

# APLICACIÓN DE LA GEOESTADÍSTICA AL ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DEL OZONO EN LOS VERANOS DE LA COMUNIDAD DE MADRID

María Rosa CAÑADA TORRECILLA

*Departamento de Geografía, Universidad Autónoma de Madrid*

## RESUMEN

Este trabajo estudia la distribución espacial del ozono en los veranos de la Comunidad de Madrid mediante técnicas geoestadísticas. Hemos realizado un análisis estructural y hemos incorporado esa información al proceso geoestadístico de estimación espacial. El resultado ha sido la elaboración de unos mapas de ozono que muestran un modelo de distribución espacial que se explica por factores de tipo climático y por el proceso fotoquímico de formación y destrucción del ozono.

**Palabras clave:** Métodos geoestadísticos, kriging ordinario, ozono, semivariograma, Comunidad de Madrid.

## ABSTRACT

*The ozone spatial distribution patterns at the summer of Community of Madrid could be traced, using geostatistical techniques. I have tried to make a structural analysis incorporating such information to geostatistical process of spatial estimation. So, I achieved to elaborate some ozone maps that show specific spatial distribution patterns that could be better explained by various climatic factors as well as the photochemical ozone building-up processes.*

**Keywords:** *Geostatistical methods, ordinary kriging, ozone, semivariogram, Community of Madrid.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante el verano del año 2003 toda España estuvo sometida a una ola de calor excepcional desde el punto de vista climático. Las temperaturas máximas y mínimas estuvieron por encima de los valores propios del clima desde primeros de junio hasta finales de agosto como ha sido puesto de manifiesto por un estudio realizado por el INM y que se puede consultar en la página web del Instituto (<http://www.inm.es/web/sup/ciencia/divulga/olacalor2003>). Según este estudio, en Madrid, el número de días con temperatura máxima diaria mayor o igual que 32° C osciló entre los 61 de Getafe y los 55 de Retiro; si tenemos en cuenta el número de días superiores a 35° C se registraron en esas mismas estaciones los máximos de 36 y 25 días respectivamente. Incluso en la estación de Cuatro Vientos se llegaron a superar los 40° de máxima diaria durante 3 días. Igualmente el número de días con temperatura mínima diaria mayor o igual que 20° fue superior al registrado en toda la serie histórica de las estaciones madrileñas. Estas altas temperaturas favorecieron la formación de episodios de alta contaminación de ozono troposférico sobre todo en zonas suburbanas y rurales de la Comunidad de Madrid, a donde llegaban transportados por los vientos dominantes, enormes cantidades de óxidos de nitrógeno y compuestos volátiles que junto con las elevadas temperaturas y la radiación solar llegaron a desencadenar las reacciones que originaron los altos valores de este contaminante, tan perjudicial para la salud y para las plantas.

Dado el interés que tiene conocer la variabilidad espacial de este fenómeno pretendemos modelizar el comportamiento del ozono en los veranos de la Comunidad de Madrid mediante el empleo conjunto de Sistemas de Información Geográfica y de métodos geoestadísticos de interpolación. Elaboraremos mapas de distribución espacial de este contaminante con métodos de estimación geoestadísticos, adecuados para predecir los valores de una variable distribuida en el espacio de una forma continua.

Para elaborar este estudio hemos utilizado medias mensuales de los meses de verano de los años 2001, 2002 y 2003, calculadas a partir de datos diarios suministrados por las 25 estaciones de la red de calidad del aire del Ayuntamiento de Madrid (<http://www.mambiente.munimadrid.es/>) y por las 17 estaciones de la red de la Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid (<http://medioambiente.madrid.org/>).

## 2. METODOLOGÍA

Para explicar la variación espacial del ozono nos basamos en el desarrollo de un modelo estocástico o probabilístico, considerando el ozono una variable regionalizada. La teoría de la variable regionalizada considera la variable como una variable aleatoria  $Z(x)$ , donde  $x$  representa las coordenadas espaciales. Los actuales valores de  $Z$ , de los que hay uno para cada posición en ese espacio, constituye una particular realización de un proceso aleatorio. El modelo matemático utilizado para describir la variación espacial es:  $Z(x) = \mu(x) + \varepsilon(x)$ ; es decir, la variable regionalizada  $Z$  en  $x$ , es el resultado de la suma de dos componentes: una media local desconocida  $\mu(x)$  y un componente aleatorio  $\varepsilon(x)$  cuya varianza viene dada por la siguiente expresión:  $\text{var}[\varepsilon(x) - \varepsilon(x+h)] = E\{[\varepsilon(x) - \varepsilon(x+h)]^2\} = 2\gamma(h)$ . En esta expresión  $h$  es un vector (intervalo de distancia) que indica la distancia que separa dos lugares  $x$  y  $x+h$  aunque también tiene dirección. El modelo asume que la media local y que las varianzas de las diferencias para cada distancia son constantes. Asunciones que constituyen la hipótesis intrínseca de Matheron. En estas circunstancias la ecuación anterior es equivalente a esta otra ecuación:  $\text{var}\{Z(x) - Z(x+h)\} = E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\} = 2\gamma(h)$ , donde  $\gamma(h)$  es la semivarianza, que depende solamente de la separación entre  $x$  y  $x+h$  y no de la actual posición de  $x$  (BURROUGH, 2001).

La función que describe la relación entre las diferencias de los valores y las distancias entre todos los posibles pares de puntos, es el semivariograma experimental, que constituye el primer paso hacia una descripción cuantitativa de la variación espacial de la variable. La fórmula para calcularlo es:  $\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{Z(x_i) - Z(x_i+h)\}^2$ , siendo  $Z(x_i)$  los valores muestrales en los

puntos  $x_i$ , en los que se tienen datos tanto en  $x_i$  como en  $x_i+h$ ;  $N(h)$  es el número de pares de datos separados por una distancia  $h$ . En la práctica se define un número finito de distancias,  $h_j$  y se asigna al cálculo de  $\gamma(h_j)$  todos los pares de valores contenidos en el intervalo  $(h_j - \Delta h_j, h_j + \Delta h_j)$ .

Al ser el semivariograma el promedio de todos los pares de semivarianzas para cada distancia de separación es dependiente del número total de datos y de la consistencia de los mismos. Es decir el semivariograma puede resultar erróneo cuando hay pocos datos o cuando en ellos existen valores extremos. Además al ser  $h$  un vector que implica dirección además de distancia puede haber

anisotropía en la variación espacial de la variable, es decir un comportamiento diferente según la dirección elegida.

Para interpretar el semivariograma hay que ajustar una función o modelo teórico (Fig. 1) que nos proporciona unos parámetros con los que describir la variación espacial de la variable y que después van a ser utilizados por el kriging. El modelo que hemos elegido para ajustar los datos de ozono es el esférico cuya función es:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left\{ \frac{3h}{2a} - 1/2(h/a)^3 \right\} \text{ cuando } 0 < h < a$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \text{ cuando } h > a,$$

Por definición  $\gamma(0)=0$  pero con frecuencia  $\gamma(0)$  muestra un valor positivo dando lugar a un efecto pepita o varianza en el origen  $C_0$  (*nugget*); éste se debe a la variabilidad a una distancia más pequeña que la menor  $h$  considerada; en realidad es una estimación del residual o ruido no correlacionado espacialmente;  $a$  es el alcance (*range*), marca la distancia más allá de la cual la autocorrelación es nula;  $h$  es el vector de distancia;  $C_0 + C_1$  (*partial sill*) es la meseta o valor estable de  $\gamma$  (*sill*), coincide con el valor de la varianza muestral de la variable que se alcanza a una distancia que se llama alcance.

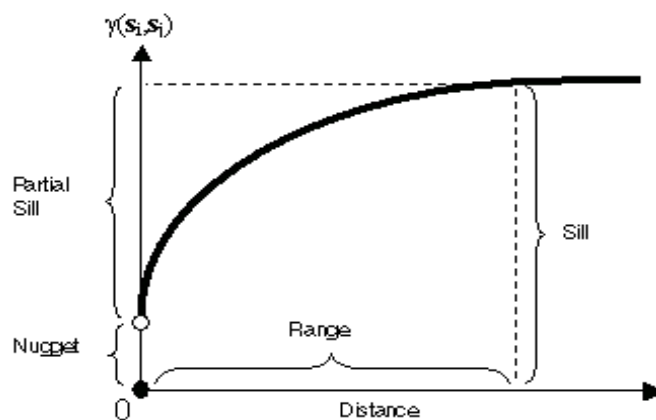


Fig. 1. Ajuste del modelo esférico al semivariograma

El semivariograma representa la tasa media de cambio de una propiedad con la distancia. Dos observaciones que estén más próximas serán más parecidas que si estuvieran más distantes. La dependencia espacial disminuye a medida que se incrementa la distancia  $h$  y, finaliza a una cierta distancia, el alcance. Más allá del alcance la tasa media de cambio es independiente de la separación entre las observaciones. La autocorrelación de la variable sólo aparece dentro del alcance del semivariograma.

El ozono muestra un patrón de variabilidad espacial que cambia con la dirección además de con la distancia (h), por lo que hemos tenido en cuenta la anisotropía en el modelo.

El semivariograma teórico se utiliza para determinar los pesos  $\lambda_i$  necesarios para la interpolación con el kriging ordinario. El valor estimado de un lugar viene dado por  $\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i * z(x_i)$ , donde  $\hat{Z}(x_0)$  es el valor pronosticado de un lugar,  $\lambda_i$  es un peso desconocido que tenemos que calcular para cada valor observado y  $Z(x_i)$  es el valor observado de un lugar. El valor estimado se diferenciará lo menos posible del valor observado, esa diferencia se llama error de estimación.  $\varepsilon = Z(x_0) - \sum \lambda_i Z(x_i)$ , siendo  $Z(x_0)$  el valor observado y  $\sum \lambda_i Z(x_i)$  el valor pronosticado. La estimación y el error de estimación dependen de los pesos elegidos. Los pesos óptimos son los que producen estimaciones insesgadas y tienen una mínima varianza de estimación. Para conseguir que las estimaciones sean insesgadas la suma de los pesos debe ser igual a 1. Y para asegurar un mínimo error en la estimación se añade el multiplicador de Lagrange ( $m$ ). Para hallar los pesos del modelo,  $\lambda_i$ , hay que resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\Gamma * \lambda = g \quad \text{o} \quad \begin{pmatrix} \gamma_{11} & \dots & \gamma_{1N} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \gamma_{N1} & \dots & \gamma_{NN} & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \lambda_N \\ m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_{10} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \gamma_{N0} \\ 1 \end{pmatrix}$$

donde  $\Gamma$  es la matriz de los valores del semivariograma teórico,  $\lambda$  es el vector de pesos que tenemos que hallar y  $g$  es el vector de las semivarianzas teóricas de cada uno de los puntos muestrales con el punto a predecir.

Para hallar los pesos  $\lambda_i$  hay que calcular la matriz inversa de la matriz  $\Gamma$ :  $\Gamma * \lambda = g \quad \lambda = \Gamma^{-1} * g$ . Para calcular el vector  $g$  hallamos la distancia entre los vecinos y el punto que se va a interpolar mediante la fórmula de la distancia euclidiana y después calculamos la semivarianza teórica (valores  $\gamma$ ) correspondiente a esas distancias con los parámetros proporcionados por el modelo esférico.

Y por último realizamos la predicción:  $\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i)$ .

En el proceso geoestadístico vamos a distinguir tres pasos: primero haremos un análisis exploratorio de los datos, para comprobar la consistencia de los mismos, eliminando los valores erróneos e identificando las distribuciones de las que proceden. Segundo, llevaremos a cabo un análisis estructural del ozono para ver su continuidad espacial mediante el cálculo del semivariograma experimental y el posterior ajuste de una función teórica que mejor explique su variabilidad espacial. Y por último, realizaremos las predicciones mediante el kriging ordinario, es decir, estimaremos valores de ozono en los puntos no muestrales teniendo en cuenta los pesos proporcionados por el modelo así como la estructura de correlación espacial de los datos.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Análisis exploratorio de los datos

Los histogramas y resúmenes estadísticos de los datos de ozono troposférico de la Comunidad de Madrid (Fig. 2) nos revelan que de los tres meses de verano, junio es el que tiene valores más bajos y julio el que los tiene más altos. Las medias de julio y agosto son idénticas. El gráfico (Fig. 3) que recoge los niveles de concentración de ozono de todas las estaciones, muestra que los observatorios que aparecen en la parte derecha del gráfico, desde la estación 35 (Chapinería) hasta la 42 (San Martín de Valdeiglesias), que son los que presentan valores más altos, están localizados en áreas alejadas de la gran ciudad, pertenecientes tanto a la zona norte como a la zona sur de la Comunidad de Madrid. Este hecho se pone también de manifiesto en el gráfico de tendencia (Fig. 4) donde la curva, resultante del ajuste de un polinomio de tercer grado, se hunde sobre los observatorios del casco urbano y se eleva hacia los extremos, tanto norte-sur como este-oeste, de la Comunidad.

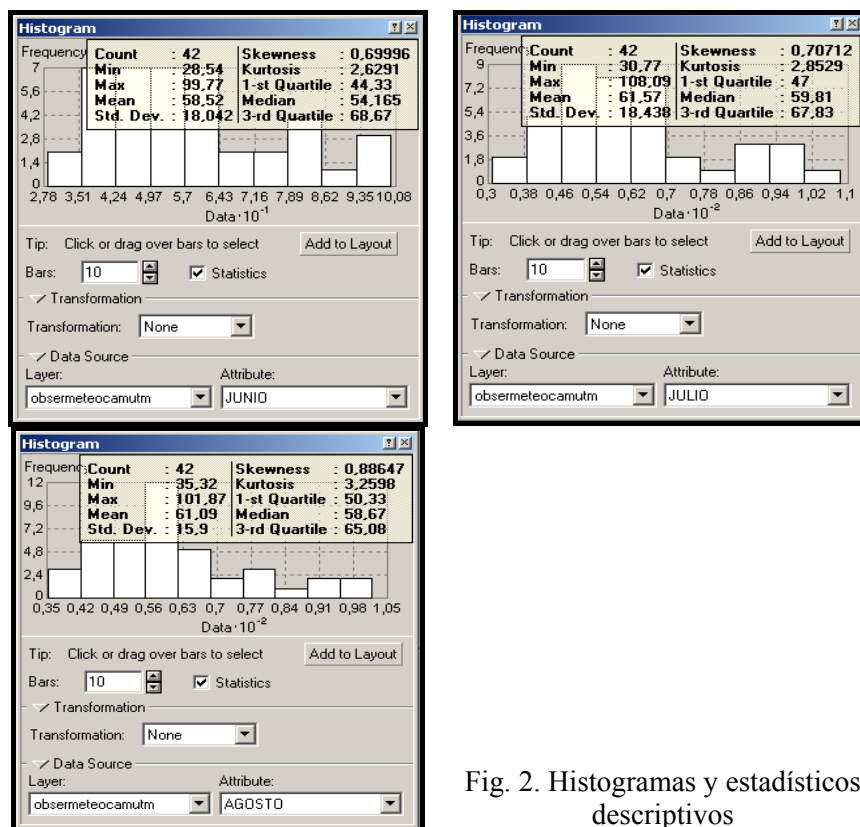


Fig. 2. Histogramas y estadísticos descriptivos

Estas diferencias espaciales observadas se explican por el proceso de formación y destrucción del ozono que se inicia al disociarse el NO<sub>2</sub> por la radiación solar en el ultravioleta cercano: NO<sub>2</sub>+ hv ( $\lambda < 430$  nanómetro) → NO+O; O<sub>2</sub>+ O → O<sub>3</sub>; NO + O<sub>3</sub> → NO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>. Mientras que el NO<sub>2</sub> contribuye a la formación de ozono, el NO lo destruye, formando oxígeno O<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>. Por esta razón, los niveles de ozono no son tan altos en los cascos urbanos donde se emite mayoritariamente NO, mientras que en las zonas periféricas el ozono se forma a partir de los precursores transportados desde la ciudad por los vientos dominantes, sin embargo no se destruye del mismo modo, dando lugar a la formación de altas concentraciones (FERNÁNDEZ, 2001, FERNÁNDEZ y RASILLA, 1999).

Recordemos que el ozono es un contaminante secundario que se forma a partir de contaminantes primarios, llamados precursores, como los óxidos de nitrógeno (NO) y los compuestos orgánicos volátiles (COVs) cuando éstos reaccionan con la radiación solar ultravioleta de longitud de onda inferior o igual a 420 nm. Es por lo que en las épocas de mayor radiación solar, cuando sus niveles alcanzan las cifras más elevadas (AYUNTAMIENTO DE MADRID, 2001 y 2002). Sin embargo, el tiempo y la topografía también pueden afectar a la contaminación por ozono. La lluvia puede eliminar de la atmósfera los contaminantes que originan la contaminación por ozono y el viento puede arrastrar y dispersar los contaminantes. En el caso de la Comunidad de Madrid, la presencia de la Sierra al noroeste puede llegar a retener estos contaminantes al ser arrastrados por los vientos de componente este o sureste dominantes en la estación cálida, aumentando en estos sectores los niveles de ozono.

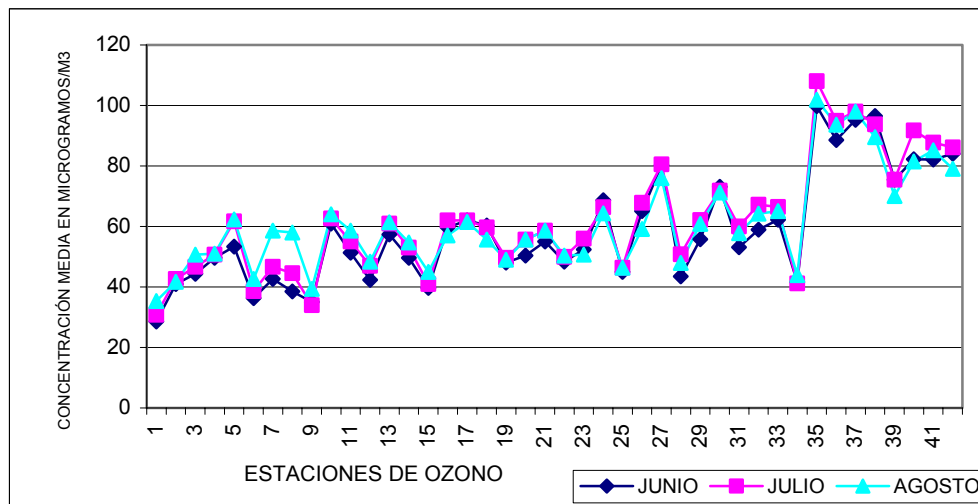


Fig. 3. Relación de estaciones y concentraciones de ozono durante los meses de verano

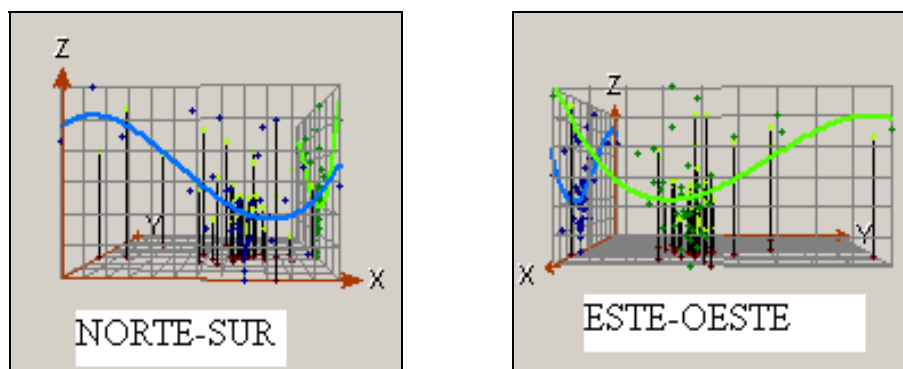


Fig. 4. Gráfico de tendencia del ozono durante julio

El análisis exploratorio del semivariograma nos permite comprobar que las estaciones más próximas presentan un mayor grado de similitud en sus semivarianzas (Fig. 5) y que éstas aumentan a medida que se incrementa la distancia entre los puntos (Fig. 6). Aunque también observamos que algunas estaciones a pesar de estar muy distantes son muy parecidas en cuanto a su semivarianza (Fig. 7).

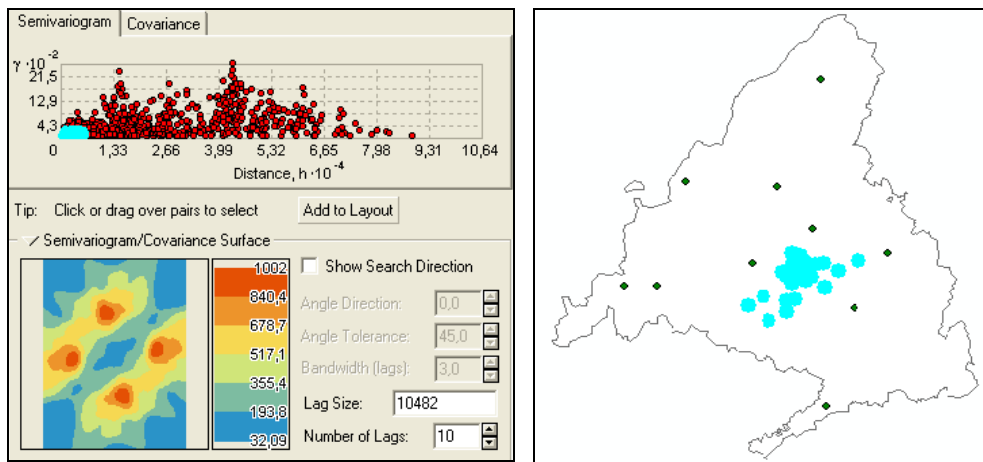


Fig. 5. Localización sobre el semivariograma y sobre el mapa de las estaciones con valores más bajos de semivarianza

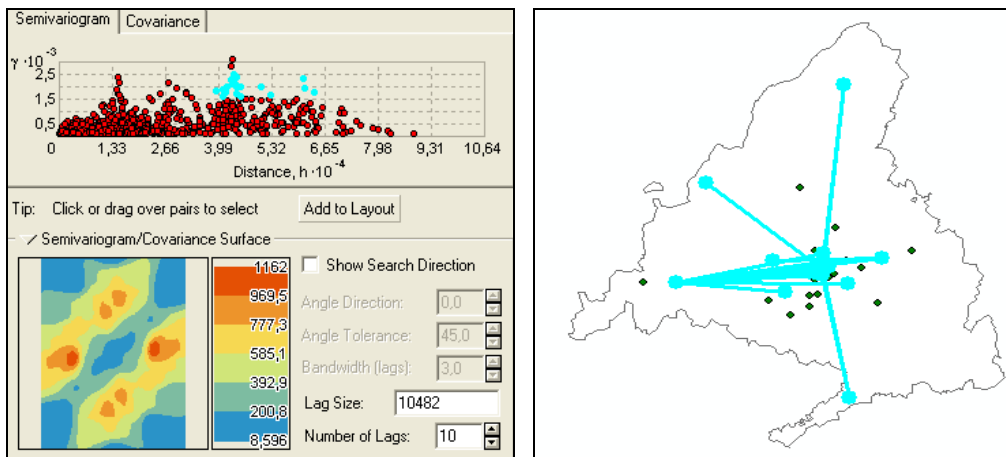


Fig. 6. Localización de los observatorios separados por mayores distancias y con valores gamma más altos

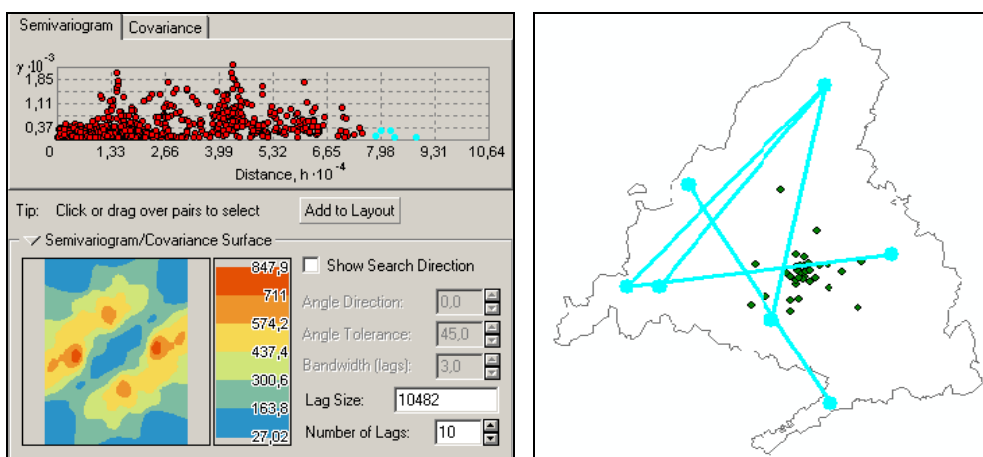
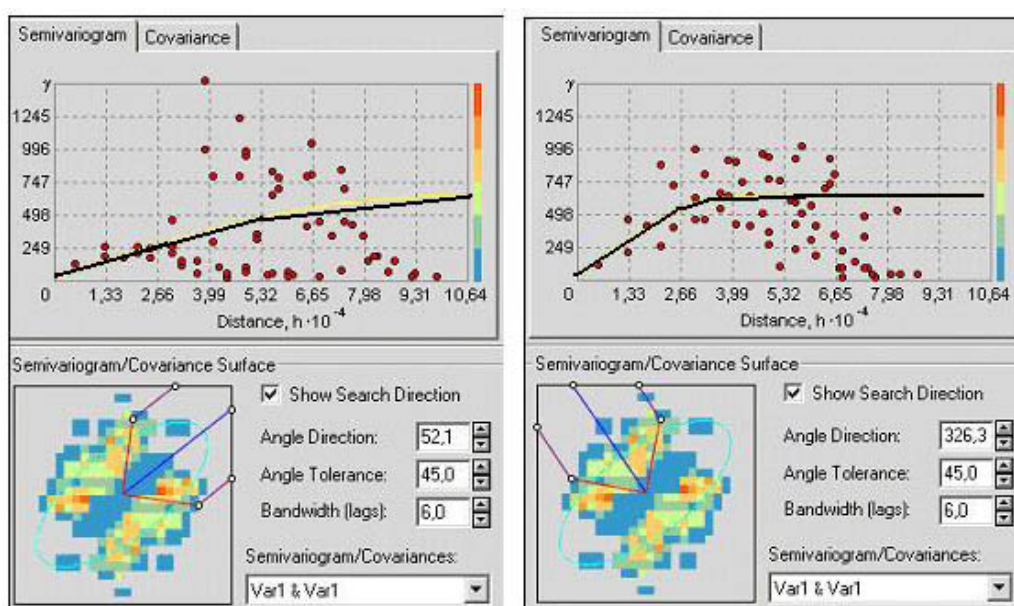


Fig. 7. Semivariograma de estaciones muy distantes pero con semivarianzas pequeñas

### 3.2. Análisis estructural: estimación del semivariograma experimental y teórico

La construcción del semivariograma experimental la realizamos con un intervalo de distancia de 8735 m (*lag size*), con una tolerancia en la distancia de  $\pm 6$  y una tolerancia en la dirección de  $\pm 45^\circ$ . El número de intervalos en que hemos agrupados las distancias han sido 12. Hemos comprobamos que el ozono no tiene un comportamiento isotrópico; es decir, que la nube de puntos del semivariograma cambia según la dirección elegida. La continuidad espacial del ozono es mayor en dirección noreste-suroeste que en dirección noroeste-sureste donde la variable cambia más rápidamente de valor en distancias reducidas. El modelado del semivariograma lo realizamos mediante el ajuste del modelo esférico pero teniendo en cuenta el comportamiento anisotrópico de la variable. La anisotropía existente se puede considerar zonal porque los variogramas direccionales presentan diferentes mesetas y alcances (CHICA OLMO, 1994). Según los parámetros obtenidos (Tabla 1) la meseta se estabiliza a mucha más distancia (96 km) siguiendo la dirección del eje mayor de la elipse (NE), donde la pendiente de la curva es mucho más suave (Fig. 8). Por el contrario la meseta se alcanza mucho antes siguiendo el eje más corto (NW), en cuya dirección la pendiente de la curva es mucho más acusada (Fig. 9).



Figs. 8 y 9. Ajuste del modelo esférico según el alcance mayor (izquierda) y según el alcance menor (derecha)

Tabla 1. Parámetros del modelado del semivariograma

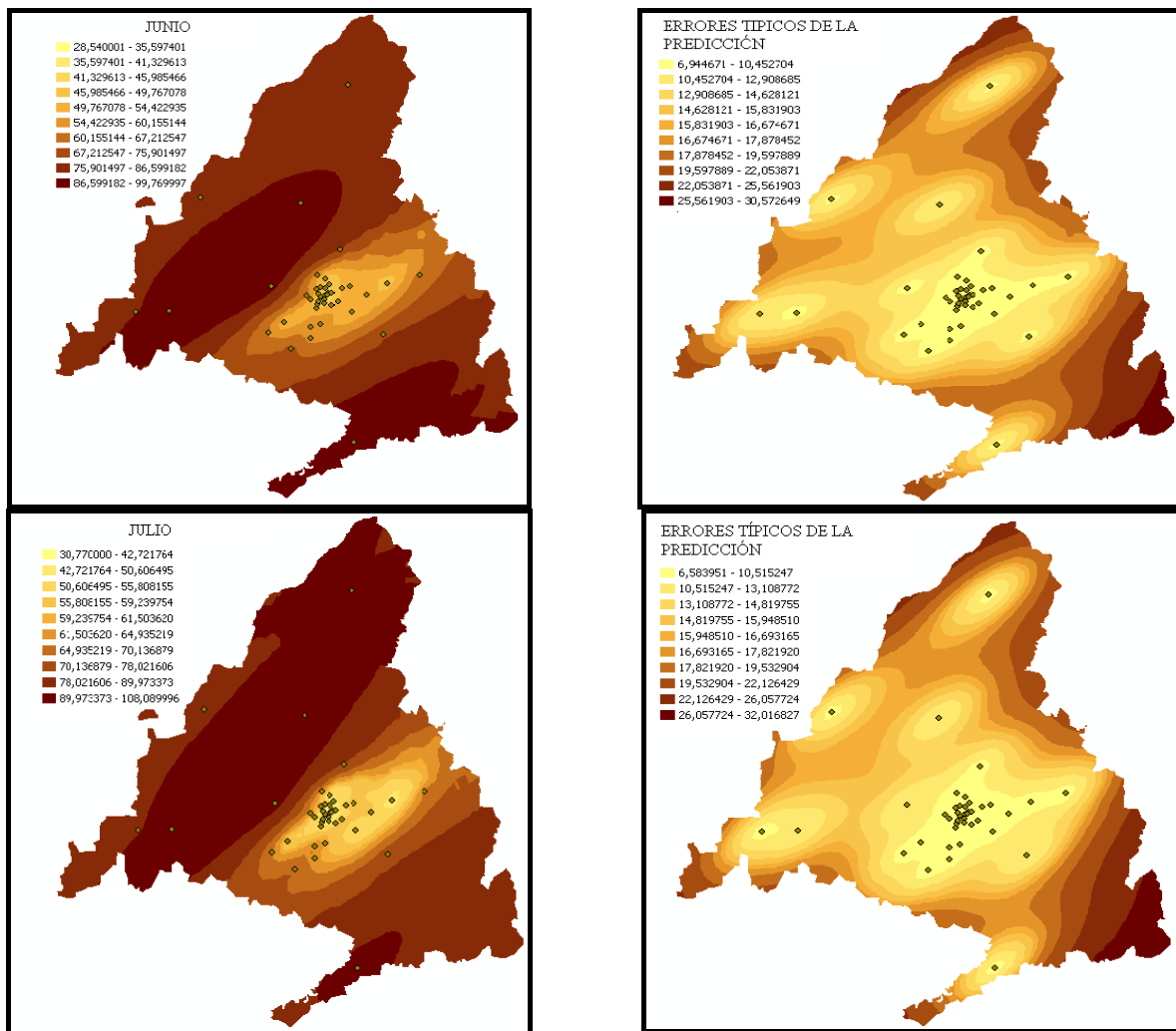
	Junio	Julio	Agosto
Meseta	579	635	453
Alcance mayor	96	96	96
Alcance menor	37	41	36
Efecto pepita	32,5	27,6	17,2
Dirección	58	52	48



### 3.3. Estimación del ozono en la Comunidad de Madrid

La estructura espacial descrita en los semivariogramas será tenida en cuenta para determinar los pesos ( $\lambda_i$ ) usados en el proceso de interpolación llevado a cabo por el kriging ordinario. El resultado queda plasmado en los mapas de ozono para los tres meses del verano (Fig. 10).

Los tres mapas reflejan a grandes rasgos una distribución espacial del ozono semejante. Las concentraciones más bajas aparecen en las estaciones del casco urbano y a medida que nos alejamos hacia la periferia comienzan a aumentar, alcanzándose los valores máximos en los observatorios ubicados en la rampa de la Sierra y también al sur de la Comunidad de Madrid. Este hecho lo podemos explicar por una combinación de procesos. Por un lado, el proceso de formación y destrucción del ozono y, por otro, por la dinámica atmosférica característica de la estación cálida que influye en la circulación regional.



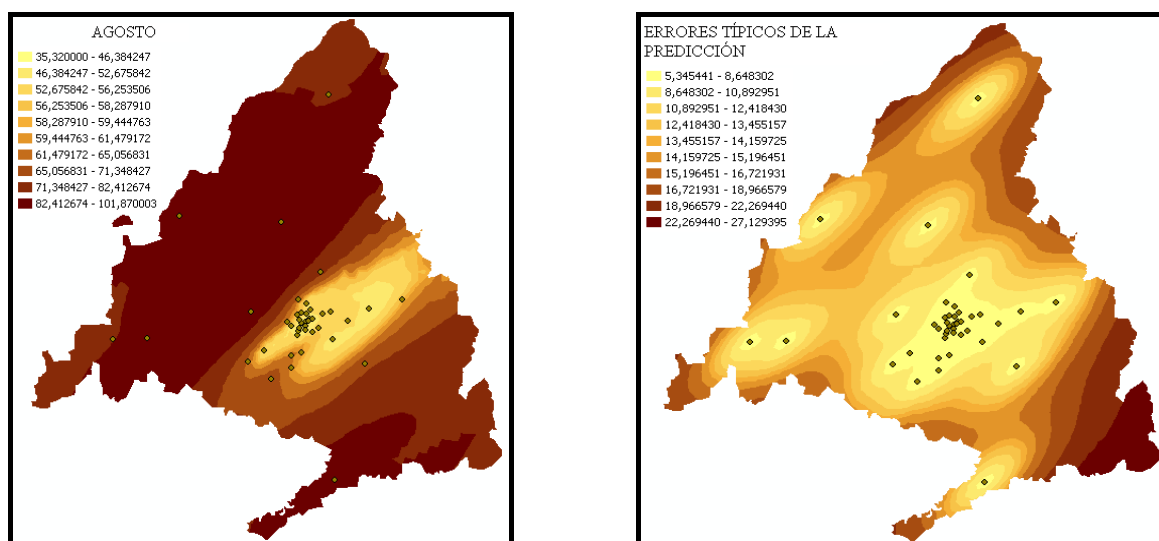


Fig. 10. Mapas de predicciones de ozono y de errores estimados de las mismas

Como han puesto de manifiesto varios autores (FERNÁNDEZ, 2001; FERNÁNDEZ y RASILLA, 1999; CASTELL y MANTILLA, 2002) durante el verano se repiten de modo sistemático dos tipos de situaciones sinópticas: dorsal cálida sobre el Atlántico y parte de Europa, que se corresponde con un centro de altas presiones en superficie desencadenante de una gran estabilidad atmosférica, con vientos del noreste sobre nuestra región; y formación de una baja térmica relativa sobre el interior de la Península, consecuencia del intenso calentamiento superficial que se produce bajo la influencia de una cresta norteafricana que canaliza aire tropical continental que llega a nuestra región como viento del sur o sureste. Ambos tipos de vientos son los que transportan los precursores del ozono hacia las zonas alejadas de la gran urbe, donde junto con las altas temperaturas y la radiación solar reaccionan y forman  $O_3$  no habiendo suficientes óxidos de nitrógeno para su destrucción. Por el contrario en las estaciones del casco urbano madrileño los niveles de ozono son mucho menores (AYUNTAMIENTO DE MADRID, 2002) ya que a la vez que se crea el ozono troposférico también se destruye por la mayor presencia de estos compuestos creados por el tráfico de las ciudades.

### 3.4. Validación del modelo

La validación del modelo de semivariograma la realizamos mediante el método de validación cruzada (*cross-validation*) que consiste en utilizar las ecuaciones del kriging de modo retrospectivo. De modo secuencial se suprime cada dato  $z(x_i)$  del análisis y se predice con el resto de los datos. Después se calculan para cada punto las diferencias entre el valor pronosticado y el observado ( $\hat{z}(x_i) - z(x_i)$ ). Así se obtienen los errores de la predicción. El análisis de estos errores mediante ciertos estadísticos y gráficos, proporciona una medida de la bondad de ajuste del modelo usado para la estimación (Tabla 2).

Tabla 2. Estadísticos de los errores de la predicción de junio, julio y agosto

	Junio	Julio	Agosto
Media de los errores	-1,33	-0,97	-0,8
Media tipificada	-0,04	-0,02	-0,02
Error cuadrático medio	11,15	10,77	10,28
Error típico medio	12,47	12,42	10,57
Error cuadrático medio tipificado	1,08	1,08	1,25

Cuanto más próximas a cero sean la media de los errores y la media tipificada menos sesgadas serán las predicciones. El error cuadrático medio cuanto más pequeño más se aproxima el valor de la predicción al valor real. Para valorar la variabilidad de la predicción se utiliza el error típico medio que tiene que estar próximo al error cuadrático medio para que la variabilidad sea la correcta. Sería similar decir que el error cuadrático medio tipificado tiene que estar próximo a 1. Junto con los mapas de valores pronosticados adjuntamos los mapas de los errores típicos de la predicción (Fig. 10). Igualmente podemos observar los gráficos de dispersión de valores observados frente a valores pronosticados y de los errores tipificados frente a valores observados correspondientes al mes de julio (Fig. 11).

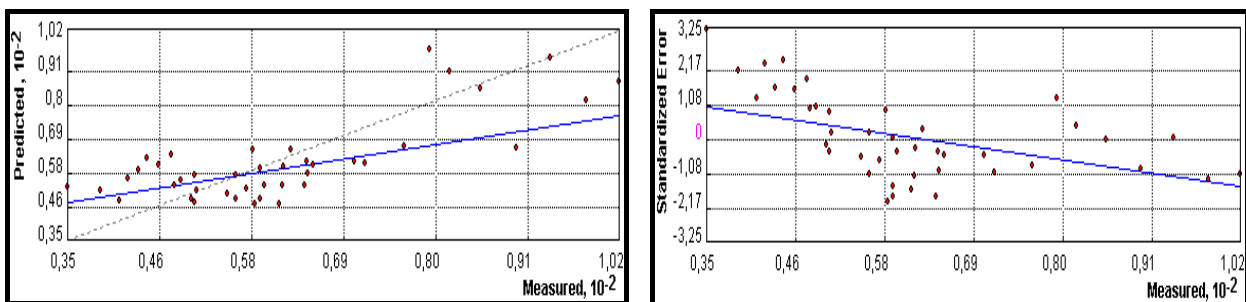


Fig. 11. Valores pronosticados frente a valores observados (izquierda) y errores tipificados frente a valores observados (derecha)

#### 4. CONCLUSIONES

La consideración de los métodos geoestadísticos junto con la utilización de un Sistema de Información Geográfica nos han permitido realizar una cartografía del ozono en los veranos de la Comunidad de Madrid. El método de interpolación empleado ha sido el kriging ordinario que además de ser un estimador lineal e insesgado hace mínima la varianza del error de estimación. El análisis espacial de los resultados nos muestra que las concentraciones de ozono más elevadas aparecen en zonas rurales y las más bajas en los observatorios situados en el interior del centro urbano. La explicación de esta diferenciación espacial responde a mecanismos de circulación regional típicos de la estación cálida y al proceso fotoquímico de formación y destrucción de este contaminante.

## 5. REFERENCIAS

- AYUNTAMIENTO DE MADRID. *Informe ozono 2002*. Departamento de calidad ambiental.  
<http://www.mambiente.munimadrid.es/>
- CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE DE LA COMUNIDAD DE MADRID. *Memoria de calidad ambiental*. <http://medioambiente.madrid.org/>
- BURROUGH, P.A. (2001). "GIS and geostatistics: essential partners for spatial analysis". *Environmental and Ecological Statistics*, 8, pp. 361-377.
- CAÑADA TORRECILLA, R. (2004). Modelado de la variabilidad espacial del ozono en la Comunidad de Madrid. En: *Clima y Cartografía: representación gráfica y modelización como base de la investigación climática*. Grupo de Climatología de la AGE, (en prensa).
- CHICA OLMO, M. y LUQUE ESPINAR, J.A. (2002). Interpolación espacial en la creación de cubiertas temáticas en SIG. En: HUERTA, L. (Ed.). *Los SIG en la gestión de los riesgos geológicos y el medio ambiente*. IGME, pp. 181-198.
- FERNÁNDEZ, F. (2001). Clima y calidad ambiental en las ciudades: propuesta metodológica y su aplicación al área de Madrid. En: RASO, J. M. y MARTÍN, J. (Eds.). *Proyectos y métodos actuales en Climatología*. AEC, Serie B, 1, pp. 41-66.
- FERNÁNDEZ, F. y RASILLA, D. (1999). Concentraciones de ozono y tipos de tiempo en el área metropolitana de Madrid. En: *Actas del VIII Coloquio Ibérico de Geografía*, vol. I, Lisboa, p. 31.
- GOOVAERTS, P. (2000). "Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall". *Journal of Hydrology*, 228, pp. 113-129.
- HAINING, R. (2003). *Spatial data analysis*. Cambridge University Press, Cambridge, part C, pp.181-272.
- JOHNSTON *et al.* (2001). *Using ArcGIS geostatistical analyst*. ESRI, Nueva York, 300 pp.
- LIXIN, L. y REVESZ, P. (2003). "Interpolation methods for spatio-temporal geographic data". *Computers, Environment & Urban Systems*, 28, pp. 201-227.
- MOLLER, J.(2003). *Spatial statistics and computational methods*. Springer, 220 pp.
- STEIN, M.L. (1999). *Interpolation of spatial data. Some theory for kriging*. Springer, Nueva York, 247 pp.
- VICENTE SERRANO, S. y SAZ SÁNCHEZ, M. A. (2002). "Cartografía de las precipitaciones y temperaturas en el valle medio del Ebro mediante la utilización de diferentes técnicas estadísticas". *Geographicalia*, 42, pp. 73-92.
- WEBSTER, R. y OLIVER, M.A. (2001). *Geostatistics for Environmental Scientists*. John Wiley and Sons Ltd, Chichester, 271 pp.