

# Análisis estructural: punto de partida de todo estudio geoestadístico

## The Structural Analysis: First Stage in Geostatistical Study

José Quintín Cuador Gil<sup>1</sup>  
Arelis Quintero Silverio<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Profesor Asistente. Departamento de Computación. Universidad de Pinar del Río.  
<sup>2</sup>Profesor Asistente. Departamento de Matemática Universidad de Pinar del Río.

**RESUMEN:** El término Geoestadística fue concebido bajo la idea de minimizar la varianza del error de estimación, a partir de un conjunto de muestras representativas de la realidad. Entre las etapas de un estudio geoestadístico, se presenta como primera y fundamental el análisis estructural, en el cual se debe obtener un modelo de variograma y los parámetros meseta y alcance, que representan fielmente las características de variabilidad y correlación del fenómeno estudiado, resultado del cálculo del semivariograma experimental y el ajuste a este de modelos teóricos autorizados. En este artículo se presentan los elementos fundamentales a tener en cuenta en la realización del análisis estructural, la teoría y un algoritmo para el cálculo del semivariograma experimental como útil más importante para la realización del análisis de variabilidad de la información base, así como los modelos teóricos más usados en la práctica actual.

**Palabras claves:** Geoestadística, análisis estructural, variograma experimental, algoritmo.

**ABSTRACT:** The term Geostatistics was conceived under the idea of minimizing the variance of the error estimation, from a set of representative samples of reality. Among stages of a Geostatistical study, the Structural Analysis is presented as the first and main one, in which a variogram model and its Sill and Range parameters should be obtained, for faithfully represent the variability and correlation characteristics of the studied phenomenon. Resulting from the Experimental Semivariogram calculation and the adjustment of theoretical authorized model. The main aspects to be taking into account during an Structural Analysis are introduced, the theory and an algorithm for the Experimental Semivariogram calculation, as the most important tool for the realization of the variability analysis of the basic information, such as the theoretical models most commonly used in the everyday practice are shown in this article.

**Keywords:** Geostatistic, structural analysis, experimental variogram, algorithm.

### INTRODUCCIÓN

En el transcurso de los veinticinco últimos años, la geoestadística ha probado su superioridad entre tantos métodos de estimación de reservas en numerosos tipos de minas (Armstrong y Carignan, 1997). Además de su reciente aplicación a otros campos, como por ejemplo: en la industria del petróleo (Galli, 1997), en la meteorología, la topografía, la cartografía (Chauvet, 1994), en estudios ambientales (Myers, 1988), etcétera.

Las etapas fundamentales de un estudio geoestadístico son: 1. El análisis estructural, 2. La estimación o simulación, 3. El tratamiento de los resultados geoestadísticos (Chica-Olmo, 1987).

En la primera etapa se calculan los variogramas experimentales en distintas direcciones a los que se ajustan posteriormente modelos teóricos, obteniéndose de esta forma las características de variabilidad espacial del fenómeno estudiado.

La segunda es el objetivo básico de la geoestadística, con el cual se puede evaluar al predecir el fenómeno estudiado en todo el dominio.

La tercera etapa consiste en el análisis de los resultados obtenidos y su tratamiento adecuado.

De las etapas anteriores merece especial atención la primera, el análisis estructural, por ser el punto de partida de todo estudio geoestadístico, estudio que tiene como herramienta fundamental al variograma, que representa el

útil más importante del geoestadístico, porque aporta información sobre la continuidad de la variable, sobre la presencia de anisotropía, y sobre la existencia de derivas (Chica-Olmo, 1987).

### EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL

El análisis estructural o estudio variográfico según (Armstrong, y Carignan, 1997) está compuesto por:

- El conocimiento de problema y la verificación preliminar de los datos.
- El cálculo del semivariograma experimental.
- El ajuste a este de un modelo teórico conocido.

Una vez instalados los datos, es necesario que se controlen integralmente a fin de verificar de una parte su exactitud y de otra parte su representatividad, esto significa que todos los errores numéricos deben corregirse y que las estadísticas elementales estén calculadas, pero aún más, es importante que el geoestadístico esté familiarizado con los datos y el problema a resolver (Armstrong, y Carignan, 1997). Al comienzo del estudio es importante discutir todos los elementos necesarios a fin de saber: tipos de procedimientos de medición empleados, si se produjeron cambios en estos, si la zona es geológicamente homogénea o si en ellas hay presencia de fallas grandes, si la zona de valores grandes ha estado privilegiada por las mediciones.

El cálculo del semivariograma experimental es la herramienta geoestadística más importante en la determinación de las características de variabilidad espacial del fenómeno estudiado, es decir, tener conocimiento de como la variable cambia de una localización a otra (Lamorey y Jacobson, 1995), representando el útil más importante de que dispone el geoestadístico para el análisis del fenómeno mineralizado (Chica-Olmo, 1987) o de la variable de distribución espacial en estudio, teniendo como condicionantes: la distribución estadística, la existencia de valores aberrantes o anómalos, la presencia de zonas homogéneas o posibles zonaciones en la distribución de las leyes.

Puede ser calculado inicialmente el semivariograma medio u "omnidireccional", proporcionando una idea aproximada de la variabilidad espacial de los datos.

Posteriormente deben ser calculados semivariogramas en diferentes direcciones, más exactamente, pueden ser calculados, en cuatro direcciones separadas 45°, comenzando por 0° (Figura 1a) hasta encontrar la dirección de máxima o mínima variabilidad (Figura 1b). Una forma rápida y práctica de visualizar la existencia de anisotropía es mediante el cálculo del "Mapa de Variogramas" (Frykman y Rogon, 1993), el cual además permitirá obtener la dirección inicial aproximada para el cálculo de los semivariogramas, permitiendo un análisis de anisotropía adecuado que, en ocasiones, dependiendo de como se presenta la información base, es sufi-

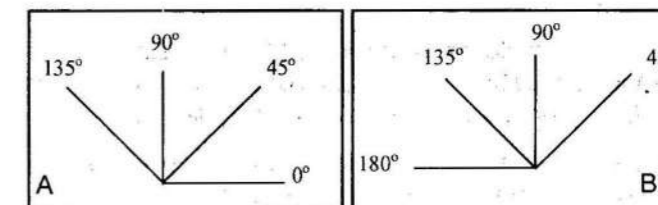


FIGURA 1: Direcciones para el cálculo de los variogramas, a) comenzando en 0°, b) comenzando en 45°.

ciente con solo calcular dos semivariogramas separados 90°.

Posteriormente, el semivariograma experimental obtenido no puede ser utilizado en el proceso de estimación, debe ser ajustado a este un modelo teórico, esto se debe a que el variograma utilizado en el proceso de estimación o simulación debe satisfacer ciertas condiciones, es decir tiene que ser "definido positivo" o de "tipo positivo", sino puede existir el riesgo de encontrar varianzas negativas que no tienen sentido (Armstrong y Carignan, 1997). En general el ajuste a modelos teóricos para la determinación de los parámetros del semivariograma se realiza de forma visual. En ocasiones se efectúan ajustes polinomiales por el método de los mínimos cuadrados, que aunque se encuentra el mejor ajuste, no siempre se verifica la condición de que el variograma obtenido sea siempre de tipo positivo, por lo que se recomienda el uso de modelos autorizados. Finalmente, debe obtenerse uno o varios modelos de variogramas con los correspondientes valores de meseta y alcance, y el modelo de variograma seleccionado debe representar fielmente los aspectos que se suponen importantes del variograma experimental (Wackernagel, 1995), que serán usados posteriormente en el proceso de estimación o simulación.

### EL SEMIVARIOGRAMA EXPERIMENTAL

El variograma se define como la media aritmética de todos los cuadrados de las diferencias entre pares de valores experimentales separados una distancia  $h$  (Journel y Huijbregts, 1978), o lo que es lo mismo la varianza de los incrementos de la variable regionalizada en las localizaciones separadas una distancia  $h$ .

$$\text{Var}\{Z(x+h)-Z(x)\} = 2\gamma(h)$$

La función  $\gamma(h)$  se denomina semivariograma, el cual puede ser obtenido por la expresión.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N_p(h)} \sum_{i=1}^{N_p(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

donde:  $N_p(h)$  es el número de pares a la distancia  $h$ .  
 $h$  es el incremento  
 $Z(x_i)$  son los valores experimentales  
 $x_i$  localizaciones donde son medidos los  $z(x_i)$

El cálculo de la función  $\gamma(h)$  no consiste en una simple evaluación de la expresión (1), esta operación está relacionada con los elementos siguientes:

- La dirección en la que será calculado el semivariograma, uno o dos ángulos que definen una dirección en el espacio a con una tolerancia angular  $d\alpha$ . El semivariograma calculado usando tolerancia angular de  $90^\circ$  se denomina "semivariograma medio" u "omnidireccional".
- El incremento o paso en el cálculo del semivariograma  $h$  y su tolerancia lineal  $dh$ , el cual se recomienda que sea la mitad del incremento.
- Una distancia, que representa la distancia máxima a que pueden estar alejados los segundos puntos del par con respecto a la línea que define la dirección de cálculo.
- La distancia hasta la cual será calculado del semivariograma  $L$ . Se recomienda que esta distancia sea la mitad de la distancia máxima entre las muestras (Armstrong y Carignan, 1997; Krajewski y Gibbs, 1993), aunque dependiendo de la geometría del fenómeno regionalizado en algunos casos es recomendable su cálculo hasta una distancia superior.

Definidos los elementos anteriores, se evalúa la expresión (1) para todos los pares de localizaciones separadas a la distancia  $h$  que cumplan las siguientes condiciones:

1. La distancia entre las localizaciones  $x_i$  y  $x_i+h$  sea mayor que  $h-dh$  y menor que  $h+dh$ , o lo que es lo mismo, que el segundo punto del par esté incluido en el espacio definido por  $h-dh$  y  $h+dh$  encontrándose el primer punto del par en el origen  $o$ . (Figura 2).

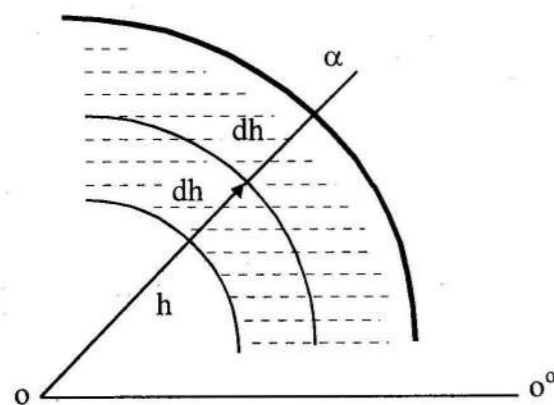


FIGURA 2. Espacio definido por la tolerancia lineal.

2. El ángulo formado entre la línea que une los dos puntos del par y la dirección  $0^\circ$  debe estar incluido entre  $\alpha-d\alpha$  y  $\alpha+d\alpha$ . (Figura 3).
3. La distancia entre el segundo punto del par y la línea que define la dirección de cálculo del semivariograma no debe superar cierta distancia, denominada Ancho de Banda (Deutsch y Journel, 1992). (Figura 4).

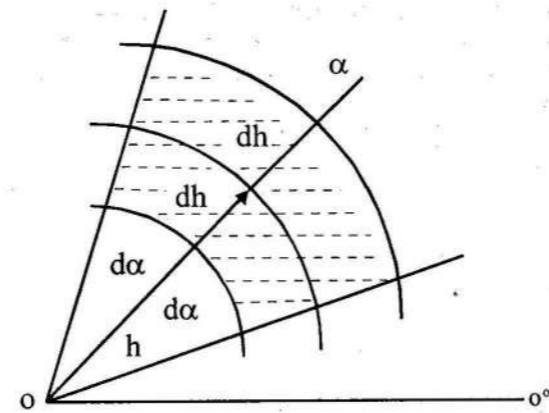


FIGURA 3. Espacio definido por la tolerancia lineal y angular.

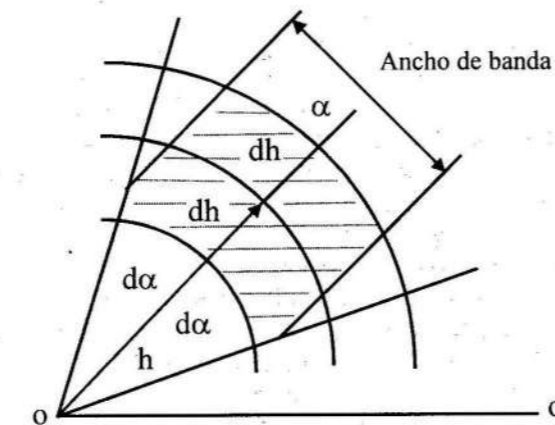


FIGURA 4. Espacio definido por las tolerancias y el ancho de banda.

Finalmente se representan gráficamente los valores de  $\gamma$  en función de  $h$ .

El gráfico de  $\gamma(h)$  tiene las siguientes características según (Armstrong y Carignan, 1997; Krajewski y Gibbs, 1993) (Figura 5).

- Pasa por el origen (para  $h=0$ ,  $g(h)=0$ )
- Es en general una función creciente de  $h$ .
- En la mayor parte de los casos, crece hasta cierto límite llamado meseta, puede en otros casos crecer indefinidamente.

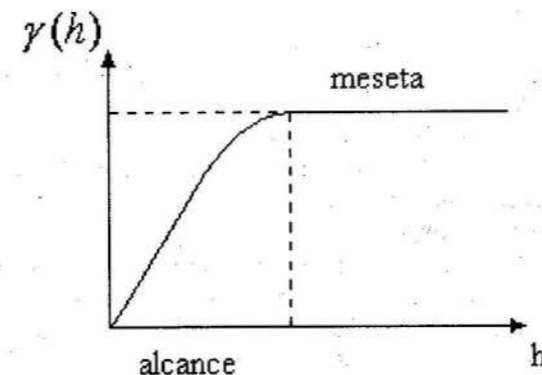


FIGURA 5: Forma típica del variograma.

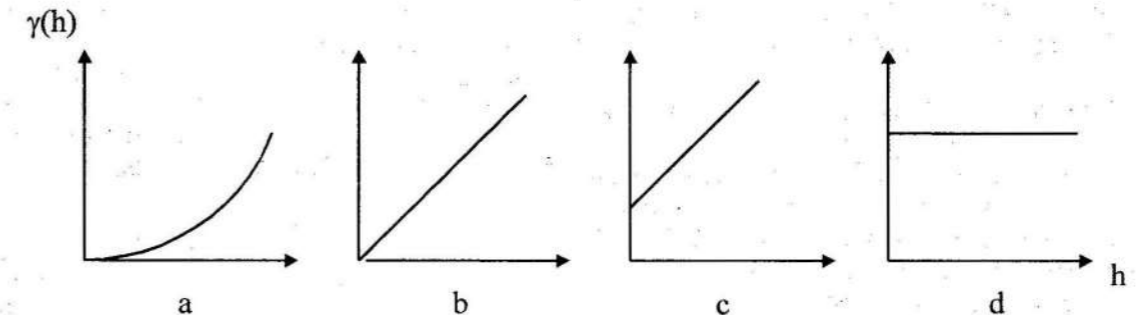


FIGURA 6. Comportamiento del variograma en el origen, a) Parábólico, b) Lineal, c) Efecto de pepita, d) Discontinuo puro.

Puede tener diferentes comportamientos en el origen como son, según (Armstrong y Carignan, 1997; Journel y Huijbregts, 1978) (Figura 6).

- a) **Parabólico:** Caracteriza a una variable muy regular, siendo continua y diferenciable.
- b) **Lineal:** Caracteriza a una variable continua, pero no diferenciable, es decir menos regular.
- c) **Discontinuidad en el origen:** "Efecto de pepita", es el caso en que  $\gamma(h)$  no tiende a cero cuando  $h$  tiene a cero. Representa a una variable muy irregular.
- d) **Discontinuo puro:** llamado también ruido blanco, representa el caso de mayor discontinuidad, siendo el caso límite de ausencia de estructura, donde los valores de dos puntos cualesquiera no tienen correlación alguna.

### CONSTRUCCIÓN DEL SEMIVARIOGRAMA EN DOS DIMENSIONES 2D

Sea  $Z(x)$  una función aleatoria con  $n$  variables aleatorias regionalizadas  $Z(x)$  donde  $x=\{x, y\}$  es la localización y  $Z(x_i)$  es el valor medido correspondiente. Dados una dirección a través de un ángulo  $\alpha$  en la cual se desea calcular el semivariograma, da una tolerancia angular,  $dh$  una tolerancia lineal y el ancho de banda.

Se proponen los siguientes pasos:

1. Calcular la cantidad de pares posibles por:  $N_p = N(N+1)/2$
2. Para cada par, calcular la distancia entre las localizaciones correspondientes por:

$$d_i = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2} \quad i = 1, \dots, N_p$$

almacenando para cada  $i$ :

- P1: Número del primer punto del par,
- P2: Número del segundo punto del par,
- $d$ : Valor de la distancia.
- Ángulo  $\alpha'$ , que fija la dirección de la recta que pasa por los dos puntos del par en dos dimensiones.

3. Ordenar ascendente por la distancia el grupo de datos anteriores.
4. Calcular la amplitud máxima del semivariograma  $L$  como  $L = D_{m\acute{a}x}/2$ , donde  $D_{m\acute{a}x}$  es la distancia a que están separados el par de localizaciones mas lejanos,

la máxima distancia calculada en el paso (2), o lo que es lo mismo el último valor después del ordenamiento del paso anterior.

5. Fijar una distancia  $h$  inicial, para los múltiplos de esta distancia, será calculada  $\gamma(h)$ , por la expresión (1). Se recomienda que esta distancia sea la décima parte de  $L$  calculado en el paso (4).
6. Calcular la expresión (1) para todos los pares almacenados en el paso (2) que cumplan las condiciones siguientes:
  - a) Que la distancia  $d$ , sea mayor que  $h-dh$  y menor que  $h+dh$ , es decir  $h-dh \leq d \leq h+dh$ . Si esta condición se cumple examinar la condición b, de lo contrario continuar con la distancia siguiente.
  - b) Que el ángulo  $\alpha'$ , formado entre las líneas que parten del primer punto del par en la dirección  $0^\circ$  y la que pasa por los dos puntos del par en la dirección positiva, es decir, en contra de la manecillas del reloj, sea mayor que  $\alpha-d\alpha$  y menor que  $\alpha+d\alpha$ , es decir  $\alpha-d\alpha \leq \alpha' \leq \alpha+d\alpha$ . Si esta condición se cumple examinar la condición c, de lo contrario continuar con la distancia siguiente.
  - c) Que la distancia entre el segundo punto del par y la línea que pasa por el primer punto en la dirección a no supere el ancho de banda.

Observaciones:

- Note que como los datos almacenados en el paso (2) están ordenados ascendentemente por la distancia, este paso se interrumpe cuando la distancia siguiente sea mayor que  $h+dh$ , y aquí precisamente comienza la próxima iteración.
- Al interrumpir este paso calcular (1) con los que cumplieron las condiciones a, b y c, así obtenemos un valor de  $\gamma(h)$  correspondiente al incremento  $h$  actual.

7. Incrementar la distancia  $h$  en su propio valor, es decir  $h$  será el próximo múltiplo del  $h$  inicial.

Si el nuevo valor de  $h$  no supera el valor de  $L$ , regresar al paso (6) de lo contrario continuar el siguiente paso.

8. Al finalizar el paso (7) debemos tener para cada valor transitado por  $h$  un valor de  $\gamma(h)$  calculado, los cuales serán ploteados en un gráfico X-Y donde la abscisa representa los valores de  $h$  y en la ordenada los valores de  $\gamma(h)$ . Obteniendo así el semivariograma empírico.

**CONSTRUCCIÓN DEL SEMIVARIOGRAMA EN TRES DIMENSIONES 3D**

En la construcción del semivariograma 3D es necesario según (Journel y Huijbregts, 1978) incorporar a la dirección del cálculo un nuevo ángulo  $\beta$  que permita unido al ángulo  $\alpha$  fijar una dirección en el espacio tridimensional, el ángulo  $\beta$  debe variar entre  $-90^\circ$  y  $90^\circ$ , teniendo en cuenta que los valores extremos coinciden con la dirección vertical y son independientes de la dirección del ángulo  $\alpha$ .

La construcción del semivariograma 3D es similar al 2D con cambios en dos de sus pasos presentados anteriormente:

- En el paso 2: el calculo de la distancia se sustituye por:

$$d_i = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2}$$

y almacenar para cada  $i$  además: Otro ángulo  $\beta'$ , que fija junto al ángulo  $\alpha'$  la dirección de la recta que pasa por los dos puntos del par en tres dimensiones.

- En el paso 6: en el punto b de este paso la dirección que contiene a los dos puntos del par debe estar incluida en el ángulo sólido formado por la dirección del cálculo del semivariograma y la tolerancia  $d\alpha$ , con centro en el primer punto del par.

Aún cuando teóricamente el semivariograma puede ser calculado en tres dimensiones, teniendo en cuenta la estructura geológica y la forma fragmentaria en que se presenta la información de exploración, en el caso particular de la minería, testigos contiguos del orden de 1 m de longitud y pozos distanciados decenas de metros, no es conveniente calcular el variograma 3D, es más razonable calcular variogramas verticales según los sondeos de exploración, y variogramas horizontales con los valores medios de niveles definidos atendiendo a la geología de la zona de estudio, la razón es que, la variabilidad a través de los estratos es diferente a la variabilidad en los estratos (Armstrong, y Carignan, 1997).

**PROBLEMAS PARA EL CÁLCULO DEL SEMIVARIOGRAMA**

De lo expresado hasta aquí, además de la experiencia en la lectura y estudio en muchos textos de Geoestadística, se puede tener la impresión de que es fácil el cálculo del semivariograma experimental (Armstrong, 1984). La fuente de problemas que se pueden presentar en la realización de un análisis estructural es muy variada, lo que esta en correspondencia con la variedad de casos que se presentan en la naturaleza.

Algunos de los problemas más comunes discutidos en (Armstrong, 1984) son:

*El valor idóneo del incremento h:* una inadecuada selección de  $h$  puede proporcionar un semivariograma errático, aunque no se puede dar un criterio exacto o aproximado sobre cual es el mejor valor de  $h$ , es recomendable recalcular  $\gamma(h)$  para distintos valores de  $h$ , hasta encontrar una forma suavizada del mismo.

*Distribuciones con valores extremos:* La existencia de valores extremos, altos o bajos, en una distribución, puede conducir a la obtención de un variograma fuertemente errático, en este caso la solución puede ser simple, eliminar los datos extremos, porque pueden ser ocasionados por errores, en otros casos pueden encontrarse en zonas geográficamente distintas, y pueden ser tratados de manera separada.

Una herramienta útil para la detección de valores extremos y encontrar el incremento adecuado puede ser, calculando la "nube de variogramas" (Chauvet, 1982), el cual consiste en representar los valores de  $[Z(x_i+h) - Z(x_i)]^2/2$  contra  $h$ , para cada par posible de la información inicial.

*La existencia de poblaciones mixtas:* Existen datos que pueden mostrar diferentes poblaciones, los cuales pueden estar estadísticamente diferenciados, en muchos casos las poblaciones están geográficamente diferenciadas, donde se recomienda tratar las zonas separadamente, en otros casos las dos poblaciones se pueden presentar mezcladas geográficamente, en este caso puede ser una solución un cambio de escala, con lo que se puede lograr reducir la diferencia de los valores extremos.

**MODELOS TEÓRICOS DE VARIOGRAMAS**

Los modelos teóricos de variogramas admisibles mas utilizados en la práctica actualmente son, según (Journel, y Huijbregts, 1978) en los que coinciden Krajewski, y Gibbs, 1993; Deutsch, y Journel, 1992; Bacchi, y Kottegoda, 1995; Wackernagel, 1995; Armstrong, y Carignan, 1997.

*Efecto de pepita:* Corresponde a un fenómeno puramente aleatorio (ruido blanco), sin correlación entre las muestra, cualquiera sea la distancia que las separe, (Figura 7), donde  $C$  representa el valor de la meseta.

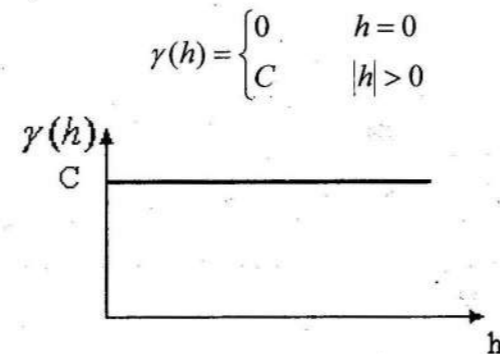


FIGURA 7: Modelo de efecto de pepita.

*Modelo esférico:* Este modelo es probablemente el más utilizado, es una expresión polinomial simple, en su forma representada en la figura 8, se puede observar un crecimiento casi lineal y después a cierta distancia finita del origen se alcanza una estabilización, la meseta. La tangente en el origen encuentra a la meseta en el punto de abscisa  $(2/3)a$ , donde  $a$  representa el valor del alcance.

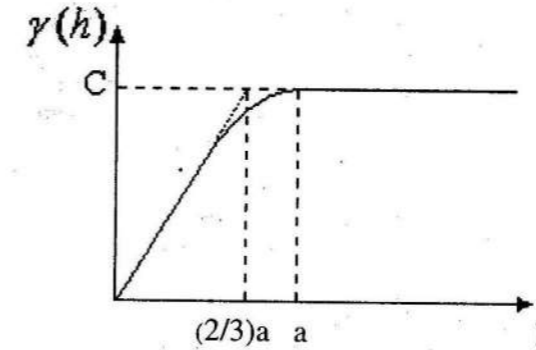


FIGURA 8. Modelo Esférico.

$$\gamma(h) = \begin{cases} C \left[ \frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] & h \leq a \\ C & h > a \end{cases}$$

*Modelo exponencial:* Este modelo a diferencia del esférico, crece inicialmente más rápido y después se estabiliza de forma asintótica (Figura 9), como la meseta no se alcanza a una distancia finita, se usa con fines prácticos el "alcance efectivo" o "alcance práctico"  $a'$ , con un valor  $a' = 3a$ , este valor se obtiene en el punto de abscisa para el cual el modelo obtiene el 95% de la meseta, o también, la tangente en el origen encuentra a la meseta en el punto  $a = (1/3)a'$ .

$$\gamma(h) = C \left( 1 - e^{-h/a} \right) \quad h > 0$$

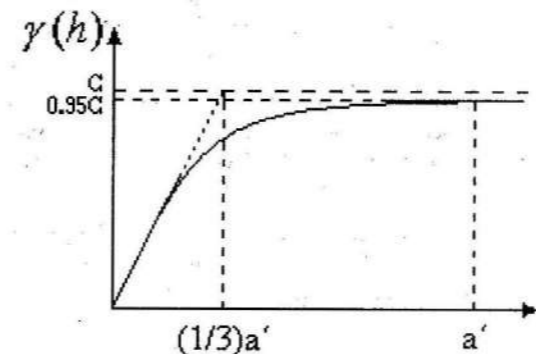


FIGURA 9. Modelo exponencial.

*Modelo gaussiano:* Este es un modelo extremadamente continuo (Figura 10), inicialmente presenta un comportamiento parabólico en el origen, después al igual que en el modelo exponencial se alcanza la meseta de forma asintótica, el alcance práctico tiene un valor de  $a' = 1.73a$ , que es el valor de la abscisa donde se alcanza el 95% de la meseta.

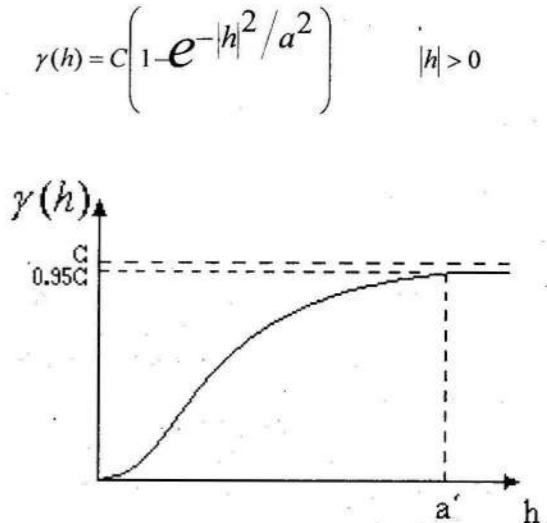


FIGURA 10. Modelo gaussiano.

*Modelo con función potencia:* Este es un modelo sin meseta, su forma se representa en la Figura 11 para valores de  $a$  correspondientes a 0.5, 1.0 y 1.5.

$$\gamma(h) = |h|^a$$

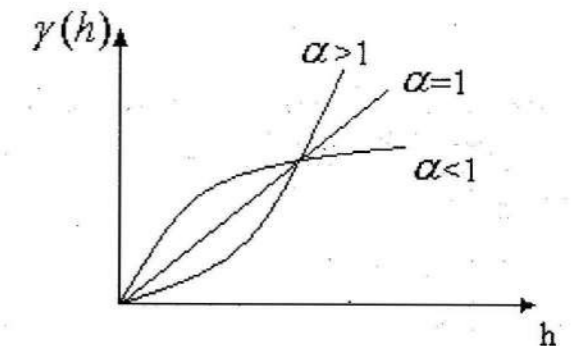


FIGURA 11. Modelo con función potencia.

Para el valor de  $\alpha = 1$  en el modelo anterior se obtiene el modelo lineal, el cual no tiene ni meseta ni alcance (Myers, 1991), ahora por simplicidad, sin embargo, muchos programas de computación denotan la pendiente del modelo lineal con la relación  $C/a$ . (Figura 12.)

$$\gamma(h) = \frac{C}{a} |h|$$

*Modelos imbricados:* Con frecuencia es necesario utilizar mas de un modelo teórico en el ajuste al variograma

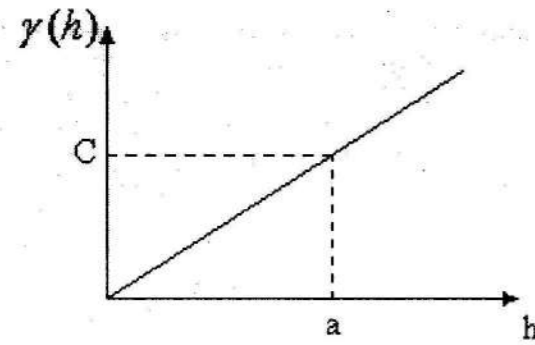


FIGURA 12. Modelo lineal.

experimental, un modelo imbricado es la suma de modelos teóricos independientes.

Como el ajuste de los modelos teóricos al variograma experimental, se realiza de forma visual o interactiva, es conveniente validar el modelo seleccionado y los parámetros meseta y alcance escogidos, al respecto se discute en Journel, y Huijbregts, 1978; Armstrong, y Carignan, 1997; Bacchi, y Kottegoda, 1995; Myers, 1991; Deutsch, y Journel, 1992 la validación cruzada. Este procedimiento consiste en eliminar temporalmente el valor de un punto de la información inicial, y reestimar el valor de esta localización a partir de la información restante por Krigeage, repitiendo el procedimiento para cada localización, obteniéndose errores de estimación por la diferencia de los valores reales y los estimados, donde es razonable esperar que la media de los errores y de los errores estandarizados sean cero y la varianza de los errores estandarizados sea uno.

### CONCLUSIONES

La realización adecuada del análisis estructural en todo estudio geoestadístico es, sin lugar a dudas, la base que justifica una correcta estimación. En correspondencia con la variabilidad espacial de la información disponible, se obtendrán las estimaciones en las localizaciones no muestreadas de modo que se minimice la varianza del error de estimación. Si el análisis estructural realizado responde a las características de variabilidad del fenómeno estudiado, entonces podemos estar seguros de que la estimación realizada por los métodos geoestadísticos es correcta.

Un estudio de este tipo implica entonces, un cálculo adecuado del semivariograma experimental, del análisis de anisotropía, y de un ajuste de modelos teóricos, el cual puede ser validado, de modo que se refleje lo mejor posible el comportamiento espacial del fenómeno estudiado. Los elementos presentados se ofrecen como una guía para la interpretación tanto teórica como práctica de la realización del análisis estructural de la información disponible, en la cual la ecuación del semivariograma experimental es el elemento primario y fundamental de todo el estudio. Finalmente podemos plantear que, si

somos capaces de obtener un modelo que represente fielmente la continuidad espacial del fenómeno estudiado, podremos predecirlo en todo su dominio.

### BIBLIOGRAFÍA

- ARMSTRONG, M.: "Common Problems Seen in Variograms", en *Mathematical Geology*, vol. 16, no. 3, 1984, pp. 305-313.
- \_\_\_\_\_: "Notas de clases del curso Geoestadística lineal" en Entrenamiento de Postgrados CFSG "Ciclo de Formación de Especialistas en Geoestadística", Curso 1997-1998, Centro de Geoestadística de la Escuela Superior de Minas de París, Fontainebleau, Francia, 1997.
- ARMSTRONG, M., y J. CARIGNAN: *Géostatistique Linéaire, Application au Domaine Minier*, École de Mines de Paris, France, 1997, pp. 112.
- BACCHI, B. y N.T. KOTTEGODA: "Identification and Calibration of Spatial Correlation Patterns Of Rain Fall", en *Journal of Hydrology* 165, 1995, pp. 311-348.
- CHAUVET, P.: "The Variogram Cloud, 17<sup>th</sup> Apcom Symposium", 19-23 April 1982, Colorado School of Mines, Golden, 1982, pp. 757-764.
- CHAUVET, P.: *Aide-Memoire de Géostatistique Minière*, École des mines de Paris, France, 1994, 210 pp.
- CHICA-OLMO, M.: "Análisis Geoestadístico en el Estudio de la Explotación de Recursos Minerales", Tesis Doctoral, Universidad de Granada, España, 1987, 387 pp.
- DEUTSCH, C.V., y A.G. JOURNEL: *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*, Second Edition, Oxford University Press, 1998, 340 pp.
- FRYKMAN, P., y T.A. ROGON: "Anisotropy in Pure Networks Analysed with 2D autocorrelation (Variomaps)", en *Computers and Geosciences*, vol. 9, no. 7, 1993, pp. 887-930.
- GALLI, A.: "Stochastic models for reservoir characterization: a user-friendly review", en *Fifth American and Caribbean Petroleum Engineering Conference and Exhibition held in Rio de Janeiro, Brazil*, 1997, 11p.
- JOURNEL, A., y CH. HUIJBREGTS: *Mining Geoestatistic*, Ed. Academic Press New York, 1978, 600 p.
- KRAJEWSKI, S. A. y B.L. GIBBS: *A Variogram Primer*, Gibbs Associates, 1993, 93 p.
- LAMOREY, G. y E. JACOBSON: "Estimation of Semivariogram Parameter and Evaluation of the Effects of Data Sparsity", en *Mathematical Geology*, vol. 27, no. 3, 1995, pp. 327-358.
- MYERS, D. E.: "Multivariable Geostatistical Analysis for Environmental Monitoring, Geomathematical and Geostatistics Analysis Applied to Space and Time Dependent Data", en *Sci. de la Terre, Sér. Inf.* 27, Nancy, France, 1988, pp. 411-427.
- MYERS, D. E.: "Interpolation and Estimation with Spatially Located Data", en *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 11, Elsevier Sciences Publishers B.V., Amsterdam, 1991, pp. 209-228.
- WACKERNAGEL, H.: *Multivariate Geostatistic, an Introduction with Applications*, Berlin: Springer, 1995, 256 pp.

# Estudio del comportamiento de la continuidad espacial del quimismo en el acuífero cársico costero de la península de Guanahacabibes

## Study of Spatial Continuity Behaviour of Chemical Elements in the Karstic Coastal Aquifer of Guanahacabibes Peninsula

Rebeca Hernández Díaz<sup>1</sup>  
José Quintín Cuador Gil<sup>2</sup>  
Arsenio González Martínez<sup>3</sup>  
Emilio Romero Macías<sup>3</sup>  
Robert Ramírez Hernández<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Profesor instructor. Especialista en Hidrogeología. Universidad de Pinar del Río.  
<sup>2</sup>Universidad de Pinar del Río.  
<sup>3</sup>Universidad de Huelva, España.

**RESUMEN:** Actualmente los recursos del acuífero de Guane se explotan para satisfacer las necesidades del plan de riego, las turísticas, y el consumo urbano de las poblaciones cercanas. Todo ello ha hecho descender los niveles potenciométricos de forma paulatina en el último decenio en todo el sector y consecuentemente el aumento de la zona de mezcla. En este estudio discutimos el proceso de salinización en el área para el cual las variables conductividad, cloruros, bicarbonatos y sodio fueron estudiadas en el campo y el laboratorio. Diferentes variogramas direccionales fueron calculados para cada una de las variables estudiadas, detectándose una anisotropía zonal en la dirección 75°-165° y un comportamiento bastante variable en el origen. Como resultado se obtuvo que la región más afectada es la parte central-inferior donde los valores de las variables medidas llegan a alcanzar niveles alarmantes.

**Palabras claves:** Salinización, carso, variabilidad.

**ABSTRACT:** Nowadays, the water resources in Guane town are exploited to satisfy the irrigation plans and water demands of neighboring zones and tourism industry. All this has caused a gradual falling of potentiometric level during the last decade. In this study, the salinization process in the area is discussed by means of several variables, such as electrical conductivity, chlorides, bicarbonates and sodium. Were analyzed in the field and in the laboratory. Different directional variograms were calculated for all variables, and it was found a zonal anisotropy in the 75°-165° direction and a behaviour so variable in its origin. As a result it was shown that the most affected area is located in the central-lower part where values of measured variables reached critical levels.

**Key words:** Salinization, Karst, Variability.

### INTRODUCCIÓN

En el campo de la hidrogeología unos de los problemas que se plantea frecuentemente concierne a la inferencia estadística o estimación de valores de un parámetro físico en un dominio o volumen cualquiera, definido en un espacio  $P^1$ ,  $P^2$ ,  $P^3$ .

Este problema se presenta de manera cotidiana en las investigaciones relacionada con la gestión de los recursos hidráulicos, en específico, donde es necesario calcular, por ejemplo, la lámina de escurrimiento caída sobre una cuenca en un período de tiempo, por consiguiente este valor servirá para cuantificar el volumen total de agua caída. Pero también podría tratarse de la estimación del valor de la conductividad, el cloruro o cualquiera de las variables tipo de una zona de mezcla. El objetivo del trabajo es precisamente el estudio de la salinización a través de las variables de conductividad, cloruros, bicarbonato y sodio a partir de criterios geoestadísticos.

Obviamente, si se desea una evaluación correcta del objetivo propuesto se debe conceder especial