.

$$Z = \beta_0 + \beta_1X + \beta_2Y + \beta_3XY + \beta_4X^2 + \beta_5Y^2$$

Mediante el uso de la función “stepAIC()” del paquete MASS en el programa R, se determinó

cuáles de estos términos son los más significativos y finalmente se estimó la función para modelar la tendencia presente en los datos para el período diurno.

$$Z = \beta_0 + \beta_1X + \beta_2Y + \beta_5Y^2$$



Los coeficientes de la función son los siguientes:

$$\beta_0 = -5,543e + 03$$

$$\beta_1 = -6,037e - 04$$

$$\beta_2 = 1,037e - 01$$

$$\beta_5 = -4,736e - 07$$

De acuerdo a lo anterior, el análisis estructural corresponde al procesamiento de los residuos obtenidos por medio del modelo de regresión de los datos del período diurno, los cuales no tienen tendencia.

A continuación se ofrecen los resultados de la distribución y estructura de los datos mediante la evaluación de las medidas de variabilidad y tendencia central; adicionalmente se muestran gráficas como el histograma y el gráfico de probabilidad, pero estas herramientas sólo ayudan a inferir el posible comportamiento de la variable, por lo que se hace necesario complementar el análisis con el apoyo de las pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov, y así, concluir si se cumple con el supuesto de normalidad.

### 3.1.1 Pruebas de normalidad.

Para evaluar si los datos provienen de una distribución de probabilidad normal se realizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov (tabla 3); este test compara la función de distribución teórica con la observada y calcula un valor de discrepancia, representado habitualmente como  $D$  (estadístico de prueba), que corresponde a la discrepancia máxima en valor absoluto entre la distribución observada y la distribución teórica.

Como primera medida se plantean las hipótesis:

$H_0$  = Los datos analizados siguen una distribución normal

$H_1$  = Los datos analizados no siguen una distribución normal

Tabla 3. Prueba de normalidad K-S

| Prueba de normalidad      |        |        |
|---------------------------|--------|--------|
| Kolmogorov – Smirnov      | Día    | Noche  |
| Estadístico de prueba $D$ | 0,0718 | 0,0857 |
| p-valor                   | 0,5712 | 0,3470 |

Fuente: Autores

El criterio para la toma de la decisión entre las dos hipótesis para la prueba Kolmogorov-Smirnov será de la forma:

Si  $D \leq D_\alpha \rightarrow$  Se acepta  $H_0$

Si  $D > D_\alpha \rightarrow$  Se rechaza  $H_0$

Donde  $D$  corresponde al valor teórico, siendo  $\alpha$  el nivel de significancia. Al comparar los estadísticos de prueba  $D$  observados (0,0718 y 0,0857) con el  $D_{0,05}$  teórico (0,1246) se observa que son menores y por lo tanto se acepta la hipótesis:

$H_0$  = Los datos analizados siguen una distribución normal

Otro modo alternativo de realizar la prueba de Kolmogorov-Smirnov que complementa la decisión anterior puede llevarse a cabo también mediante el empleo del p-valor asociado al estadístico de prueba  $D$  observado. De esta forma, para un nivel de significancia  $\alpha$ , la regla de decisión para este contraste es:

Si  $p - \text{valor} \geq \alpha \rightarrow$  Se acepta  $H_0$

Si  $p - \text{valor} < \alpha \rightarrow$  Se rechaza  $H_0$

Sabiendo que el nivel de significancia utilizado es de 0,05 al compararlo con los p-valor asociados (0,5712 y 0,3470) a  $D$ , se aprecia que son mayores y por lo tanto se acepta la hipótesis  $H_0$ .

Después de efectuar el análisis exploratorio de los datos y de aplicar el test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov, se puede concluir que los datos provienen de una distribución de probabilidad normal; en este sentido se descarta hacer algún tipo de transformación a los datos para garantizar el supuesto de normalidad, y por lo tanto, para el análisis estructural se usarán los residuos obtenidos de la regresión de los datos del período diurno y los datos originales del período nocturno.

### 3.2 Análisis estructural

El análisis estructural representa una de las etapas más importantes en el proceso geoestadístico, ya que es en esta etapa donde se pretende entender



el comportamiento del fenómeno acústico con la variación de la distancia. Se trata de estimar un modelo teórico que refleje el comportamiento de la correlación espacial de la variable a partir del gráfico de semivarianzas, llamado semivariograma experimental o variograma muestral.

### 3.2.1 Semivariogramas experimentales.

Los semivariogramas están representados por semivarianzas calculadas mediante un estimador a partir de las diferentes distancias que existen entre los puntos monitoreados y el valor de los niveles sonoros medidos. Es evidente que el número de valores

de semivarianza dependen del número de observaciones con el que se cuente. Para este caso se usó el estimador clásico de Matheron para generar el semivariograma donde se observa una gran cantidad de puntos distribuidos en una nube (figura 4), lo cual se denomina semivariograma experimental de la variable. La nube de puntos del semivariograma permite examinar la autocorrelación espacial, cada punto representa un par de localizaciones, las distancias más lejanas o con valores extremos de la variable describen valores altos en el semivariograma y es un indicio de la relación entre los valores de la variable y su comportamiento espacial.

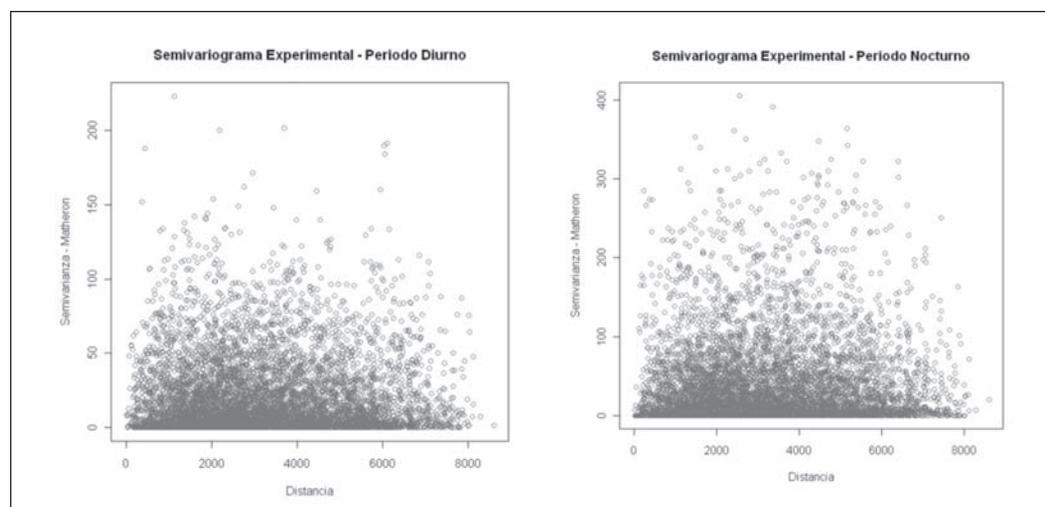


Figura 4. Semivariograma de nube experimental. Período diurno y nocturno

Fuente: Autores

Al revisar la nube de puntos es muy difícil determinar a simple vista si un modelo teórico se ajusta al comportamiento espacial del semivariograma experimental, por lo tanto lo más aconsejable es definir un tamaño de rezago y una distancia máxima para el semivariograma, para que así sea mucho más fácil observar qué tipo de comportamiento tiene un modelo.

Sin embargo, determinar el tamaño del rezago no es una decisión que se deba dejar al azar sin tener ningún tipo de criterio previo; la mejor opción que tiene el investigador es tratar de utilizar la mayor cantidad de puntos (*bins*) posibles sin dejar de lado el respaldo visual que brinda la gráfica

cuando se despliega el variograma experimental junto con los modelos teóricos. Otro criterio de decisión es comparar los errores generados por los modelos teóricos a partir del ajuste realizado a varios tamaños de rezago propuestos. Además, para definir la distancia máxima del semivariograma lo más aconsejable es usar una longitud no superior a la mitad de la mayor distancia de separación entre dos puntos de la muestra; siguiendo dicho criterio, esta longitud no debe superar los 4.000 metros.

Para el caso práctico del estudio se definió un tamaño de rezago de 100 metros y una distancia máxima del semivariograma de 1000 metros (figura 5); un rezago mayor, por ejemplo, de 500 me-



tros, reduce la cantidad de puntos (*bins*) utilizados para el ajuste y ocasiona el aumento del valor de la pepita, que en la mayoría de casos supera el valor

de la meseta, lo cual produce que el modelo no sea confiable.

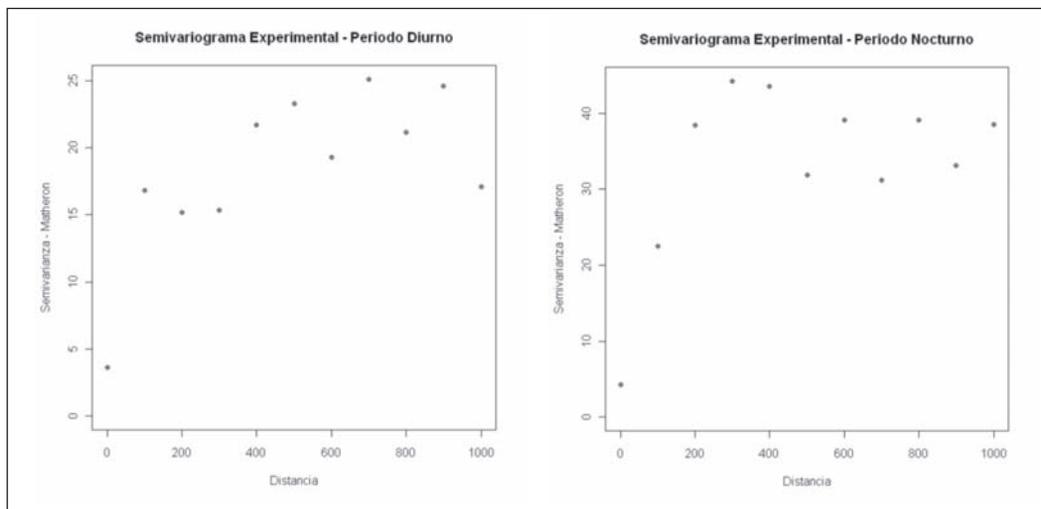


Figura 5. Semivariograma experimental. Período diurno y nocturno

Fuente: Autores

Antes de continuar con el análisis estructural, previo al ajuste de un modelo teórico al semivariograma muestral, lo más conveniente es evaluar la posibilidad de detectar anisotropía en los datos.

el semivariograma experimental en diferentes direcciones, como puede observarse en la figura 6, no existen grandes diferencias entre los rangos y las mesetas de los semivariogramas en una u otra dirección, de modo que no parece existir anisotropía en los datos de la variable estudiada. Por consiguiente, se considerará que el fenómeno es isotrópico y que depende de la distancia de separación entre los puntos y no de la dirección del vector que los separa.

### 3.2.2 Anisotropía

Para valorar si existe anisotropía en los datos lo más conveniente es realizar un gráfico donde se calcule

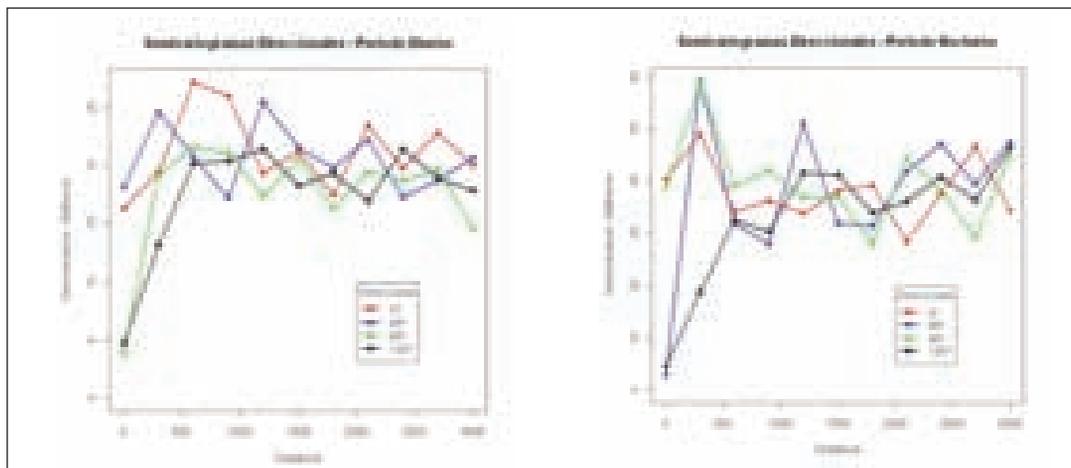


Figura 6. Análisis de anisotropía. Períodos diurno y nocturno. Fuente: Autores



Luego de haber considerado la no existencia de anisotropía y haber definido el tamaño del rezago, además de la distancia máxima del semivariograma, es oportuno evaluar diferentes tipos de semivariogramas teóricos.

### 3.2.3 Modelos teóricos de semivarianza

Para la valoración de los modelos teóricos, tanto para el período diurno como para el período nocturno, se utilizaron tres tipos de modelos: exponencial, esférico y gaussiano; la elección de uno u otro modelo no se ha de tomar de manera arbitraria, sino que se debe apelar al que mejor se ajuste al semivariograma muestral. Los modelos citados son los más usados para realizar el pronóstico de valores en puntos no muestreados. En la estimación de los modelos es necesario definir los parámetros iniciales para cada uno de ellos, estos parámetros consisten en estimar visualmente el valor de la meseta, el rango y la pepita (tabla 4).

Luego de contar con los parámetros iniciales de los modelos se procede a evaluar cada uno de ellos con el fin de obtener los valores de los parámetros finales de cada modelo, claro está que esto depende del método de ajuste que se utilice.

### 3.2.4 Métodos de ajuste

Para el ajuste de los modelos se utilizaron cinco métodos: mínimos cuadrados ordinarios (*OLS*), mínimos cuadrados ponderados (*WLS*), mínimos cuadrados generalizados (*GLS*), máxima verosimilitud (*ML*) y máxima verosimilitud restringida (*REML*). Cada método arroja un estadístico o criterio de decisión, los ajustes por mínimos cuadrados, la suma mínima de cuadrados y los ajustes por máxima verosimilitud, AIC (tablas 5 y 6), que sirven como criterio de decisión; no obstante, la validación cruzada es el procedimiento correcto y definitivo para la selección del modelo más adecuado.

Tabla 4. Parámetros de los modelos teóricos valorados. Períodos diurno y nocturno

| PERIODO DIURNO |        |        |       |
|----------------|--------|--------|-------|
| Modelo         | Pepita | Meseta | Rango |
| Exponencial    | 4      | 18     | 160   |
| Esférico       | 4      | 18     | 400   |
| Gaussiano      | 4      | 18     | 200   |

| PERIODO NOCTURNO |        |        |       |
|------------------|--------|--------|-------|
| Modelo           | Pepita | Meseta | Rango |
| Exponencial      | 5      | 30     | 100   |
| Esférico         | 5      | 30     | 250   |
| Gaussiano        | 5      | 30     | 100   |

Fuente: Autores



Tabla 5. Parámetros finales de los modelos teóricos. Período diurno

| PERÍODO DIURNO                                     |                        |         |          |                           |
|--|------------------------|---------|----------|---------------------------|
| Modelo   | Parámetros Fin. Modelo |         |          | $\Sigma$ Mínima Cuadrados |
|  | Pepita                 | Meseta  | Rango    |                           |
| MÉTODO DE AJUSTE: MÍNIMOS CUADRADOS ORDINARIOS     |                        |         |          |                           |
| Exponencial  | 4,6414                 | 16,9474 | 147,0793 | 89,9772                   |
| Esférico   | 6,8397                 | 14,8696 | 499,4594 | 102,8749                  |
| Gaussiano  | 8,2435                 | 13,345  | 233,8464 | 126,3409                  |
| MÉTODO DE AJUSTE: MÍNIMOS CUADRADOS PONDERADOS     |                        |         |          |                           |
| Exponencial  | 5,5049                 | 16,8019 | 194,0203 | 4221,346                  |
| Esférico   | 8,0737                 | 13,8592 | 547,8529 | 4035,112                  |
| Gaussiano  | 10,9144                | 11,1503 | 294,7022 | 4186,577                  |
| MÉTODO DE AJUSTE: MÍNIMOS CUADRADOS GENERALIZADOS  |                        |         |          |                           |
| Exponencial  | 4,0433                 | 18,2535 | 153,3799 | 10,5133                   |
| Esférico   | 10,3198                | 11,9657 | 594,9824 | 11,097                    |
| Gaussiano  | 13,1897                | 9,3437  | 340,5147 | 11,1927*                  |
| Modelo   | Parámetros Fin. Modelo |         |          | AIC                       |
|  | Pepita                 | Meseta  | Rango    |                           |
| MÉTODO DE AJUSTE: MÁXIMA VEROSIMILITUD             |                        |         |          |                           |
| Exponencial  | 0,9382                 | 19,0419 | 89,2301  | 697,0391                  |
| Esférico   | 7,5523                 | 12,4918 | 400,0062 | 697,1838                  |
| Gaussiano  | 11,2117                | 8,6772  | 212,8109 | 697,7498*                 |
| MÉTODO DE AJUSTE: MÁXIMA VEROSIMILITUD RESTRINGIDA |                        |         |          |                           |
| Exponencial  | 1,128                  | 19,0731 | 94,1399  | 692,0256                  |
| Esférico   | 7,9188                 | 12,3428 | 427,3421 | 692,0918                  |
| Gaussiano  | 11,1153                | 8,9991  | 216,8549 | 692,7015*                 |

Fuente: Autores

Al comparar los modelos para el período diurno (tabla 5) se observa que el ajuste por *GLS* del modelo exponencial al parecer tiene el mejor ajuste entre los métodos de mínimos cuadrados, mientras que el modelo exponencial ajustado por el método de *REML* es el que brinda el mejor ajuste, ya que muestra el menor valor de AIC. Sin embargo,

como se mencionó, sólo la validación cruzada puede corroborar si estas apreciaciones son correctas. En la tabla 5 se observa que el modelo gaussiano ajustado con los métodos de *GLS*, *ML* y *REML* tiene un valor de pepita mayor que el de la meseta, por lo tanto, no fueron tenidos en cuenta para la validación cruzada.



Tabla 6. Parámetros finales de los modelos teóricos. Período nocturno

| PERÍODO NOCTURNO  |                        |         |          |                           |
|---|------------------------|---------|----------|---------------------------|
| Modelo  | Parámetros Fin. Modelo |         |          | $\Sigma$ Mínima Cuadrados |
|   | Pepita                 | Meseta  | Rango    |                           |
| <b>MÉTODO DE AJUSTE: MÍNIMOS CUADRADOS ORDINARIOS</b>     |                        |         |          |                           |
| Exponencial   | 3,3638                 | 34,3881 | 83,7703  | 233,9233                  |
| Esférico  | 3,7275                 | 33,9966 | 237,8338 | 185,1277                  |
| Gaussiano   | 4,0025                 | 33,7684 | 109,1582 | 183,4195                  |
| <b>MÉTODO DE AJUSTE: MÍNIMOS CUADRADOS PONDERADOS</b>     |                        |         |          |                           |
| Exponencial   | 1,85                   | 35,4312 | 64,2475  | 11415,83                  |
| Esférico  | 2,397                  | 34,8848 | 219,4393 | 10338,21                  |
| Gaussiano   | 3,0773                 | 34,2407 | 102,8979 | 10357,34                  |
| <b>MÉTODO DE AJUSTE: MÍNIMOS CUADRADOS GENERALIZADOS</b>  |                        |         |          |                           |
| Exponencial   | 4,1869                 | 33,6407 | 67,8625  | 8,4666                    |
| Esférico  | 4,1809                 | 33,6329 | 235,4888 | 7,4063                    |
| Gaussiano   | 4,2031                 | 33,6465 | 108,9156 | 7,3643                    |
| Modelo  | Parámetros Fin. Modelo |         |          | AIC                       |
|   | Pepita                 | Meseta  | Rango    |                           |
| <b>MÉTODO DE AJUSTE: MÁXIMA VEROSIMILITUD</b>             |                        |         |          |                           |
| Exponencial   | 0                      | 39,01   | 124,59   | 772,18                    |
| Esférico  | 0                      | 39,09   | 286,86   | 771,156                   |
| Gaussiano   | 1,467                  | 37,895  | 115,281  | 770,3688                  |
| <b>MÉTODO DE AJUSTE: MÁXIMA VEROSIMILITUD RESTRINGIDA</b> |                        |         |          |                           |
| Exponencial   | 0                      | 39,51   | 129,15   | 766,3696                  |
| Esférico  | 0                      | 39,51   | 291,34   | 765,4795                  |
| Gaussiano   | 1,512                  | 38,245  | 116,889  | 764,7217                  |

Fuente: Autores

Al comparar los modelos para el período nocturno (tabla 5) entre los diferentes modelos el gaussiano ajustado por *GLS* al parecer tiene el mejor ajuste entre los métodos de mínimos cuadrados, ya que presenta la suma mínima de cuadrados, y entre los métodos de criterio de AIC el modelo

gaussiano ajustado por el método de *REML* es el que brinda el mejor ajuste puesto que muestra el menor valor de criterio. Sin embargo, como ya se mencionó, sólo la validación cruzada es el procedimiento que puede corroborar si estas apreciaciones son correctas.

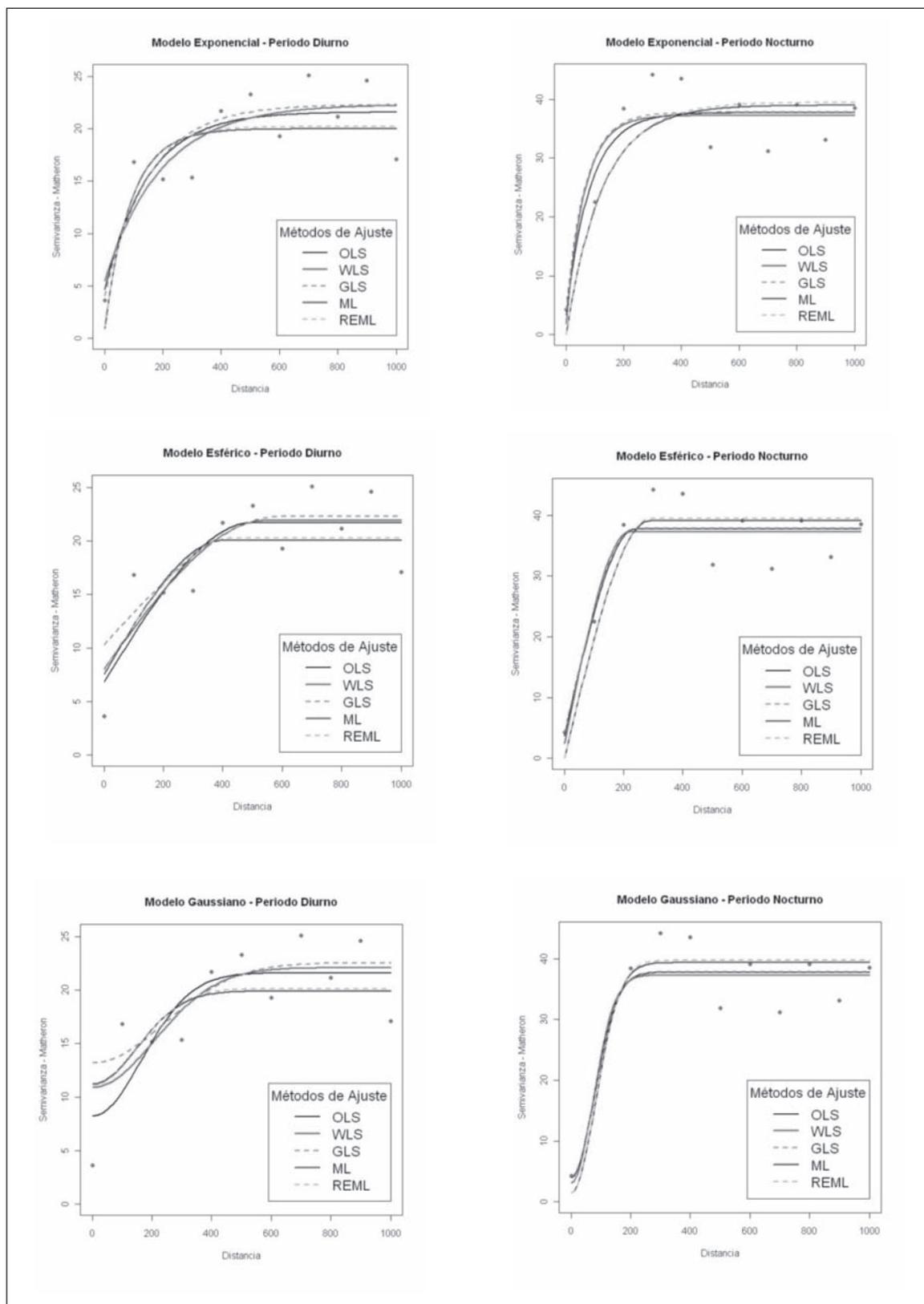


Figura 7. Modelos y métodos de ajuste. Períodos diurno y nocturno

Fuente: Autores



3.2.5 Validación cruzada.

Por medio de la validación cruzada se determina cuál de los modelos teóricos de semivarianza valorados presenta el mejor ajuste con el cálculo y evaluación de los estadísticos: *MPE* (*Mean Prediction Errors*) *MSPE* (*Mean Standardized Prediction Errors*) y *RMSSPE* (*root mean square standardized prediction errors*) que serán usados como criterio de decisión. Cada estadístico tiene un valor óptimo, los cuales están determinados así:  $MPE=0$ ,  $MSPE=0$  y  $RMSSPE=1$ ; para la selección del mejor modelo se calcula la distancia entre los resultados obtenidos y los valores óptimos mediante la ecuación (28); esta distancia (tablas 7 y 8) hace uso de los tres estadísticos simultáneamente, que para el caso ideal debería ser cero, y por lo tanto se escoge aquel modelo que presente el valor más cercano a cero.

$$(4) \text{ Distancia} = \sqrt{(MPE-0)^2 + (MSPE-0)^2 + (RMSSPE-1)^2}$$

Para la aplicación del procedimiento de validación cruzada en el período diurno se utilizó el método de *kriging* ordinario usando como variable los residuos resultantes de la regresión calculada para remover la tendencia presente en los datos y los modelos teóricos seleccionados por los diferentes métodos de ajuste. Para el periodo nocturno se usó el método de *kriging* ordinario aplicado directamente a la variable original; en ambos casos se emplearon para la interpolación los 15 vecinos más cercanos (*neighbors*). Adicionalmente, se evaluó el método determinístico de interpolación de distancia inversa ponderada (*inverse distance weighting*) IDW, aunque este método sólo nos brinda el estadístico *MPE* (*Mean Prediction Errors*) como criterio de comparación (tablas 7 y 8). Para la aplicación de este método se usaron los 15 vecinos más cercanos (*neighbors*).

Tabla 7. Resultados de la validación cruzada. Período diurno

| PERIODO DIURNO |                  |         |         |         |           |
|----------------|------------------|---------|---------|---------|-----------|
| MODELO TEÓRICO | MÉTODO DE AJUSTE | MPE     | MSPE    | RMSSPE  | DISTANCIA |
| EXPONENCIAL    | OLS              | 0,13621 | 0,03109 | 0,99749 | 0,13974   |
|                | WLS              | 0,13792 | 0,02942 | 1,01283 | 0,14161   |
|                | GLS              | 0,13396 | 0,02998 | 0,98342 | 0,13827   |
|                | ML               | 0,12713 | 0,03268 | 1,04642 | 0,13923   |
|                | REML             | 0,12683 | 0,03231 | 1,03908 | 0,13659   |
| ESFÉRICO       | OLS              | 0,15303 | 0,03285 | 1,03057 | 0,15947   |
|                | WLS              | 0,15630 | 0,03263 | 1,02226 | 0,16121   |
|                | GLS              | 0,16010 | 0,03273 | 0,98726 | 0,16391   |
|                | ML               | 0,15083 | 0,03534 | 1,04796 | 0,16217   |
|                | REML             | 0,15308 | 0,03516 | 1,04039 | 0,16218   |
| GAUSSIANO      | OLS              | 0,15499 | 0,03336 | 1,05093 | 0,16652   |
|                | WLS              | 0,16638 | 0,03340 | 1,02666 | 0,17178   |
| IDW            | N.A              | 0,00746 | N.A     | N.A     | 0,00746   |

Fuente: Autores

Tabla 8. Resultados de la validación cruzada. Período nocturno

| PERÍODO NOCTURNO |                  |          |          |         |           |
|------------------|------------------|----------|----------|---------|-----------|
| MODELO TEÓRICO   | MÉTODO DE AJUSTE | MPE      | MSPE     | RMSSPE  | DISTANCIA |
| EXPONENCIAL      | OLS              | -0,07353 | 0,00183  | 0,86461 | 0,15408   |
|                  | WLS              | -0,03438 | 0,00667  | 0,86858 | 0,13601   |
|                  | GLS              | -0,02662 | 0,00735  | 0,85793 | 0,14473   |
|                  | ML               | -0,18206 | -0,01249 | 0,90077 | 0,20772   |
|                  | REML             | -0,18788 | -0,01334 | 0,89883 | 0,21380   |
| ESFÉRICO         | OLS              | -0,12175 | -0,00281 | 0,86707 | 0,18028   |
|                  | WLS              | -0,12204 | -0,00285 | 0,87450 | 0,17508   |
|                  | GLS              | -0,11462 | -0,00193 | 0,86359 | 0,17818   |
|                  | ML               | -0,20956 | -0,01471 | 0,88206 | 0,24092   |
|                  | REML             | -0,21337 | -0,01521 | 0,87670 | 0,24690   |
| GAUSSIANO        | OLS              | -0,18172 | -0,01080 | 0,87505 | 0,22080   |
|                  | WLS              | -0,18247 | -0,01114 | 0,88461 | 0,21618   |
|                  | GLS              | -0,17847 | -0,01031 | 0,87162 | 0,22009   |
|                  | ML               | -0,23120 | -0,01871 | 0,88400 | 0,25934   |
|                  | REML             | -0,23358 | -0,01900 | 0,87827 | 0,26408   |
| IDW              | N.A              | 0,28740  | N.A      | N.A     | 0,28740   |

Fuente: Autores

Luego de obtener los resultados de la validación cruzada y determinar cuál de ellos presenta la menor distancia al error se puede concluir que los modelos exponenciales en general ofrecen los mejores ajustes. Por otro lado, según los estadísticos *MPE* el método determinístico de IDW parece tener un buen comportamiento para el período diurno, contrariamente al período nocturno, que

no parece ser la mejor opción; de todas formas estos métodos no fueron tenidos en cuenta para generar los pronósticos.

A continuación se presentan los modelos teóricos óptimos finales escogidos para cada periodo de medición (tabla 9 y figura 8) con el fin de pronosticar los valores de los niveles sonoros en las áreas no muestreadas.

Tabla 9. Modelos teóricos finales. Períodos diurno y nocturno

| PERIODO DIURNO         |        |         |         | PERIODO NOCTURNO      |        |         |         |
|------------------------|--------|---------|---------|-----------------------|--------|---------|---------|
| Método de ajuste: REML |        |         |         | Método de ajuste: WLS |        |         |         |
| Modelo                 | Pepita | Meseta  | Rango   | Modelo                | Pepita | Meseta  | Rango   |
| Exponencial            | 1,1280 | 19,0731 | 94,1399 | Exponencial           | 1,8500 | 35,4312 | 64,2475 |

Fuente: Autores

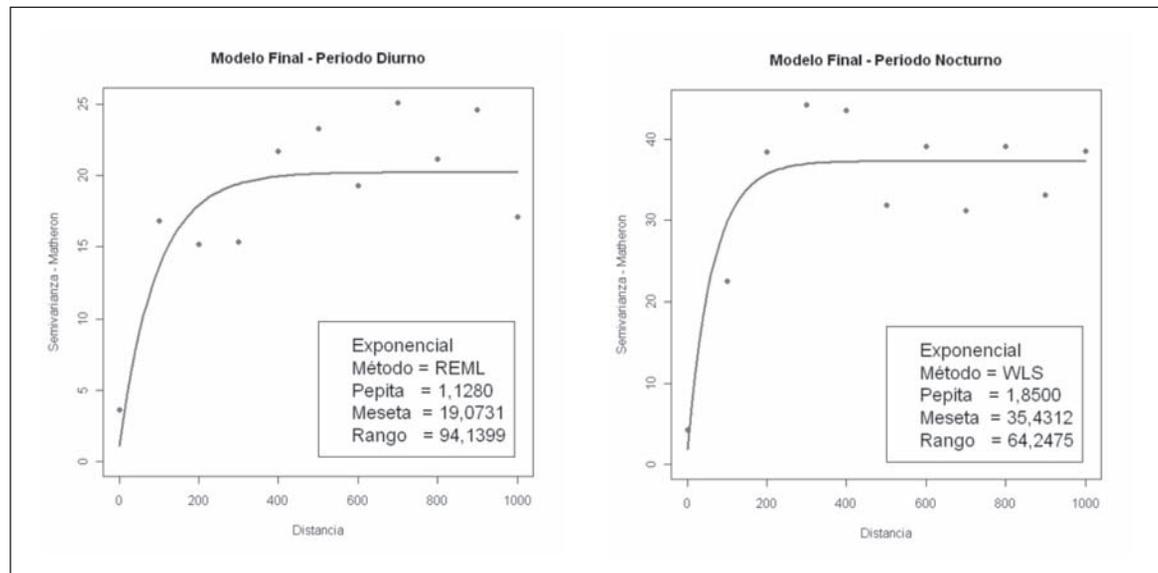


Figura 8. Modelo teórico final. Períodos diurno y nocturno

Fuente: Autores

Para generar el mapa de ruido en el período diurno se usó el método de *kriging* universal debido a la tendencia encontrada en los datos y para el mapa de ruido en el período nocturno se usó el método de *kriging* ordinario. En ambos casos se usaron para la interpolación a los 15 vecinos más cercanos (*neighbors*).

### 3.2.6 Modelo de contaminación sonora. Período diurno

Nótese (figura 9) que hacia la parte noroccidental de la localidad se observa un comportamiento atípico; esto se debe a que en esta zona se realizaron pocos puntos de monitoreo, se trata de una estructura ecológica principal, de un sector asociado con usos recreacionales y de descanso, como parques y reservas naturales, donde los niveles sonoros máximos permisibles son muy restrictivos, por ende no es confiable el resultado de la interpolación para esta zona de la localidad. Cabe mencionar que dicho comportamiento se presenta en la parte occidental de la localidad donde no se puede describir de mejor forma el comportamiento del ruido por los pocos puntos de monitoreo localizados hacia esta zona de la localidad. Hay que resaltar que tal comportamiento es replicable a la zona suroccidental, por las mismas razones.

Es marcado el aporte sonoro que se aprecia sobre los principales trayectos viales de la localidad, y más aún, sobre los cruces entre éstos. Se aprecian niveles sonoros altos en sectores localizados de las UPZ de Álamos y Las Ferias, lo cual se puede interpretar por la presencia de áreas destinadas a usos industriales y comerciales, respectivamente. En contraste se aprecian sectores con bajos niveles sonoros, el primero al costado norte de las UPZ de Bolivia y Minuto de Dios, siendo posible que se deba a la presencia del humedal Juan Amarillo, zona asociada a sectores protegidos de la ciudad, donde hay restricciones a desarrollos urbanísticos. El segundo, al costado oriental de la UPZ Las Ferias, un área de grandes espacios deportivos y recreativos, asociado a zonas de tranquilidad, donde prácticamente habría un aporte del tráfico vehicular proveniente de la avenida del Congreso Eucarístico (AK 68).

Se visualizan zonas donde prácticamente no se sobrepasan los niveles sonoros máximos permisibles de ruido ambiental, más específicamente, casi en la totalidad de las UPZ de Álamos, Garcés Navas y Bolivia, y gran parte de las UPZ de Engativá y Las Ferias. Hay que anotar que las UPZ de Álamos y Engativá no han sido reglamentadas a la fecha, por lo cual se asociaron delimitaciones

de áreas de actividad trazadas según el acuerdo 6 de 1990; gran parte de estas áreas están destinadas a usos industriales, por lo que allí se toleran niveles sonoros altos. Así, de acuerdo al resultado de la predicción, estas regiones del área de estudio no presentan criticidad en cuanto el ambiente sonoro.

Otras zonas en las que no se presenta conflicto con los niveles sonoros máximos permisibles son aquellas franjas que limitan sobre vías principales, donde se delimitan áreas de comercio y servicios, tales como zonas localizadas aledañas a: la avenida Chile (AC 72), la autopista Medellín (AC 80), la avenida de la Constitución (AK 70) y avenida del Congreso Eucarístico (AK 68).

Existen zonas localizadas donde se sobrepasan los niveles sonoros (más de 5 dB (A)), como son: parte de la UPZ Las Ferias y Engativá; se aprecian tonos de rojo, estas tonalidades se presentan

por el desarrollo de actividades comerciales, que comprenden desde establecimientos de entretenimiento (bares, discotecas), comercios al por mayor y al detal, cadenas de almacenes, y por el alto flujo vehicular, a pesar de que son sectores influenciados por vías intermedias (no más de dos carriles por sentido); lo más probable es que se presente congestión vehicular. Se aprecian zonas que se consideran de nivel moderado, donde se acentúan niveles que oscilan entre 0 y 5 dB (A).

Finalmente, habría que apoyar con una o dos mediciones las regiones suroriental, noroccidental y suroccidental de la localidad donde se ubica el Jardín Botánico, una de estructura ecológica principal, centros de recreación y prácticas deportivas, que, a pesar de estar influenciadas por vías principales, no deben reflejar niveles de contaminación sonora tan altos.

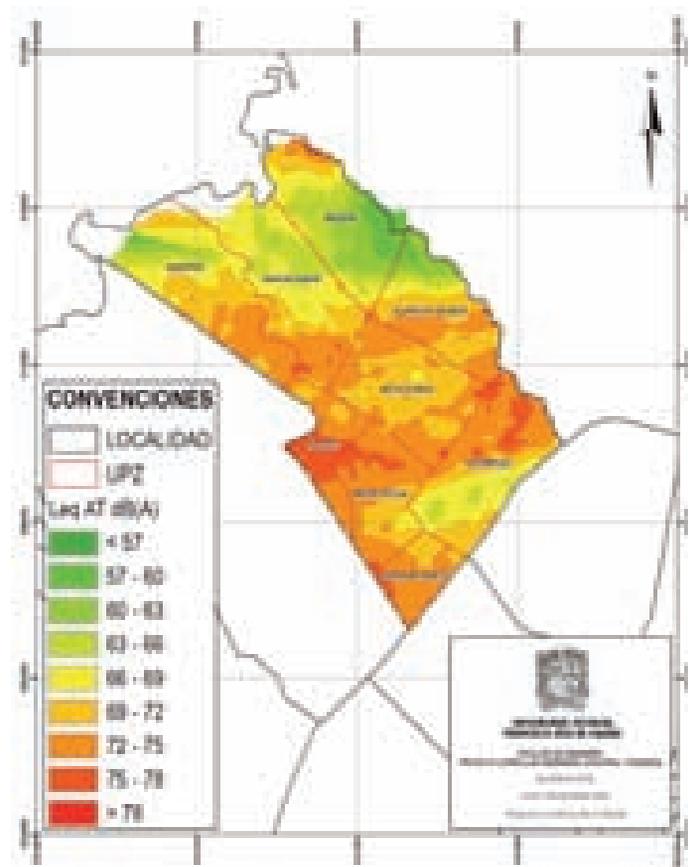


Figura 9. Mapa de ruido obtenido para el período diurno. Fuente: Autores

3.2.7 Modelos de contaminación sonora, período nocturno

En el período nocturno prácticamente se ve (figura 10) un comportamiento más homogéneo y no tan localizado como lo observado en el mapa del período diurno. Sin embargo, hay que recalcar el aporte que sigue dando la malla vial principal de la localidad, sobre todo concentrada en la región central de la localidad.

Se aprecian zonas de altos niveles sonoros sobre las UPZ Álamos, Santa Cecilia y Engativá, a partir de las cuales se va atenuando el fenómeno hacia las UPZ circundantes. Entre las UPZ que figuran con menores niveles sonoros son: Bolivia, Garcés Navas y Las Ferias; en las dos primeras se puede interpretar el comportamiento del fenómeno por

tratarse de zonas con un uso predominante que es el residencial, mientras que la UPZ Las Ferias, por tratarse de una zona en gran parte comercial, en horas de la noche la actividad cesa, por lo cual el aporte al ambiente sonoro es más marcado en el período diurno.

En cuanto al grado de impacto de los niveles de contaminación en el período nocturno, se aprecia que prácticamente las únicas zonas que cumplen los estándares de la norma son la UPZ Álamos y parte de Engativá; allí, como se mencionó, se comparan los resultados con niveles sonoros asociados a sectores industriales, por lo que el impacto es nulo o leve, lo que no ocurre con el resto de UPZ de la localidad que comparten niveles de contaminación de moderado a crítico; esto se debe a que

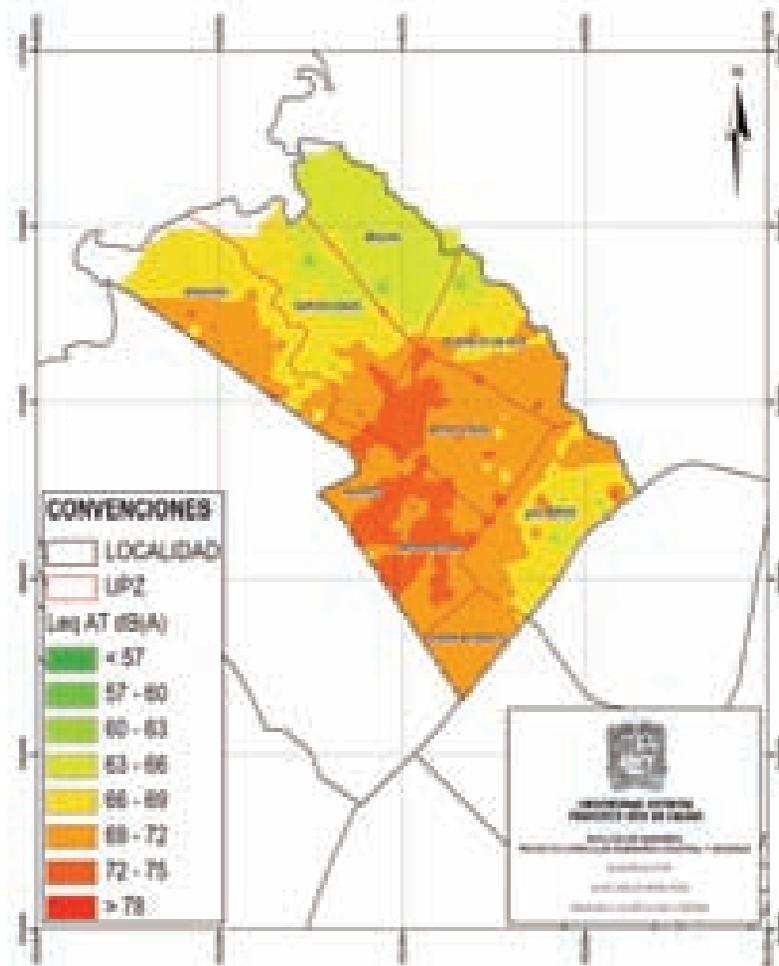


Figura 10. Mapa de ruido obtenido para el período nocturno. Fuente: Autores



para el período nocturno los estándares son más restrictivos, lo que parece indicar que los datos están reflejando ser semejantes a los obtenidos para el período diurno; esto nos llevó a deducir que tal vez los horarios de toma de mediciones podrían estar entre las 9 p.m. – 1 a.m. y 5 a.m. – 7 a.m. Lo anterior no quiere decir que se haya incurrido en errores en la toma de observaciones, porque esos rangos de tiempo están contemplados dentro de la franja horaria para mediciones del período nocturno.

#### 4. Conclusiones

El presente trabajo ha puesto en evidencia el ambiente sonoro al que está expuesta la población, nada favorable tanto para el período diurno como para el período nocturno sobre zonas de actividad comercial e industrial, e inclusive sobre zonas residenciales.

Las particularidades del ruido en cuanto a su variabilidad espacio-temporal y a la dinámica de las actividades humanas, reclaman unas mejoras en cuanto a: una mayor densidad de puntos de monitoreo a una periodicidad de medición, es decir, que los monitoreos sobre las mismos puntos se hagan con más frecuencia, y una política ambiental más agresiva. Lo anterior debe ir encaminado a la aplicabilidad de métodos de interpolación geoestadística justificados por el tema de costos y una razonable calidad de los datos estimados.

La elaboración de mapas de ruido en áreas urbanas empleando técnicas geoestadísticas, a partir

de un conjunto de puntos reducido, presenta algún tipo de dificultad en cuanto a la caracterización de fuentes de ruido y a la variabilidad de agentes que aportan a las emisiones sonoras. Sin embargo, contar con información catastral relacionada con: áreas de actividad, sectores de uso, tipos de vías, destino económico, entre otros, disponible en los planes de ordenamiento territorial, permiten identificar los posibles focos de afectación por ruido y de esta forma poder detectar zonas de conflicto y definir posibles falencias en la delimitación de áreas de actividad y sectores de uso.

El no contar con una densidad de puntos de monitoreo ideal a lo largo de la localidad ocasiona dificultades al momento de emplear las técnicas geoestadísticas y por ende en la elaboración de los mapas de ruido. Además en algunos lugares la variabilidad espacial del ruido es notoria debido a que no se cuenta con el cubrimiento de puntos muestrales para dar confiabilidad en la predicción de estos lugares.

A partir de este tipo de trabajos se muestra cómo la geoestadística constituye una herramienta interesante en el estudio de la distribución espacial del ruido, lo cual, puede ser un punto de partida a la hora de tomar decisiones relacionadas con la conservación del medio ambiente. De la misma manera, hay que resaltar las ventajas del método de interpolación *kriging* con respecto a otros métodos de interpolación; mediante estos procedimientos geoestadísticos se puede estimar la bondad del ajuste en toda área de estudio.

#### Bibliografía

- Abellán, Carlos Andrés y López Quílez, Antonio. “Mapas acústicos en zonas urbanas mediante predicción estadística”. En: 37 Congreso Nacional de Acústica, Memorias. Gandía, España, 2006.
- Alcaldía Mayor de Bogotá. “Monografía localidad de Engativá. Versión preliminar para revisión”.

Departamento Administrativo de Planeación Distrital, Subdirección de Desarrollo Social, Gerencia de Desarrollo Humano y Progreso Social.

\_\_\_\_\_. “Recorriendo Engativá: diagnóstico físico y socioeconómico de las localidades de Bogotá D. C.” Secretaría de Hacienda Distrital, Departamento Administrativo de Planeación Distrital, 2004.



- Bañuelos Irusta, Alberto y García Pérez, Igone. "Estrategia de elaboración de un mapa de ruido. El caso de Vitoria-Gasteiz. La ejecución material." En: *Congreso sobre ruido urbano*. Memorias. (9-11 de marzo). Vitoria-Gasteiz, España, 2005.
- \_\_\_\_\_. "Mapas de ruido como herramientas para el planeamiento de ciudades." En: 43.50.-x. Ruido: sus efectos y control. 43.50. Rq.009. En: *Forum Acusticum*. Memorias. (septiembre). Sevilla, España, 2002.
- Cañada Torrecilla, María Rosa. "Aplicación de la geoestadística al estudio de la variabilidad espacial del ozono en los veranos de la comunidad de Madrid." En: *El clima entre el mar y la montaña*. Santander, Asociación Española de Climatología, Serie A, num. 4, 2004.
- Castro Castro, Carlos Arturo y Tafur Jiménez, Luis Alberto. "Modelamiento del ruido ambiental con el apoyo de herramientas de sistemas de información geográfico." En: *VI Congreso Iberoamericano de Acústica*. Memorias. (5-7 de noviembre), Buenos Aires, Argentina, 2008.
- Chasco Yrigoyen, Coro. "Métodos gráficos del análisis exploratorio de datos espaciales". Instituto L. R. Klein, Departamento de Economía Aplicada, Universidad Autónoma de Madrid. Disponible en: (<http://www.asepelt.org/ficheros/File/Anales/2003%20-20Almeria/asepeltPDF/93.PDF>).
- Colombia, Presidencia de la República. Decreto 948 (5 de junio). "Decreta el reglamento de protección y control de la calidad de aire". En: *Diario Oficial*. num. 41876. Bogotá, 1995.
- Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 0627 (7 de abril). "Por la cual se establece la norma nacional de emisión de ruido ambiental". En: *Diario Oficial*, num. 46239. Bogotá, 2006.
- Colombia, Ministerio de Salud. Resolución 8321 (4 de agosto). "Por la cual se dictan normas sobre la protección y conservación de la audición de la salud y el bienestar de las personas, por causa de la producción y emisión de ruidos". En: *Diario Oficial*. Bogotá, 1983.
- Contraloría de Bogotá. "Estado de los recursos naturales y del medio ambiente en Bogotá D.C., un panorama gris". Bogotá, 2006. Disponible en: (<http://www.andi.com.co/Dependencias/Ambiental/BIBLIOTECA/NORMATIVIDAD/ENTES%20DE%20CONTROL/INFORME%20CONTRALORIA%20RECURSOS%20NATURALES.pdf>).
- Cueto Ancela, José Luis. "Guía para la realización de mapas estratégicos de ruido y planes de acción". Laboratorio de Ingeniería Acústica de La Universidad de Cádiz. Disponible en: ([http://www.uhu.es/master/tga/descargas/materiales/6/guia\\_gestion\\_ruido.pdf](http://www.uhu.es/master/tga/descargas/materiales/6/guia_gestion_ruido.pdf)).
- Díaz Viera, Martín A. "Geoestadística aplicada". Instituto de Geofísica, UNAM - Instituto de Geofísica y Astronomía, CITMA. Cuba, 2002. Disponible en: ([http://www.ciriongeo.co.cc/web\\_documents/GeoEstadistica%20Aplicada.pdf](http://www.ciriongeo.co.cc/web_documents/GeoEstadistica%20Aplicada.pdf)).
- Escudero Achiaga, Juan Carlos. "Estrategia de elaboración de un mapa de ruido. El caso de Vitoria-Gasteiz. Los pasos previos". En: *Congreso sobre ruido urbano*. Memorias. (9-11 de marzo), Vitoria-Gasteiz, España, 2005.
- Establecimiento Público Ambiental de Cartagena. "Programa de control de ruido en la ciudad de Cartagena". Subdirección Técnica de Desarrollo Sostenible, 2004. Disponible en: (<http://www.epacartagena.gov.co/doc/ruido.pdf>).
- Giraldo Henao, Ramón. "Introducción a la geoestadística. Teoría y aplicación". Bogotá, Facultad de Ciencias, Departamento de Estadística, Universidad Nacional de Colombia.
- Giraldo H. R.; Mancera J. E.; Méndez, H., Néstor; Troncoso, W. "Geoestadística: una herramienta para la modelación en estuarios". En: *Rev. Acad. Colom. Cienc.* 24(90): 59-70, 2000.
- Guillermo Villate, Supelano. "Proyecto de acuerdo 180 de 2004. Por medio del cual se dictan normas sobre la contaminación por ruidos en el Distrito Capital. Bogotá, Concejo de Bogotá, 2004.
- Iglesias Martínez, Luis. *Muestreo de áreas: Diseño de muestras y estimación en pequeñas áreas*. (tesis doctoral). Madrid, Departamento de Economía y Ciencias Sociales Agrarias - Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, 1998.



- Johnston, Kevin; Krivoruchko, Konstantin; Lucas, Neil y Ver Hoef, Jay M. *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*. ESRI, 2001.
- León, Elizabeth y Díaz, Martín. *Análisis geoestadístico de los niveles piezométricos del acuífero del valle de Queretaro*. Instituto de Geofísica, UNAM. (Posgrado en Ingeniería y Ciencias de la Computación), IIMAS, UNAM - Instituto de Geofísica y Astronomía, CITMA. Disponible en: (<http://mmc2.geofisica.unam.mx/cursos/gest/APLICACIONES/CNASIII.pdf>).
- Lobos Vega, Víctor Hugo y Suárez Silva, Enrique A. "Evaluación del ruido ambiental de la ciudad de Puerto Montt". En: *VI Congreso Iberoamericano de Acústica*. Memorias. (5-7 de noviembre). Buenos Aires, 2008.
- Londoño Fernández, Juan Luis; Quinchía Hernández, Rigoberto; Restrepo Osorio, Hernando y Vieco Gómez, Fernando. "Efectos auditivos y psicológicos del ruido producido por el tráfico aéreo del aeropuerto El Dorado en las poblaciones de Engativá y Fontibón". En: *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*. vol. 22, fasc. 2, 2004, p. 35-48.
- Melo Martínez, Carlos Eduardo. *Apuntes de clase. Curso de geoestadística, Especialización en sistemas de información geográfica*. Bogotá, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2009.
- Melo Martínez, Carlos Eduardo. *Apuntes de clase. Curso de geoestadística, Ingeniería catastral y geodesia*. Bogotá, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2005.
- Martínez Suárez, Pedro y Moreno Jiménez, Antonio. "Análisis espacio-temporal con SIG del ruido en Madrid y sus distritos. Departamento de Geografía. En: *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica GeoFocus*, num. 5, 2005, p. 219-249.
- Martínez Suárez, Pedro y Moreno Jiménez, Antonio. "Caracterización y evaluación cuantitativa de la población potencialmente afectable". Departamento de Geografía". En: *Boletín de la AGE*, num. 40. Madrid, Universidad Autónoma. 2005, p. 153-179.
- Personería de Bogotá. "El ruido ensordece a Bogotá". Bogotá, publicación Personería de Bogotá. Disponible en: (<http://www.personeriabogotagovco/?idcategoria=993>).

**ARANA SOSA JUAN CARLOS. Colombiano**, Ingeniero Catastral y Geodesta, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Ingeniero Contratista Instituto Geográfico Agustín Codazzi.  
jcaranas@udistrital.edu.co

**FRANCISCO JAVIER GAONA CÓRDOBA. Colombiano**, Ingeniero catastral y geodesta, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Ingeniero Contratista Instituto Geográfico Agustín Codazzi.  
gaona.francisco@gmail.com

