

# Uso de la geoestadística como herramienta de análisis para formalizar resultados en el campo de la contaminación electromagnética

## Use of geostatistical as analysis tool to formalize results in the field of electromog

*Alexánder Leal Piedrahita*

---

### ABSTRACT

This paper shows an application of geostatistics as fundamental tool to the analysis of an variable whose behavior has dependence with its space distribution or localization, in a particular place. Particularly this article presents the results for the analysis of the levels of electromagnetic pollution in the city of Lugano (Switzerland) using statistical techniques and interpolation space (geostatistical estimation procedures, known as “kriging”), using freeware tools like GoogleMaps and statistical analysis software R. The samples were acquired from measurements made by the research group TTHF (Telecom, telemetry and high frequency) in the city of Lugano on bands where mobile telephone works (900MHz, 1800MHz and 2100MHz) using the probe electric field (NARDA PMM 8057-FTP).

**Keywords:** electromagnetic contamination, geostatistics, krigin, mobile telephone.

### RESUMEN

Este trabajo muestra una aplicación de la geoestadística como herramienta fundamental para el análisis de una variable cuyo comportamiento tiene dependencia con su distribución o localización en un espacio determinado. Particularmente este artículo presenta los resultados obtenidos para el análisis de los niveles de exposición electromagnética de la ciudad de Lugano (Suiza) mediante el uso de técnicas estadísticas e interpolación espacial (procedimientos de estimación geoestadísticos, conocidos como “kriging”), utilizando herramientas de uso libre como GoogleMaps y el software de análisis estadístico R. Las muestras de análisis fueron adquiridas a partir de las mediciones realizadas por el grupo de investigación TTHF (Telecom, telemetría e alta frecuencia) en dicho lugar para las bandas de operación correspondientes al servicio de telefonía móvil celular (900MHz, 1800 MHz y 2100MHz) mediante el uso de la sonda de medida de campo eléctrico (NARDA PMM 8057-FTP).

**Palabras clave:** contaminación electromagnética, geoestadística, krigin, telefonía móvil.

Fecha de recepción: 2015-04-17 - Fecha aceptado: 2015-06-22

\* Grupo de investigación en telecomunicaciones aplicadas, GITA Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia [aleal@udea.edu.co](mailto:aleal@udea.edu.co)



## INTRODUCCIÓN

En el año 2000, el gobierno de Suiza comenzó a implementar las directrices para dar cumplimiento a la ordenanza ONIR99 (Ordinance relating to Protection from Non-Ionising Radiation of Dec/99) [1]. Una ley cuyo propósito es proteger a las personas de los posibles efectos que la radiación no ionizante podría causar en la salud. Para alcanzar tal objetivo la norma específica, entre otros, mecanismos para definir los niveles máximos de emisión de radiación no ionizante producida por: líneas de alta tensión, trenes, tranvías, estaciones de transmisión para radio y televisión, estaciones de telefonía móvil, etc.; así como estrategias para el continuo monitoreo de estas fuentes de radiación no ionizante. Actualmente, el grupo de investigación TTHF (Telecom, telemetria e alta frequenza) perteneciente al Departamento de Tecnología innovativa de la SUPSI (Scuola universitaria professionale della Svizzera Italiana), es el laboratorio encargado de realizar el control y monitoreo de los niveles de emisión electromagnética producidos por los operadores de telefonía móvil en toda la región del Ticino (Suiza), y como parte de su labor, publica todos sus informes en el website del observatorio ambiental de la Suiza Italiana [2]. El interrogante que surge como motivación de este proyecto es ¿Con la gran cantidad de información recopilada, se pueden plantear otras estrategias de análisis para los niveles de contaminación electromagnética? Para responder a este interrogante se propuso realizar un análisis geoestadístico del comportamiento del campo eléctrico en la ciudad de Lugano (Suiza), como un punto de partida para determinar si es factible incor-

porar una metodología alternativa en el análisis de datos para el fenómeno de la contaminación electromagnética. Para alcanzar este propósito, y teniendo en cuenta el gran avance de los sistemas de información geográfica (SIG) y su alto nivel de impacto combinado con el potencial del análisis geoestadístico, se evaluaron diferentes tipos de herramientas como ILWIS, Quantum GIS, GRASS, SAGA para determinar la viabilidad del desarrollo de este proyecto. Sin embargo, se optó por explorar el potencial del software estadístico R, en combinación con el servicio de Google Maps, para determinar su capacidad de funcionar como una herramienta GIS de gran versatilidad ya que: 1) dichos elementos (software estadístico R y GoogleMaps) son herramientas al alcance de cualquier investigador; 2) la documentación existente para dichos elementos es amplia; 3) ninguna de las herramientas de análisis geoestadístico mencionadas ofrecía al usuario la posibilidad de acceder a los resultados obtenidos mediante el análisis espacial a través de una sencilla interfaz web (navegador), lo que permite la consulta de resultados de manera remota; 4) el proceso de importación de mapas (formatos, resolución, tipos, etc), en algunas herramientas es una labor tediosa, mientras que con GoogleMaps se reduce a disponer de una conexión a Internet para la visualización del mapa y sus capas. De esta manera, el esquema de análisis propuesto en el presente estudio es ilustrado en la Figura 1.

Este artículo presenta el análisis de los niveles de exposición electromagnética en la ciudad de Lugano (Suiza) empleando técnicas geoestadísticas que permitirán obtener, entre otros resultados,

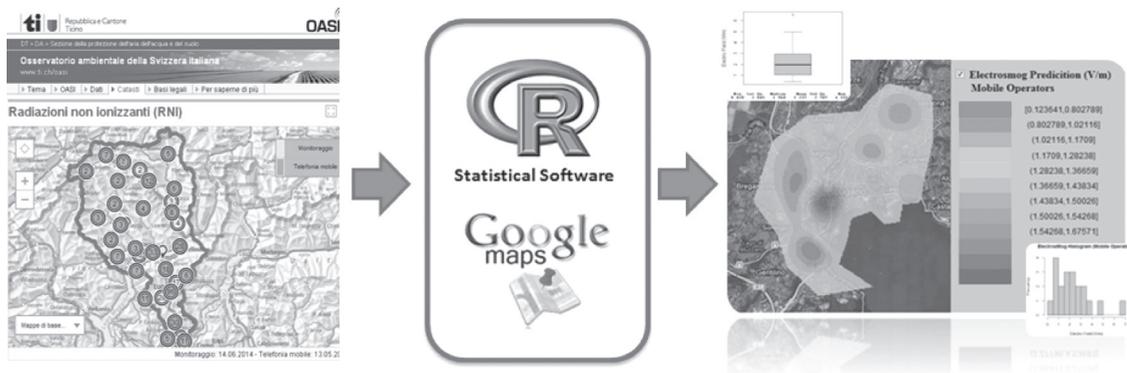


Figura 1. Esquema de análisis propuesto

un mapa con la distribución del nivel de polución electromagnética en dicha ciudad, elaborado a partir de técnicas de interpolación espacial (Kriging)

En su segunda sección se presenta una breve descripción de los principales conceptos que intervienen en el proyecto. En las secciones III y IV, se definen los elementos que integran la plataforma de análisis y se describe el procedimiento realizado para la ejecución del análisis geostadístico. Los resultados y su análisis serán planteados en la sección V. En la sección VI se concluye el artículo y se proyectan una serie de tareas para complementar el trabajo actual.

## **1. CONCEPTOS BÁSICOS ENTORNO AL PROYECTO**

Para una mejor apropiación, e interpretación de los resultados, es preciso plantear las siguientes definiciones entorno a la variable de interés y el objeto de estudio de este proyecto.

### **A. Contaminación Electromagnética**

La contaminación electromagnética es un concepto que aparece vinculado al explosivo crecimiento de las tecnologías que proveen servicios de comunicaciones inalámbricas fijas tales como: televisión digital terrestre y satelital, WiFi, Bluetooth, etc; así como de tecnologías implementadas para garantizar comunicaciones móviles tales como: GSM, UMTS, HSPA, LTE, etc. Sin embargo, es preciso aclarar que las tecnologías que proveen servicios de comunicaciones inalámbricas no son la únicas fuentes de contaminación electromagnética, también lo son las líneas de alta tensión, el horno microondas de nuestro hogar, etc.

La contaminación electromagnética puede ser definida como la presencia de todos los campos electromagnéticos en el ambiente, producidos por el hombre, que por su intensidad y tiempo de exposición pueden ocasionar riesgo, daño o molestia a las personas, ecosistemas o bienes en determinadas circunstancias [3], [4], [5]. No obstante los campos electromagnéticos siempre han estado presentes en la tierra, ya que están también vinculados a muchos fenómenos que ocurren en la naturaleza.

*1) Recomendaciones de exposición a contaminación electromagnética:* cada país tiene autonomía para establecer las normas relacionadas con los límites de exposición a campos electromagnéticos. Sin embargo, la mayoría de estas normas se basan en las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP). Esta organización no gubernamental, reconocida formalmente por la Organización Mundial de la Salud (OMS), evalúa los resultados de estudios científicos realizados en todo el mundo en torno a esta temática y después de su correspondiente análisis elabora las directrices en las que establece límites de exposición recomendados. [6]. En Suiza, la normativa que define todo lo relacionado con los niveles máximos de exposición a campos electromagnéticos en el rango de los 0Hz a 300GHz, así como las estrategias para su continuo monitoreo corresponde a la ordenanza ONIR99 (Ordinance relating to Protection from Non-Ionising Radiation of Dec/99) [1]. Dicha norma en particular define los siguientes valores límite para la intensidad de campo eléctrico (RMS), en referencia a las tecnologías utilizadas por los operadores de telefonía móvil:

- 5 V/m para las instalaciones que transmiten en la frecuencia de 900 MHz
- 6 V/m para las instalaciones que transmiten en la frecuencia de 1800 MHz o superior
- 4 V/m para las instalaciones que transmiten simultáneamente en los rangos de frecuencia de 900 MHz y 1800 MHz o superior.

### **B. Geoestadística**

La geoestadística es un área de la estadística espacial que provee un conjunto de herramientas y técnicas para el análisis y predicción de una variable que se muestra distribuida en el espacio o en el tiempo de una forma continua. Sin embargo, es importante resaltar que en geoestadística el concepto de continuidad espacial hace referencia a que la variable de estudio pueda ser medida en cualquier sitio de región de interés [7]. Uno de los principales campos de aplicación de la geoestadística es la predicción espacial, cuyo objetivo es estimar el comportamiento de una variable de estudio sobre un área de interés en

la que no se conoce el valor de la variable con un error mínimo, lo cual típicamente genera como resultado un mapa de predicción. Actualmente las aplicaciones entorno a la geoestadística van desde hidrología, física del suelo, epidemiología, agronomía, sociología, monitoreo ambiental, procesamiento de imágenes de satélite y la evaluación de la contaminación electromagnética [8], [9], [10], [11], [12].

A continuación se ilustran las preguntas a las que la geoestadística puede dar respuesta en el estudio y análisis de un fenómeno distribuido en el espacio o en el tiempo: [13]

¿De qué manera una variable varía en el espacio-tiempo?

¿Qué controla su variación en el espacio-tiempo?

¿Dónde se deben ubicar las muestras para describir su variabilidad espacial?

¿Cuántas muestras se necesitan para representar su variabilidad espacial?

¿Cuál es el valor de una variable en algún nuevo lugar/ tiempo que no se ha muestreado (estimación)?

¿Cuál es el nivel de incertidumbre de los valores estimados?

## 2. ELEMENTOS DEL PROYECTO

A continuación se definen los elementos que intervienen en el experimento, tanto a nivel de la obtención de muestras así como los utilizados para su correspondiente análisis.

## A. Marco muestral

Las muestras que fueron analizadas para el desarrollo de este proyecto consiste en un conjunto de informes resultantes del monitoreo realizado por el grupo de investigación TTHF (Telecom, telemetría e alta frecuencia) perteneciente al Departamento de Tecnología innovativa de la SUPSI (Scuola universitaria professionale della Svizzera Italiana), acerca de los niveles de emisión electromagnética producidos por los operadores de telefonía móvil en toda la región del Ticino (Suiza), con propósito de dar cumplimiento a la ordenanza ONIR99 (Ordinance relating to Protection from Non-Ionising Radiation of Dec/99) [1]. Actualmente todos estos informes son de acceso público y pueden ser consultados en el website del observatorio ambiental de la Suiza Italiana [2]. En particular, se definió como región de interés la ciudad de Lugano (Suiza) y consecuentemente todos los puntos de monitoreo muestreados en los últimos años en dicha área.

1) *Acerca del muestro*: el muestreo es el resultado de la recolección de datos de tres estaciones de monitoreo que trabajan autónomamente y que son localizadas estratégicamente durante un mes en las azoteas de edificios interesados en colaborar con las tareas de medición. Cada estación de monitoreo está compuesta por una sonda NARDA PMM 8057-FTP [14]. Dicha sonda de medición captura simultáneamente el comportamiento del campo eléctrico de interés en 4 bandas: GSM900, GSM1800, UMTS2100, así como banda larga (10 Hz a 3 GHz). Su nivel de resolución es de 0,01 V/m para las medicio-

**Tabla I.** Niveles de incertidumbre vinculados al proceso de monitoreo de la sonda narda PMM 8057

Parámetro	Contribución dB	Contribución %	Distribución	Divisor	Incertidumbre estándar %
Instrumento de medida					
Calibración		16.00	Normal	2.00	8.00
Respuesta en frecuencia	0.81	9.71	Rectangular	1.73	5.61
Isotropía	0.66	7.89	Rectangular	1.73	4.56
Linealidad	0.57	6.78	Rectangular	1.73	3.92
Sensibilidad temperatura	0.30	3.51	Rectangular	1.73	2.03
Incertidumbre estándar del equipo de medida					11.65
Incertidumbre estándar del resultado de la medida prolongada					23.31

nes de campo eléctrico con una sensibilidad de 0,2 V/m. Esta sonda permite capturar muestras cada 3 segundos. Sin embargo, de acuerdo a su capacidad de almacenamiento, la sonda puede almacenar muestras durante 5 días a intervalos de 30 segundos. No obstante, la sonda tiene la capacidad de transmitir los datos almacenados a través de una red GSM utilizando el protocolo FTP (File Transfer Protocol). En la Tabla I se ilustran los niveles de incertidumbre vinculados al proceso de monitoreo

Ahora, la estación de monitoreo NARDA PMM8057 suministra información por cada banda de interés (900 MHz, 1800 MHz y 2100 MHz). Por lo tanto, con el fin de tener un indicador que proporcione un único nivel de exposición en V/m, por ejemplo: el equivalente a la exposición GSM 900 MHz teniendo en cuenta los aportes de las otras dos bandas, es necesario realizar el cálculo planteado en (1) donde  $E_{VL}$  y  $E_R$  hacen referencia a los valores límite y de referencia para la exposición a campos eléctricos definidos por la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante ICNIRP.

$$E_{\text{Servicios-Moviles(Equivalente\_banda\_900MHz)}} = \sqrt{\left(E_{\text{GSM900}} \cdot \frac{E_{VL}}{E_R}\right)^2 + \left(E_{\text{GSM1800}} \cdot \frac{E_{VL}}{E_R}\right)^2 + \left(E_{\text{UMTS2100}} \cdot \frac{E_{VL}}{E_R}\right)^2} \quad (1)$$

De esta manera, atendiendo que el  $E_{VL}$  definido por la ICNIRP para la banda GSM 900 MHz es 41 V/m y que los valores de referencia  $E_R$  definidos por la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante ICNIRP para las bandas de 900 MHz, 1800 MHz y 2100 MHz están dados por (2), (3), y (4), de acuerdo a la Tabla II

$$E_R (400 \text{ MHz} - 2 \text{ GHz}) = 1,375 f^{0,5} \approx 41, \text{ GSM900 (2)}$$

$$E_R (400 \text{ MHz} - 2 \text{ GHz}) = 1,375 f^{0,5} \approx 58, \text{ GSM1800 (3)}$$

$$E_R (2 \text{ GHz} - 200 \text{ GHz}) = 61, \text{ UMTS2100 (4)}$$

Y en consecuencia la (1) quedaría expresado como se muestra en (5). Así, se obtiene la contribución total de los servicios de telefonía móvil al nivel de “contaminación electromagnética” normalizados a una sola banda.

$$E_{\text{Servicios-Moviles(Equivalente\_banda\_900MHz)}} = \sqrt{\left(E_{\text{GSM900}} \cdot \frac{41}{41}\right)^2 + \left(E_{\text{GSM1800}} \cdot \frac{41}{58}\right)^2 + \left(E_{\text{UMTS2100}} \cdot \frac{41}{61}\right)^2} \quad (5)$$

**Tabla 2.** Niveles de referencia icnirp para exposición poblacional a campos eléctricos [15]

Rango de frecuencias	Intensidad de campo eléctrico (V/m)
Hasta 1 Hz	-
1 - 8 Hz	10 000
8 - 25 Hz	10 000
0,025 - 0,8 kHz	250 / f
0,8 - 3 kHz	250 / f
3 - 150 kHz	87
0,15 - 1 MHz	87
1 - 10 MHz	87 / f <sup>0,5</sup>
10 - 400 MHz	28
400 - 2000 MHz	1,375 f <sup>0,5</sup>
2 - 300 GHz	61

## B. Software de análisis estadístico R

R es un lenguaje de programación de código abierto y así mismo un entorno de programación para el análisis estadístico y gráfico de datos. El paquete estadístico R es uno de los más flexibles, potentes y profesionales que existen actualmente para realizar tareas estadísticas de todo tipo,



**Figura 2.** Proceso de obtención de las muestras

desde las más elementales, hasta las más avanzadas y está disponible como software libre bajo los términos de la Licencia Pública General (GNU) de la Free Software Foundation [16].

Entre las principales características de R se destacan:

- Un manejo eficaz de los datos y sencillo almacenamiento.
- Un conjunto de operadores para los cálculos en vectores, particularmente con matrices.
- Una gran colección de herramientas intermedias integradas para el análisis coherente de datos.
- Facilidades gráficas para el análisis y visualización de datos ya sea en pantalla o en versión impresa.
- Y un lenguaje de programación bien desarrollado, simple y efectivo que incluye condicionales, bucles, funciones recursivas definidas por el usuario y facilidades de entrada y salida.

### C. GoogleMaps

Google Maps es el nombre de un servicio de localización ofrecido por Google. Básicamente es un servidor de aplicaciones de mapas en la Web. Ofrece imágenes de mapas desplazables, así como fotos satelitales del mundo con la posibilidad de integrar a estos mapas otras capas de información [17]. Entre las funcionalidades de GoogleMaps se destacan:

- Cómo llegar: permite ver y comparar varios medios de transporte: coche, a pie o transporte público; para encontrar el mejor camino hacia el lugar indicado.
- Mis sitios: permite crear tus propios mapas y acceder a tus ubicaciones destacadas.
- Buscar en Maps: permite buscar lugares, negocios, intersecciones, direcciones.
- Capas: Permite visualizar en el mapa información vinculada a una zona en particular como: tu ubicación, estado de tráfico y fotos, entre otras.
- Street View: permite obtener una visión panorámica del punto de interés a partir de imágenes, tal como si estuvieras caminando por dicho sitio.

- Mirada directa y espacial: Google Earth se ha integrado al servicio Maps, pudiendo pasar de una mirada puntual de un lugar en una ciudad a ver la Tierra desde el espacio.
- Google Maps Engine: permite la creación de mapas personalizados, mediante la incorporación de líneas, formas y lugares o a través de la importación de datos que se tengan guardados en una hoja de cálculo. Cabe anotar que esta funcionalidad es la que permite a R interactuar con GoogleMaps mediante el uso de una librería denominada plotGoogleMaps [18].

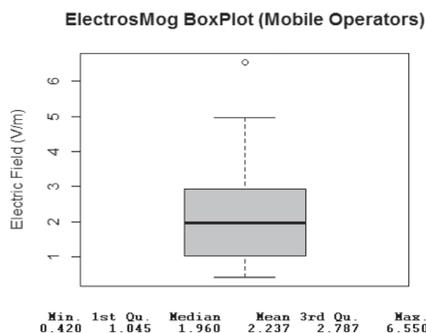
## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Todo trabajo geoestadístico, independiente de su campo de aplicación, debe llevarse a cabo en tres etapas [19]:

### A. Análisis exploratorio de los datos

En esta fase se estudian los datos muestrales sin tener en cuenta su distribución geográfica. Básicamente es la etapa de aplicación de la estadística como tal, donde mediante el uso de gráficos y estadísticos se exploran diferentes características de la variable de interés tales como: valores atípicos o outliers, forma de la distribución, nivel de dispersión, etc. De esta forma el analista consigue un entendimiento básico de sus datos y de las relaciones existentes entre las variables analizadas.

Tal como se mencionó en la sección III, apartado A, nuestra variable de interés consiste en el nivel de contaminación electromagnética aportado por los operadores de telefonía móvil que operan en las bandas de 900 MHz, 1800 MHz y 2100 MHz, en la ciudad de Lugano (Suiza). Las muestras fueron obtenidas a través del proceso de medición realizado por tres estaciones de monitoreo localizadas estratégicamente durante un mes en las diferentes azoteas durante los últimos años. Dicha información es de acceso público y puede ser consultada en el website del observatorio ambiental de la Suiza Italiana [2]. En la Figura 2 se describe el proceso de obtención de las muestras.

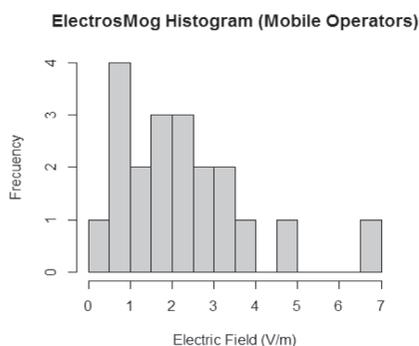


**Figura 3.** Diagrama de caja para los niveles de emisión electromagnética producidos por los operadores de telefonía móvil

Así entonces, utilizando R como software de análisis estadístico, se inicia el análisis exploratorio mediante el uso de un diagrama de caja (ver Figura 3) y un histograma (ver Figura 4), con el ánimo de examinar cómo está distribuida la variable de interés.

La Figura 3 ilustra que la tendencia de los niveles de exposición electromagnética, consecuencia del uso del servicio de telefonía móvil celular, está entre 1 V/m y 3 V/m. Sin embargo, se puede ver que en las muestras hay registro de valores cercanos a los niveles máximos permitidos por la legislación federal de Suiza ONIR99 (Ordinance relating to Protection from Non-Ionising Radiation of Dec/99) [1], es decir, entre 4 V/m y 6 V/m. Por ejemplo, se tiene un valor de 6,55 V/m.

De hecho, con el histograma (ver Figura 4), se puede verificar que la tendencia de los valores para los niveles de exposición electromagnética



**Figura 4.** Histograma para los niveles de emisión electromagnética producidos por los operadores de telefonía móvil

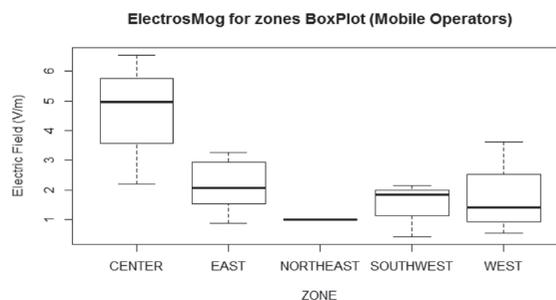


**Figura 5.** Zonificación propuesta para realizar un análisis exploratorio espacial

está entre 0,5 V/m y 3,5 V/m. Los valores por encima de 4 V/m son tan sólo dos.

1) *Análisis exploratorio de los datos a nivel espacial:* para este proyecto se optó por explorar qué información se podía obtener de un análisis exploratorio de los datos a nivel espacial. Para tal fin, se dividió la ciudad de Lugano en cinco zonas, tal como se muestra en la Fig. 5. Esta zonificación fue seleccionada de acuerdo con los puntos donde se habían localizado las estaciones de monitoreo en la ciudad.

De este modo, a partir de la zonificación planteada, se obtuvo el diagrama de cajas ilustrado en la Fig. 6. En éste se puede apreciar que la zona con mayor concentración registrada de contaminación electromagnética es el centro de la ciudad (polígono verde).



**Figura 6.** Diagrama de caja para los niveles de emisión electromagnética producidos por los operadores de telefonía móvil de acuerdo a la zonificación planteada

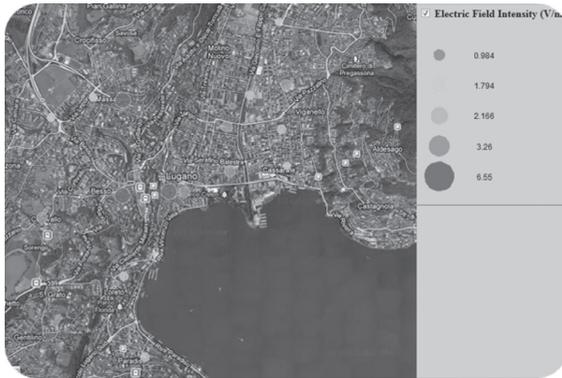


Figura 7. Visualización del comportamiento de los niveles de emisión electromagnética producidos por los operadores de telefonía móvil mediante la integración de R y Googlemaps

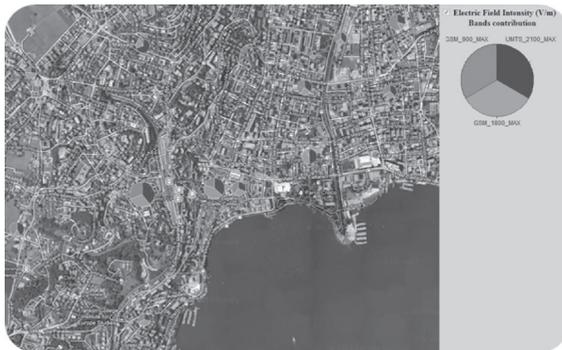


Figura 8. Vista detallada del comportamiento de los niveles de emisión electromagnética producidos por los operadores de telefonía móvil mediante la integración de R y Googlemaps

Luego se realizó un script en R que permite visualizar simultáneamente en GoogleMaps la localización de los puntos de monitoreo y el nivel de exposición electromagnética registrada (ver Figura 7). Los puntos anaranjados y rojos son los puntos críticos de mayor intensidad mientras que los puntos verdes registran las magnitudes más pequeñas.

Dicho script también permitía visualizar la información asociada al nivel de exposición electromagnética de manera más detallada (ver Figura 8), ya que simultáneamente se podía visualizar: la localización del punto de monitoreo, la magnitud del nivel de exposición electromagnética (tamaño del círculo) y la contribución de cada banda de frecuencia 900Mhz, 1800 Mhz y 2100Mhz (gráfico circular). De nuevo se puede

comprobar, con una simple inspección del gráfico, que el centro de la ciudad cuenta con los niveles más altos de contaminación electromagnética.

Para finalizar, es preciso aclarar que todos los mapas obtenidos en esta sección se lograron mediante la integración de GoogleMaps y el uso de la librería plotGoogleMaps [18] del software estadístico R.

## B. Análisis estructural

El análisis estructural es uno de los tópicos más importantes de la geoestadística puesto que se encarga de la determinación de la dependencia espacial entre los datos medidos de una variable. Para llevar a cabo este análisis, se debe calcular el semivariograma, u otra función que explique la variabilidad espacial a partir de la información muestral.

1) *Variograma*: el variograma, conocido también como semivariograma, es un estimador de la variabilidad en términos de la distancia y ha sido ampliamente usado para investigar y modelar la estructura espacial de muchos tipos de variables. Básicamente el variograma responde al interrogante ¿Qué tan similares son los valores de la variable de interés en diferentes puntos del espacio, a medida que estos puntos se encuentran más separados?. Un variograma, tal como se muestra en Figura 9, es una representación gráfica de la varianza como una función de la distancia entre un par de puntos. Para su obtención se realiza un semivariograma experimental con los datos conocidos, al cual se le ajusta un semivariograma teórico para cuantificar el grado y escala de

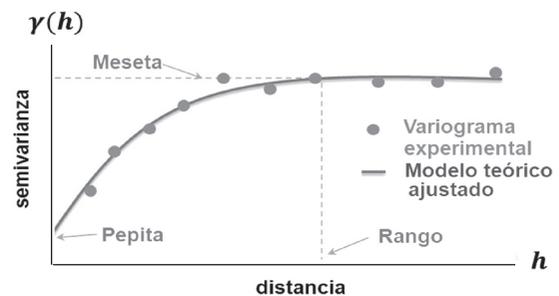


Figura 9. Comportamiento típico de un semivariograma acotado

variación espacial. Este ajuste a un modelo teórico se hace necesario ya que el semivariograma experimental carece de una función matemática precisa para la realización de cálculos. Entre los modelos de ajuste más utilizados se tiene los modelos: esférico, exponencial, gaussiano, potencial, lineal y logarítmico. Sus formas y expresiones matemáticas pueden consultarse en [5].

De este modo, la semivarianza  $\gamma(h)$  puede ser calculada de manera experimental a través de (6). Donde  $x_i$  es el punto de coordenadas  $(x_1, x_2)$  para un caso bidimensional,  $E(x_i)$  y  $E(x_i+h)$  son las medidas de campo eléctrico en dos localizaciones separadas una distancia  $h$  y  $N(h)$  es el número de pares de datos  $[E(x_i), E(x_i+h)]$  separados una distancia  $h$  en el terreno.

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [E(x_i) - E(x_i + h)]^2 \quad (6)$$

Así entonces, una vez se haya determinado el variograma experimental y éste último se haya ajustado a un modelo teórico, se pueden extraer del gráfico resultante (Ver Fig. 9) una serie de parámetros como el alcance o rango “range”, la meseta “sill” y el efecto pepita “nugget”, los cuales serán usados posteriormente en la interpolación estadística. El rango hace referencia a la distancia a partir de la cual dos observaciones son independientes. La meseta es definida como el valor para el cual al aumentar el intervalo de distancia entre los puntos ( $h$ ), el valor de  $\gamma(h)$  permanece constante. Y el efecto pepita se interpreta como un error en las mediciones y no debe representar más del 50% de la meseta si se espera que el modelo explique adecuadamente la realidad del fenómeno [5].

Para este estudio, el análisis estructural se realizó mediante el cálculo del variograma experimental usando (6) mediante el uso de la función “autokrige”, perteneciente a la librería automap [20], del software estadístico R. El resultado obtenido se muestra en la Fig. 10 representado por puntos. Allí se observa que el modelo teórico que presentó el mejor ajuste con el variograma experimental fue el modelo Matérn, parametrizado por Stein [21]. Entre las interpretaciones que se pueden realizar sobre el variograma ilustrado en la Fig. 10 es posible mencionar que la variable de

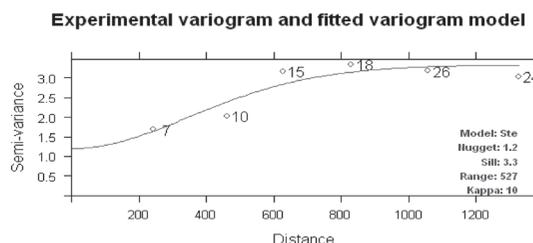


Figura 10. Variograma experimental ajustado

interés, nivel de contaminación electromagnética, presenta una estructura de dependencia espacial puesto que en ningún caso la semivarianza es constante en función de la distancia. Además de que el rango encontrado sugiere que a distancias superiores a 527 metros las muestras son espacialmente independientes entre sí. También es importante resaltar que el valor de la pepita no supera el 50% del valor de la meseta, lo cual, según [22] es recomendable para que el modelo de correlación espacial describa bien la realidad.

### C. Predicciones

En cualquier trabajo geoestadístico, el principal objetivo es la caracterización de la variable investigada en todas las localizaciones partiendo de la información suministrada por los puntos muestrales. Esto es lo que se conoce como predicción o estimación. Para realizar la estimación existen varias alternativas, entre las que se encuentran: splines cúbicos, método del inverso de la distancia, aproximación por polígonos, triangulación, Kriging, etc. En este estudio se decidió utilizar Kriging como mecanismo de predicción.

Kriging es un término utilizado para nombrar una técnica desarrollada en Francia por Mathearon alrededor de 1960, a partir de los trabajos de D.G. Krige, quien fue probablemente el primer investigador que hizo uso de la correlación espacial. Entre las principales características que hacen del Kriging un método de estimación superior a los tradicionales, se puede mencionar que: mientras los métodos tradicionales utilizan el concepto euclidiano de la distancia para el cálculo de los pesos que se aplicarán a cada dato muestral, el Kriging considera tanto la distancia como la geometría de la localización de las muestras, así como la estructura de la correla-

ción espacial obtenida a partir del análisis del variograma; además de que el Kriging minimiza la varianza del error esperado. El resultado final de implementar Kriging es un mapa de predicción que incluye los valores interpolados de la variable en el espacio así como un mapa que indica el grado de incertidumbre asociado a los valores estimados mediante la interpolación bajo la figura de varianza o desviación estándar. También es preciso mencionar que Kriging posee métodos para incorporar información secundaria que esté relacionada con la variable principal, como lo son el Kriging Universal y el Co-Kriging, los cuales permiten mejorar el nivel de predicción. [19]

De este modo, para estimar el nivel de contaminación electromagnética aportado por los servi-

cios de telefonía móvil en los puntos no incluidos en el marco muestral se aplicó Kriging, utilizando como insumo el semivariograma obtenido en la Figura 10. El mapa de predicción resultante, así como su desviación estándar, se muestran en las Figuras 11 y 12 respectivamente y fueron obtenidos mediante el uso de las funciones incorporadas en las librerías plotGoogleMaps [18] y automap [20] de R.

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Todo trabajo geoestadístico, independiente de su campo de aplicación, debe llevarse a cabo en tres etapas [19]:

#### A. Análisis exploratorio de los datos

A partir de la estimación realizada (ver Figura 11), Kriging permite inferir el nivel de contaminación electromagnética en lugares donde no se realizó el correspondiente monitoreo, brindando una mejor apreciación del comportamiento de este fenómeno. De esta manera, tal como se ha observado en las Figuras 6, 7 y 8, la zona centro de la ciudad es la zona donde se exhibe mayor nivel de “electrosmog” (región en color rojo), como consecuencia del aporte de los operadores de servicios de telefonía móvil. Sin embargo, el rango de valores obtenidos se encuentra dentro del marco admitido por la legislación federal de Suiza ONIR99 (Ordinance relating to Protection from Non-Ionising Radiation of Dec/99) [1], es decir, entre 4 V/m y 6 V/m.

Por otro lado, una de las ventajas del método Kriging, es que no solo realiza la predicción de la variable de interés, también evalúa el error de la predicción calculada. Por ejemplo, en el mapa ilustrado en la Figura 12, las regiones de color rojo tienen un error de predicción alto, del orden de 1.8 V/m. Este comportamiento es completamente acertado ya que en dichas áreas nunca se ha instalado un punto de monitoreo, de aquí que el nivel de incertidumbre, o la posibilidad de estimar correctamente el nivel de “electrosmog” en dichos sitios es elevada. Este mapa es de utilidad porque, además de que permite conocer el nivel de incertidumbre de la predicción, facilita iden-

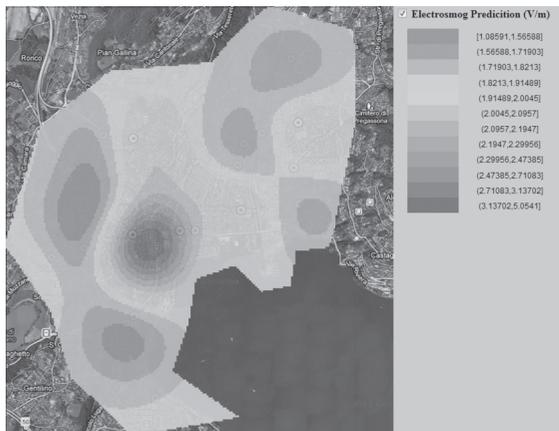


Figura 11. Mapa de predicción obtenido mediante kriging

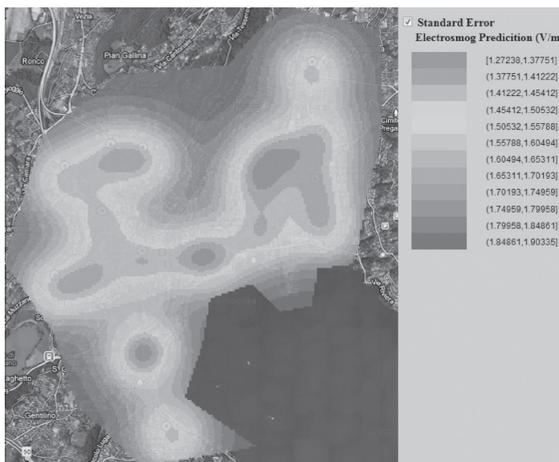


Figura 12. Mapa del error asociado a la predicción mediante kriging

tificar las áreas donde, en el futuro, se pueden localizar nuevos puntos de monitoreo.

En los diagramas de caja ilustrados en las Fig. 3 y 6 se observa que se han registrado niveles de contaminación electromagnética cercanos a los niveles máximos permitidos por la legislación federal de Suiza ONIR99 (Ordinance relating to Protection from Non-Ionising Radiation of Dec/99). Por ejemplo, se tiene un valor de 6,55 V/m. Sin embargo, con el histograma (ver Fig. 4) se puede verificar que la tendencia de los valores de la variable de interés está entre 0,5 y 3,5 V/m y tan solo un valor supera el umbral de los 6 V/m.

Finalmente, es preciso señalar las siguientes observaciones con el ánimo de brindar una mejor interpretación a los resultados presentados en este estudio:

- Los equipos de monitoreo y el procedimiento de medición incorporan un error acumulado cercano al 35% (ver Tabla I).
- La ciudad no puede ser muestreada simultáneamente en todos los puntos de medida que se desearía, pues solo se dispone de tres estaciones de monitoreo para realizar el proceso de control. Una ciudad es un ente en constante transformación, aparecen nuevas construcciones, crecen los árboles, y estos factores pueden modificar el proceso de medida en un punto determinado.
- No se puede olvidar que el comportamiento obtenido para el nivel de contaminación electromagnética, mapa de predicción ilustrado en la Figura 11, es el resultado de los puntos de monitoreo que registraron dichas mediciones en diferentes azoteas de edificios de la ciudad. De aquí que no es posible inferir nada del comportamiento del mismo a nivel del suelo como tal, lugar donde se concentra la mayor cantidad de personas.
- El número de muestras analizadas no es tan amplia como se desearía para obtener resultados más precisos. Sin embargo, el estudio planteado demuestra la aplicabilidad de la geoestadística como herramienta de análisis en el campo de la contaminación electromagnética.

## CONCLUSIONES

La principal conclusión de este estudio es la aplicabilidad de la geoestadística como herramienta de análisis para formalizar resultados en el campo de la contaminación electromagnética, donde el análisis exploratorio (diagramas de cajas e histogramas) junto con el análisis espacial (variogramas y mapas de predicción con Kriging) proveen información valiosa acerca del comportamiento de una variable de interés.

En este trabajo también se puede apreciar como mediante el uso de herramientas de uso libre, como el software estadístico R y GoogleMaps, cualquier investigador tiene a su alcance la capacidad de incorporar a su análisis estrategias que permiten la visualización del comportamiento de una variable de una manera clara, directa y de fácil comprensión.

Finalmente, la metodología planteada es fácilmente replicable en cualquier región. Después de la realización de este estudio se evaluaron pilotos que, mediante la ayuda de una sonda portable instalada en un vehículo, lograban realizar estimaciones de predicción del comportamiento del nivel de contaminación electromagnética en una región de 1500m x 500m, en tan solo una hora.

## AGRADECIMIENTOS

El presente estudio fue realizado gracias a una pasantía investigativa apoyada por la Universidad de Antioquia y la Fundación Reteca, en el grupo de investigación TTHF (Telecom, telemetría e alta frecuencia) perteneciente al Departamento de Tecnología innovativa de la SUPSI (Scuola universitaria professionale della Svizzera Italiana). Dicha pasantía se realizó bajo la supervisión de los investigadores Matteo Lanini y Andrea Salvadé, a quienes expreso mis más profundos agradecimientos.

## REFERENCIAS

Swiss Federal Council, «Federal Office for the Environment FOEN - Topic Electrosmog,» [En línea]. Available: <http://www.bafu.admin.ch/>

- elektrosmog/01079/index.html?lang=en. [Último acceso: 27 Julio 2014].
- Osservatorio Ambientale della Svizzera Italiana (OASI), «Radiazioni non ionizzanti (RNI) - OASI,» [En línea]. Available: <http://www.oasi.ch/web/catasti/rni.html>. [Último acceso: 30 Julio 2014].
- Chun De Liu; Cheng Bin Li, "Electromagnetic pollution and its control," Microwave and Millimeter Wave Technology, 2000, 2nd International Conference on. ICMMT 2000, vol., no., pp.461,464, 2000. doi: 10.1109/ICMMT.2000.895720
- Salovarda, M.; Malaric, K., "Measurements of Electromagnetic Smog," Electrotechnical Conference, 2006. MELECON 2006. IEEE Mediterranean, vol., no., pp.470,473, 16-19 May 2006. doi: 10.1109/MELCON.2006.1653140
- V. Vila, «Contaminación Electromagnética,» [En línea]. Available: <http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/ContElctro.htm>. [Último acceso: 04 Agosto 2014].
- Organización Mundial de la Salud, Estableciendo un dialogo sobre los riesgos de los campos electromagneticos, Ginebra (Suiza): Ediciones de la OMS, 2005.
- R. Giraldo Henao, «Introducción a la geoestadística, Teoría y Aplicación,» Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2002.
- Y. Ould Isselmou, H. Wackernagel, W. Tabbara y J. Wiart, «Geostatistical Interpolation for Mapping Radio-Electric Exposure,» de European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Nice, France, 2006.
- J. Paniagua, M. Rufo, A. Jimenez y A. Antolin, «The spatial statistics formalism applied to mapping electromagnetic radiation in urban areas,» Environ Monit Assess, n° 185, pp. 311-322, 2013.
- C. C. Rodríguez, C. A. Forero y O. Homero, «Electromagnetic Field Measurement Method to Generate Radiation Map,» de Communications Conference (COLCOM), IEEE Colombian, Santiago de Cali, Colombia, 2012.
- H. Wackernagel, F. Ors y D. Renard, «Operational monitoring of radioelectric exposure in an urban environment,» de Conference on Geostatistics for Environmental Applications, Valencia, Spain, 2012.
- J. Wiart, A. Cortel, E. Conil, M. F. Wong, Y. O. Isselmou y A. Gati, «EMF monitoring using temporal frequency selective system,» de International Symposium on Electromagnetic Comaptibility, Kyoto, 2009.
- T. Hengl, A practical guide to geostatistical mapping, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2009.
- Narda - Safety Test Solutions, «Stazioni di Monitoraggio di Campi Elettrici e Magnetici,» [En línea]. Available: [http://www.pmm.it/narda/safety\\_centraline\\_it.asp](http://www.pmm.it/narda/safety_centraline_it.asp). [Último acceso: 4 Agosto 2014].
- ICNIRP - International Commission On Non-Ionizing Radiation Protection, «Recomendaciones para limitar la exposicion a campos eléctricos, magneticos y electromagnéticos ( hasta 300 GHz),» [En línea]. Available: <http://www.icnirp.de/documents/emfgdlesp.pdf>. [Último acceso: 4 Agosto 2014].
- R Project, «The R Project for Statistical Computing,» [En línea]. Available: <http://www.r-project.org/>. [Último acceso: 4 Agosto 2014].
- Google, «Google Maps,» [En línea]. Available: <https://maps.google.es>. [Último acceso: 4 Agosto 2014].
- M. Kilibarda, «Plot spatial or spatio-temporal data over Google Maps,» [En línea]. Available: <http://cran.r-project.org/web/packages/plotGoogleMaps/index.html>. [Último acceso: 4 Agosto 2014].
- F. Moral García, «Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales,» Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente, vol. 1, n° 13, pp. 78-86, 2004.
- P. Hiemstra, «Automatic interpolation package,» [En línea]. Available: <http://cran.r-project.org/web/packages/automap/automap.pdf>. [Último acceso: 4 08 2014].
- M. y. S. M. Jun, «Nonstationary covariance models for global data,» The Annals of Applied Statistics, n° 2, pp. 1271-1289, 2008.
- E. Díaz- Francés, «Introducción a Conceptos Básicos de Geoestadística,» de Seminario Estadística y Medio Ambiente. Centro de Investigación en Matemáticas, Guanajuato, México, 1993.