

Variabilidad espacial de la lámina de agua y rendimiento de la caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo riego por aspersión*

Space variability of water sheet and yield of black bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under sprinkler irrigation

José Nicolás Ortiz Romero¹, Héctor Alexis Miranda¹ y Samuel Gustavo Ceballos Pérez^{1§}

Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA). Decanato de Agronomía. Departamento de Ingeniería Agrícola. A. P. 400 Barquisimeto 3001, Venezuela. (jortiz@ucla.edu.ve), (hmiranda@ucla.edu.ve). §Autor para correspondencia: samuelceballos@ucla.edu.ve.

Resumen

Para evaluar la variabilidad y dependencia espacial de la lámina de riego aplicada y del rendimiento obtenido en el cultivo de caraota (*Phaseolous vulgaris* L.), bajo riego por aspersión, se llevó a cabo un experimento durante 2010. Para ello se seleccionó, en la parte central de toda el área irrigada, una superficie de 10 m x 1 m con un aspersor en sus respectivos vértices. Dentro de ésta área, de manera sistemática, se ubicaron puntos de muestreo en forma de cuadrícula de 2 m x 2 m y en cuyo centro se colocaba un pluviómetro para coleccionar las láminas de agua aplicadas por los aspersores. El área de influencia de cada pluviómetro era 4 m² ésta fue cosechada para evaluar el rendimiento del cultivo. Los datos fueron analizados bajo procedimientos geostatísticos. Para la lámina de riego recibida durante el ciclo, se obtuvo un semivariograma esférico donde se refleja, por su efecto nugget mínimo, poca variabilidad entre láminas vecinas y el límite de dependencia se extiende hasta 5.70 m. Respecto al rendimiento, resultó un semivariograma exponencial, demostrando variabilidad entre muestras vecinas evidenciadas por la mayor proporción del efecto nugget, el límite de dependencia se extiende hasta una distancia de 7.84 m.

Palabras claves: *Phaseolus vulgaris* L., dependencia espacial, lámina de riego, rendimiento, variabilidad especial.

Abstract

To assess variability and space dependence of applied irrigation sheet and yield obtained in black bean (*Phaseolous vulgaris* L.) crop, under sprinkler irrigation, during 2010 an experiment was performed. For this purpose it was selected, in the central portion of irrigated area, a surface of 10 m x 1 m with sprinkler in their corresponding vertexes. Within this surface, in systematic way, sampling points were located in 2m x 2m square matrix and in each center a pluviometer was put to collect water sheets applied by sprinklers. Influence surface of each pluviometer was 4 m² and was harvested to asses crop yield. Data were analyzed under geostatistical procedures. For irrigation sheet received during cycle, spherical semivariogram was obtained where is reflected, by its minimum nugget effect, little variability between neighbor sheets and dependence limit is extended up to 5.7 m. About yield, it resulted an exponential semivariogram, demonstrating variability between neighbor samples evidenced by greater proportion of nugget effect, the dependence limit is extended up to a distance of 7.84 m.

Key word: *Phaseolus vulgaris* L., space dependence, irrigation sheet, yield, space variability.

* Recibido: agosto de 2011
Aceptado: marzo de 2012

Introducción

Según (Matheron, 1963) la geoestadística es una rama tanto de las ciencias exactas como naturales, actualmente existen múltiples aplicaciones en determinadas áreas como agrícola, forestal, salud pública, entomología, entre otras. En riego la aplicación de dicha técnica es de mucha utilidad al momento de tomar cualquier decisión dado que el investigador desea conocer cómo se distribuye espacialmente una lámina de riego, si hay dependencia entre ellas y cómo puede afectar el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo, las áreas de terreno que reciben mayor o menor cantidad de agua.

El agua es un factor que limita la producción, por lo tanto un buen riego debe caracterizarse por presentar alta eficiencia y uniformidad para garantizar un uso racional del recurso hídrico. En el campo existen muchos factores que afectan la uniformidad del riego, unos inherentes al suelo principalmente sus propiedades físicas, químicas y características topográficas, otros dependientes de elementos del clima y por otro lado las características propias de los diseños de riego. En riego por aspersión, el viento, principalmente su velocidad y dirección es muy importante investigarlos y conocer cómo afectan la distribución de las láminas aplicadas. Esto permitirá generar acciones que minimicen los riesgos de pérdidas en cultivos.

El uso de herramientas geoestadísticas permitirá determinar si existe dependencia o correlación en el espacio dentro y entre variables inherentes a la aplicación del riego (Guimaraes, 2000). Es importante además destacar que el estimador de Krigin produce los mejores resultados usando la interpolación lineal (Burguess y Webster 1980). Todas estas técnicas surgen con aplicaciones de variabilidad espacial en suelo donde existen variaciones continuas en el espacio físico, luego para controlar o mejor dicho manipular esas variaciones, se crea el concepto matemático de semivariograma originando así una serie de puntos discretos que corresponde a la semivarianza para los diferentes puntos muestreados. Para observar gráficamente la variabilidad y tener una mejor apreciación visual del problema planteado bajo un enfoque analítico; es decir, teórico matemático. Es bajo estas premisas que se utilizaran estas técnicas para estudiar la variabilidad espacial del riego, en éste caso el método de aspersión.

La presente investigación tuvo como objetivo analizar la variabilidad espacial de la lámina de riego bajo el método de aspersión, así como construir un mapa geográfico que

Introduction

According to Matheron (Matheron, 1963) geostatistic is a branch as well from science as from natural areas, actually there are multiple applications in given areas like agricultural, forestry, public health, entomology, among others. In irrigation the application of this technique is very useful when taking decision since researcher needs to know how an irrigation sheet is spatially distributed, if there is dependence between them and how can affect growth, development and yield of crop, the land areas that receive more or less water quantity.

Water is a production limiting factor, therefore a good irrigation must characterize by having high efficiency and uniformity to guarantee its rational use. In field there are many factors that affect irrigation uniformity, ones are inherent to soil mainly its physical, chemical properties and topographic characteristics, other depend on elements like weather and, on the other hand, characteristics by the irrigation design itself. In sprinkler irrigation, wind, especially speed and direction, is very important to research and to know how affects the applied sheets distribution. This will allow create actions that minimize risk of loss in crops.

The use of geostatistical tools will allow to determine if there is dependence or correlation in space within and between variables inherent to irrigation application (Guimaraes, 2000). Also, it is important to mention that Krigin estimator gives the best results using lineal interpolation (Burguess and Webster 1980). All these techniques arise with applications of space variability in soil where there are continuous variations in physical space, then for controlling or manipulate these variations, it is created the mathematical concept known as semivariogram giving a series of discrete points that corresponds to semivariance for different sampled points. To graphically observe variability and have better visual approach of problem proposed under analytical approach; that is to say, theoretical mathematical. It is under these premises that these techniques were used to study irrigation space variability, in this case the sprinkler method.

The aim of this research was to analyze space variability for irrigation sheet under sprinkler method, as well to build a geographical map that identifies areas where such variability exists through isolines and graphic material. Also it is assessed space variability of crop yields and their correlation with applied sheets.

identifique las zonas donde existe dicha variabilidad a través de las isolíneas y material gráfico. También se evalúa la variabilidad espacial de los rendimientos del cultivo y la correlación de estos con las láminas aplicadas.

Materiales y métodos

El experimento fue realizado en el área experimental de riego del Decanato de Agronomía en el Núcleo Tarabana de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, para ello se dispuso de la instalación de un sistema de riego por aspersión estacionario fijo que estaba a una separación entre aspersores y laterales (SaSl) de 10 m x 10 m (Figura 1). De ésta se seleccionó el área central conformada por cuatro aspersores adyacentes y se colocaron los pluviómetros conformando una cuadrícula de 2 m x 2 m, donde cada uno tenía un área de influencia de 4 m², siendo así se ubicaron un total de 25 pluviómetros.

Los aspersores tenían un caudal nominal de 0.2 l/s a una presión de operación de 30 PSI y eran accionados por una bomba de 3 HP.

Por ocasión del experimento se estaba cultivando caraota, este fue plantado a una separación entre hileras de 50 cm y 5 cm entre plantas. Los pluviómetros fueron colocados sobre soportes a 40 cm sobre el suelo de tal manera que el follaje del cultivo no interfiriera con su área de captación la cual era 81.07 cm². El área de influencia correspondiente a cada pluviómetro fue cosechada y el rendimiento se expresó en kilogramos por hectárea.

El cultivo fue regado con una frecuencia de 7 días y la lámina de agua a ser aplicada se determinó por el método de la tina de evaporación (Dorenbos y Pruitt, 1977). Para ello la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) fue determinada multiplicando la evaporación (E_v) por un coeficiente de tina (K_p) que para la zona de Tarabana ya fue determinado 0.78. Luego la ET_o era multiplicada por el coeficiente del cultivo (K_c) que estaba en función de la fase de desarrollo del cultivo y de esta manera se determinaba la evapotranspiración del cultivo (ET_c) que es igual a la necesidad hídrica del cultivo. Ésta se calculaba diariamente y se acumulaba para un periodo de 7 días, si por ocasión ocurrían algunas lluvias éstas se restaban y luego mediante riego se reponía la lámina de agua faltante.

Materials and methods

The experiment was performed at the experimental irrigation area from Decanato de Agronomía at Núcleo Tarabana from Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, for this a stationary sprinkler irrigation system installation was set, which was at 10 m x 10 m separation between sprinklers and laterals (SaSl) (Figure 1). From this it was selected the central area conformed by four adjacent sprinklers and measuring pluviometers were put forming a 2 m x 2 m square, where each one had an influence surface of 4 m², finally installing 25 pluviometers.

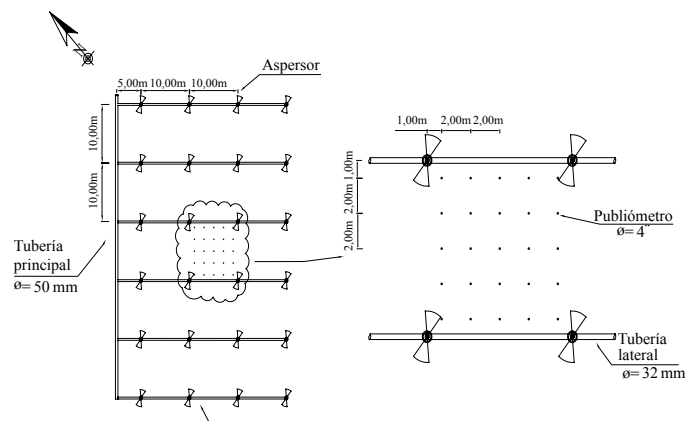


Figura 1. Disposición de los aspersores y pluviómetros en el campo.

Figure 1. Arrangement of sprinklers and pluviometers in field.

Sprinklers had nominal rate of 0.2 l/s at operation pressure of 30 PSI and were driven by 3 HP pump.

Black bean was harvested due experiment, sowed at 50 cm separation between furrows and 5 cm between plants. The pluviometers were put on supports at 40 cm over soil in such way crop foliage did not interfere with the application area which was of 81.07 cm². The influence area corresponding to each pluviometer was harvested and yield was in kilograms per hectare.

Crop was irrigated at a frequency of 7 days and water to be applied was defined by vase evaporation method (Dorenbos and Pruitt, 1977). For this matter crop evotranspiration reference (ET_o) was calculated multiplying evaporation (E_v) by vase coefficient (K_p) that for Tarabana region was determined 0.78. Then ET_o was multiplied by crop coefficient (K_c) which was in function of crop's development phase and in this way crop evotranspiration (ET_c) was

El total de agua recibida durante el ciclo fue acumulado en cada pluviómetro. El área de influencia de cada pluviómetro fue cosechada y así fueron presentados los datos de distribución de láminas y rendimientos en la cuadrícula evaluada y fueron sometidos a análisis geoestadístico.

Estimación. Según (Pierce, 2007) la estimación se realiza a través de valores desconocidos, a partir de valores conocidos siguiendo su estructura de continuidad espacial teniendo en cuenta los supuestos del modelo.

Ecuaciones del Kriging. Se dispone de los valores muestrales $Z(X_i)$ $i=1, \dots, n$ y deseamos estimar un valor de la característica observada en el panel $Z(v)$ para ello se escribe la combinación lineal $Z(x_i)$:

$$\hat{Z}(v) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

$\hat{Z}(v)$ son los valores estimados y λ_i pesos del Kriging (Arik, 1990), de modo que los λ_i sean obtenidos de tal forma que proporcione un estimador insesgado $E(\hat{Z}(v) - Z(v)) = 0$ y de varianza mínima $Var(\hat{Z}(v) - Z(v))$.

Kriging simple

Estimador:

$$\hat{Z}(v) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) + m \left(1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i \right)$$

Donde: $E(\hat{Z}(v)) = m$ es un valor conocido.

$$\text{Sistema: } C(x_j - v) = \sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_i - x_j), j = 1, \dots, n$$

$$\text{Varianza de Kriging: } \sigma_k^2 = C(0) - \sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_i - v)$$

Kriging simple ordinario

En función de la covarianza

$$\text{Estimador: } \hat{Z}(v) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

$$\text{Sistema: } C(x_j - v) = \sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_i - x_j) - \rho, j = 1, \dots, n$$

Donde: ρ es un multiplicador de Lagrange, y $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$

$$\text{Varianza del Kriging: } \sigma_k^2 = C(0) - \sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_i - v) + \rho$$

En términos del semivariograma se tiene:

determined and is equal to crop's hydric requirement. This was calculated in daily basis and was accumulated during 7 days, if there were rain precipitations they were removed and then missing water was replaced by irrigation.

Total amount of water received during cycle was accumulated in each pluviometer. The influence surface of each pluviometer was harvested and sheets distribution and yield were shown in the assessed matrix and were subject to geostatistical analysis.

Estimation. According to Pierce (2007) estimation is done through unknown values, starting from known values following a space continuity structure taking into account the assumptions of each model.

Kriging equations. There are sample values $Z(X_i)$ $i=1, \dots, n$ and to estimate a value of observed characteristic in panel $Z(v)$ for this the lineal combination is written $Z(x_i)$:

$$\hat{Z}(v) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

$\hat{Z}(v)$ are estimated values and λ_i weights of Kriging (Arik, 1990), in such way that λ_i are obtained in such way that provides an unbiased estimator $E(\hat{Z}(v) - Z(v)) = 0$ and of minimum variance $Var(\hat{Z}(v) - Z(v))$.

Kriging simple

Estimator:

$$\hat{Z}(v) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) + m \left(1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i \right)$$

Where: $E(\hat{Z}(v)) = m$ is a known value.

$$\text{System: } C(x_j - v) = \sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_i - x_j), j = 1, \dots, n$$

$$\text{Variance of Kriging: } \sigma_k^2 = C(0) - \sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_i - v)$$

Kriging simple ordinario

In function of covariance

$$\text{Estimador: } \hat{Z}(v) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

$$\text{System: } C(x_j - v) = \sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_i - x_j) - \rho, j = 1, \dots, n$$

Where: ρ is a Lagrange multiplier, and $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$

Estimador: $\hat{Z}(v) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$

Sistema: $\gamma(x_j - v) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i - x_j) + \rho, j=1, \dots, n$

Donde: ρ es un multiplicador de Lagrange y $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$

Varianza del Kriage: $\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_j - v) + \rho$.

Matricialmente se puede escribir de acuerdo con los casos expuestos en las expresiones (Bivand- Enzer, 2008):

$$\Gamma_0 \gamma_0 = \gamma_0 \tag{1}$$

Donde: $\gamma_0 = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n, \rho)$, ρ es un multiplicador de Lagrange y asegura que $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ y $\gamma_0 = (\gamma(v - x_1), \dots, \gamma(v - x_n), 1)'$

$$\Gamma_0 = \begin{cases} \gamma(x_i - x_j) & \text{si } i=1, \dots, n, j=1, \dots, n \\ 1, & \text{si } i=n+1, j=1, \dots, n \\ 0, & \text{si } i=n+1, j=n+1 \end{cases} \quad \Gamma_{0(n+1) \times (n+1)} \text{ y simétrica}$$

La ecuación (1) es equivalente a la expresión:

$$\begin{bmatrix} 0 & \gamma(x_1 - x_2) & \dots & \gamma(x_1 - x_n) & 1 \\ \gamma(x_2 - x_1) & 0 & \dots & \gamma(x_2 - x_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n - x_1) & \gamma(x_n - x_2) & \dots & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \rho \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(v - x_1) \\ \gamma(v - x_2) \\ \vdots \\ \gamma(v - x_n) \\ 1 \end{bmatrix}$$

Por último tenemos el intervalo de predicción que viene dado por la expresión:

$$A = (\hat{Z}(v) - Z_{\alpha/2} \sigma_k, \hat{Z}(v) + Z_{\alpha/2} \sigma_k)$$

Donde: A = al intervalo de confianza de 95% con $\alpha = 5\%$, bajo el supuesto de normalidad. $P(Z(v) \in A) = 1 - \alpha$.

Análisis estadístico

Para el análisis de datos se emplearon las técnicas (David, 1977) y para conocer el rendimiento se utilizaron:

1. Análisis exploratorio de los datos, esta sección se analizaron los datos para hallar la distribución de probabilidad que siguen las variables rendimiento y lámina total en el área geográfica.
2. El análisis estructural se realizó tomando en cuenta la distribución espacial de las variables rendimiento y lámina total.

Variance of Kriage: $\sigma_k^2 = C(0) - \sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_i - v) + \rho$

In terms of semivariogram there is that:

Estimator: $\hat{Z}(v) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$

System: $\gamma(x_j - v) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i - x_j) + \rho, j=1, \dots, n$

Where: ρ is a Lagrange multiplier and $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$

Variance of Kriage: $\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_j - v) + \rho$.

The matrix can be written according to exposed cases in expressions (Bivand- Enzer, 2008):

$$\Gamma_0 \gamma_0 = \gamma_0 \tag{1}$$

Where: $\gamma_0 = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n, \rho)$, ρ is a Lagrange multiplier and assures that $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ and $\gamma_0 = (\gamma(v - x_1), \dots, \gamma(v - x_n), 1)'$

$$\Gamma_0 = \begin{cases} \gamma(x_i - x_j) & \text{si } i=1, \dots, n, j=1, \dots, n \\ 1, & \text{si } i=n+1, j=1, \dots, n \\ 0, & \text{si } i=n+1, j=n+1 \end{cases} \quad \Gamma_{0(n+1) \times (n+1)} \text{ and symmetric}$$

The equation (1) is equivalent to expression:

$$\begin{bmatrix} 0 & \gamma(x_1 - x_2) & \dots & \gamma(x_1 - x_n) & 1 \\ \gamma(x_2 - x_1) & 0 & \dots & \gamma(x_2 - x_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n - x_1) & \gamma(x_n - x_2) & \dots & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \rho \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(v - x_1) \\ \gamma(v - x_2) \\ \vdots \\ \gamma(v - x_n) \\ 1 \end{bmatrix}$$

Finally there is the prediction interval that is given by the expression:

$$A = (\hat{Z}(v) - Z_{\alpha/2} \sigma_k, \hat{Z}(v) + Z_{\alpha/2} \sigma_k)$$

Where: A = to trust interval of 95% with $\alpha = 5\%$, under normality assumption. $P(Z(v) \in A) = 1 - \alpha$.

Statistical analysis

For data analysis there were used techniques proposed by David (1977) and to know yield the following were used:

1. Data exploratory analysis, this section analyzed data to find probability distribution that follow both variable yield and total sheet in the geographic area.

3. Predicciones: consistió en conocer el máximo y mínimo en el rendimiento combinando con la superficie generada por valores del estimador Krigage (Waller, 2004). Para los análisis descriptivo y estructural se utilizó el ArcGis ver 9.3.1.

Resultados y discusión

Laminas total recibida durante el ciclo. El histograma de frecuencia muestra la normalidad de los datos (Berenson-Levine 2001), presentando un ligero sesgo hacia la derecha y una mayor concentración de los datos hacia la izquierda. Vista la distribución presentada se puede considerar que es normal y por lo tanto se puede proseguir con el análisis geoestadístico. Los diagramas de caja muestran una ligera asimetría positiva, pero también se puede considerar que los datos se distribuyen normalmente (Figura 2).

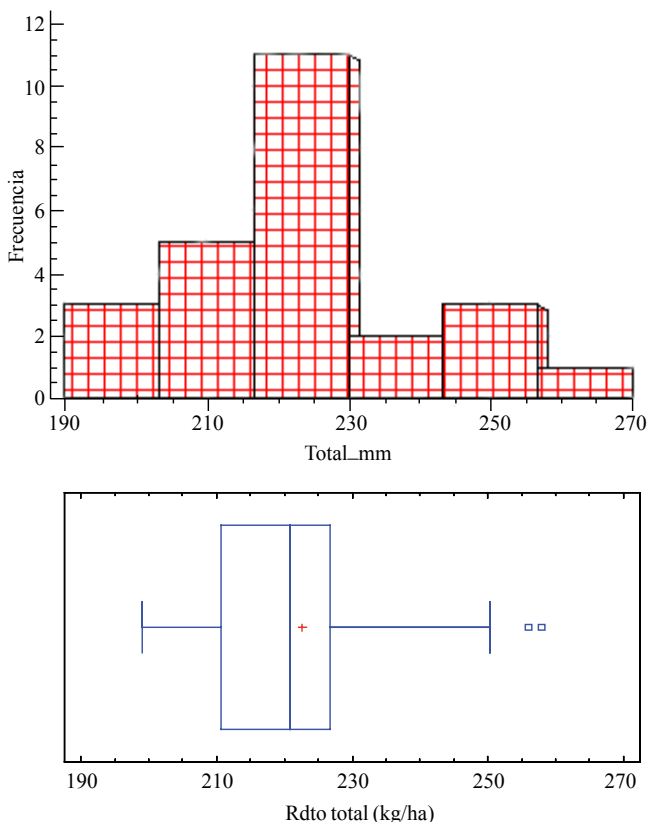


Figura 2. Histograma de frecuencias y diagrama de caja para el total de lámina aplicada (mm).

Figure 2. Frequencies histogram and box diagram for total applied sheet (mm).

2. Structural analysis was done taking into account space distribution of both variable yield and total sheet.

3. Forecasts: consisted in knowing maximum and minimum in combined yield with surface created by values of Krigage estimator (Waller, 2004). For descriptive and structural analysis software ArcGis ver 9.3.1 was used.

Results and discussion

Total sheets obtained during cycle. Frequency histogram shows data normality (Berenson-Levine 2001) with little bias towards right and higher data concentration to the left. This distribution can be considered like normal and therefore the geostatistical analysis can continue. Box diagrams show slight positive asymmetry, but also can be considered that data are normally distributed (Figure 2).

Total yield

Frequencies histogram shows data normality with slight bias to the left and greater data concentration to the right. Box diagram shows slight negative asymmetry, but keeps normality (Figure 3). The studied distribution can be defined like data have normality therefore from this point of view the geostatistical analysis can continue.

Values of normal probability, run by quartil method (Q-Q), have an adjustment very near to straight line as well as for total sheet as for yield (Figure 4).

Stationarity. The stationarity can be of first or second order, in this case the estimated mean for total sheet (mm) as well as for yield (hg ha^{-1}) are constant around data and second order momentum (variance) guarantees that covariance is the same between two points at the same distance (Chan-Cryer, 2008), for stationarity semivariograms it is assumed that variance of difference is the same between two points that are at the same distance no matter which points are selected. For the experiment, since CV of variation is less than unit it guarantees that fulfill the assumption of stationarity in total sheet (mm) and in yield (hg ha^{-1}) (Table 1) (Cressie, 1986).

Rendimiento total

El histograma de frecuencias muestra la normalidad de los datos presentando un ligero sesgo hacia la izquierda y una mayor concentración de los datos hacia la derecha. El diagrama de caja muestra una ligera asimetría negativa pero se conserva la normalidad (Figura3). Vista la distribución presentada se puede considerar que los datos tienen normalidad por lo tanto desde este punto de vista se puede proseguir con el análisis geoestadístico.

For total (mm) the average is 222.55; 50% of data is less than 220.89, the other 50% is greater, there is no value that can maximize data distribution. Asymmetry coefficient and kurtosis coefficient correspond to results in normality plot (Figure 4), variation coefficient indicates that relative variability of data with respect mean is 7.53%, and sample size is 25. For yield (hg ha⁻¹) average is 1 451.50; 50% of data is less than 1 462.42; the remaining 50% is greater, there is no value that maximizes yield data distribution. Asymmetry coefficient and

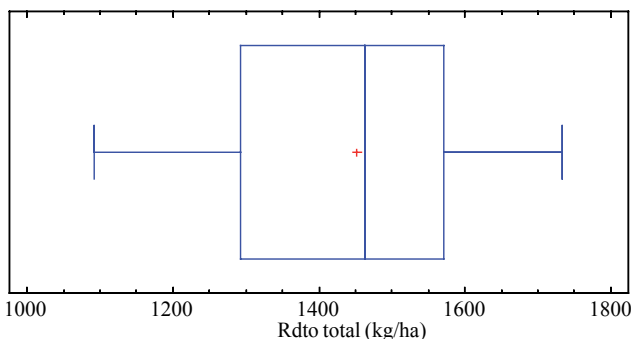
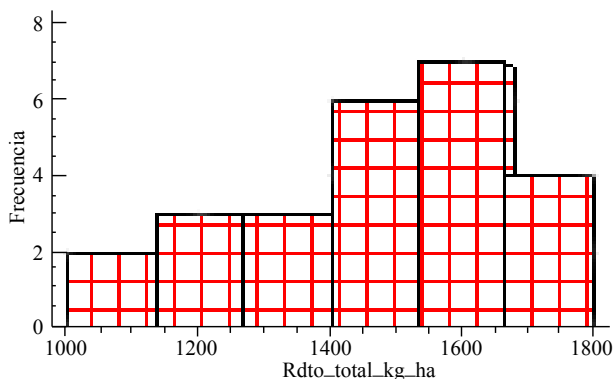


Figura 3. Histograma de frecuencias para el rendimiento (kg h⁻¹).

Figure 3. Frequencies histogram for yield (kg h⁻¹).

Los valores de probabilidad normal, corridos por el método de los cuartiles (Q-Q), presentan un ajuste muy próximo a una línea recta tanto para la variable lámina total como rendimiento (Figuras 4).

kurtosis coefficient reflects what is indicated in the plot (Figure 4), el variation coefficient indicates that relative variability of data with respect mean is 13.03% and sample size is 25.

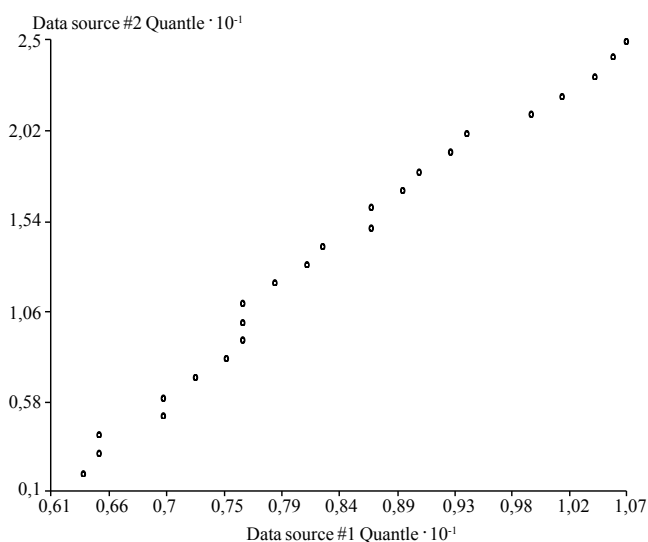
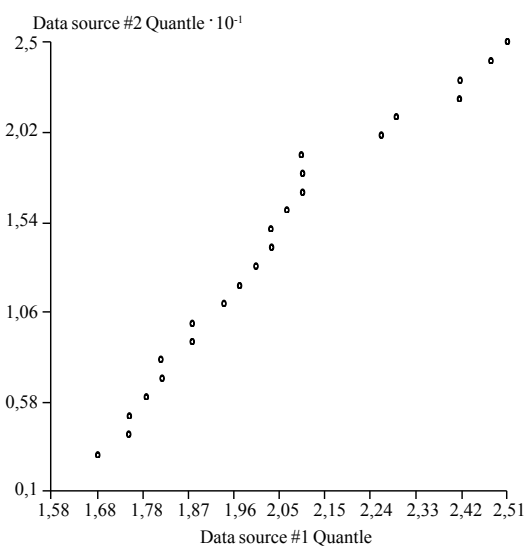


Figura 4. Probabilidad normal para la variable lámina total (mm) y variable rendimiento (kg ha⁻¹).

Figure 4. Normal probability for variable total sheet (mm) and variable yield (kg ha⁻¹).

Estacionariedad. La estacionariedad puede ser de primer y segundo orden, para este caso la media estimada tanto para la lámina total (mm) y el rendimiento (hg ha⁻¹) son constantes alrededor de los datos y el momento de segundo orden (varianza) garantiza que la covarianza es la misma entre dos puntos que están en la misma distancia (Chan-Cryer, 2008), para los semivariogramas la estacionariedad se supone que la varianza de la diferencia es la misma entre dos puntos que están en la misma distancia sin importar los puntos que se elijan. Para el experimento dado que el CV de variación es menor a uno garantiza que cumple el supuesto de estacionariedad en la lámina total (mm) y en el rendimiento (hg ha⁻¹) (Cuadro 1) (Cressie, 1986).

Para el total (mm) el promedio es 222.55; 50% de los datos es menor a 220.89 el otro 50% es mayor, no hay un valor que maximice la distribución de los datos. El coeficiente de asimetría y el coeficiente de curtosis refleja lo indicado en el gráfico de normalidad (Figura 4), el coeficiente de variación indica que la variabilidad relativa de los datos con respecto a la media 7.53%, y el tamaño de muestra es 25. Para el rendimiento (hg ha⁻¹) el promedio es 1 451.50; 50% de los datos es menor a 1 462.42 el otro 50% es mayor, no hay un valor que maximice la distribución de los datos de rendimiento. El coeficiente de asimetría y el coeficiente de curtosis refleja lo indicado en el gráfico (Figura 4), el coeficiente de variación indica que la variabilidad relativa de los datos con respecto a la media es 13.03% y el tamaño de muestra es 25.

Análisis estructural

Dependencia espacial

Lámina total. Se hizo una exploración preliminar mediante el cálculo de un semivariograma medio porque no se consideró la dirección de los vectores *h*. Implícitamente se asume isotropía, variabilidad idéntica en todas las direcciones, porque es inútil explorar anisotropía cuando no existe dependencia espacial en la media (Guimarães, 2000). Se muestra una clara estructura espacial en el semivariograma medio con ausencia de efecto nugget (Figura 5). Esto significa una variación muy baja entre las observaciones obtenidas de lámina de agua total en mm recibida durante el ciclo; es decir, que había mucha similitud entre laminas vecinas y por lo tanto una alta dependencia espacial.

Cuadro 1. Estadística descriptiva para lámina total (mm) y rendimiento (kg ha⁻¹).

Table 1. Descriptive statistic for total sheet (mm) and yield (kg ha⁻¹).

| | Lámina total (mm) | Rendimiento (hg ha ⁻¹) |
|-------------------------|-------------------|------------------------------------|
| Media | 222 55 | 1 451 50 |
| Error típico | 3 35 | 37 83 |
| Mediana | 220 89 | 1 462 42 |
| Desviación estándar | 16 76 | 189 18 |
| Varianza de la muestra | 280 89 | 358 42 |
| Curtosis | -0 02 | 0 98 |
| Coficiente de asimetría | 67 | 0 31 |
| CV | 0 07 | 0 13 |

Structural analysis

Space dependence

Total sheet. Preliminary exploration was made by calculating of a mean semivariogram because the *h* vectors direction was not considered. In an implicit way isotropy is assumed, same variability in all directions, because is useless to explore anisotropy when there is no space dependence in mean (Guimarães, 2000). A clear space structure is shown in the mean semivariogram with absence of nugget effect (Figure 5). This means very low variation between observations obtained from total water sheet in mm received during cycle; in other words, there was much similarity between neighbor sheets and therefore high space dependence.

Spherical model is the one that best fits to data with minimum values less than or equal to 308.51, when *h* is less or equal to 5.70 and zero nugget. The selected model is:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 308.51 \left(\frac{3}{2} \left(\frac{h}{5.70} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{5.70} \right)^3 \right) & \text{para todos } h \leq 5.70 \\ 308.51 & \text{para todo } h > 5.70 \end{cases}$$

Therefore the semivariogram has a scope or dependence distance of 5.70 m which means that measurements made at higher distances to scope have a random space distribution and are independent. On the other hand distances shorter than scope are correlated between

El modelo esférico es el que mejor se ajusta a los datos con valores mínimos menores o igual que 308.51, cuando h se hace menor o igual que 5.70 y cero pepita. El modelo seleccionado es:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 308.51 \left(\frac{3}{2} \left(\frac{h}{5.70} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{5.70} \right)^3 \right) & \text{para todos } h \leq 5.70 \\ 308.51 & \text{para todo } h > 5.70 \end{cases}$$

Por lo tanto el semivariograma presenta un alcance o distancia de dependencia de 5.70 m lo que significa que mediciones realizadas a distancias superiores al alcance tienen distribución espacial aleatoria y son independientes. Por otro lado distancias menores que el alcance están correlacionadas unas a las otras lo que permite que se hagan interpolaciones para distancias menores que los muestreados. Los resultados obtenidos en este semivariograma eran esperados, puesto que los sistemas de riego por aspersión son diseñados para una alta uniformidad de aplicación, de ahí la no existencia de efecto nugget. Cualquier variabilidad observada, probablemente puede ser atribuida a efectos del viento y a variaciones en la presión de operación del sistema de riego. Variaciones por efecto del suelo se descartan ya que las láminas eran colectadas antes que estas alcanzasen el suelo.

Modelo esférico ajustado a los datos del semivariograma omnidireccional. La escala de colores a la derecha del semivariograma empírico (Figura 5). Obsérvese que en la barra de colores, el azul y verde claro son los valores bajos del semivariograma y los colores marrón y crema son los valores altos esto indica la poca variabilidad entre láminas de agua medidas considerando un radio de 5.70 m.

El mapa geográfico muestra (Campagna, 2005) cómo se distribuyen las láminas de riego aplicadas en el cuadrado conformado por cuatro aspersores adyacentes (Figura 6). Las partes más oscuras corresponden a áreas que recibieron mayor lámina de agua durante el ciclo del cultivo. En los vértices del cuadrado estaban localizados los aspersores, la variabilidad que se aprecia en la lámina aplicada probablemente se deba a variaciones en la presión de operación de los aspersores por efecto de pérdidas de carga en tuberías y desniveles del terreno. Por otro lado el viento, probablemente tuvo alguna influencia en el patrón de distribución de las láminas de riego.

them which allow to make interpolations for distances shorter than the samples. The results obtained in this semivariogram are foreseen, since sprinkler irrigation systems are designed for high uniformity application, hence there is no nugget effect at all. Any observed variability can be probably attributed to wind effects or to variations in operation pressure for irrigation system. Variations due soil effect are discarded since sheets were collected before they reach soil.

Spherical model adjusted to data from omnidirectional semivariogram. The colors scale at the right of empiric semivariogram (Figure 5). Note that in colors bar, blue and clear green are the low values of semivariogram and brown and cream color are high values meaning low variability between water sheets measured considering a 5.7 m radius.

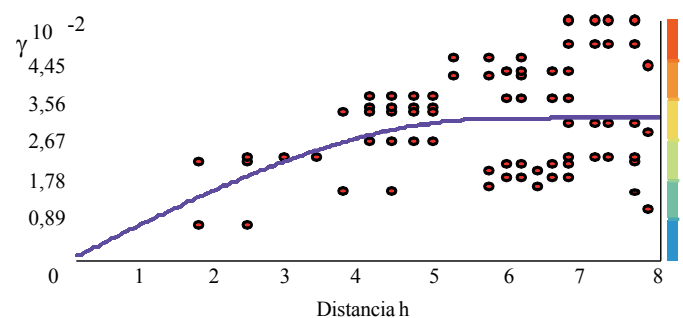


Figura 5. Semivariograma para lámina total recibida en el ciclo del cultivo.

Figure 5. Semivariogram for total sheet received during crop cycle.

The geographic map (Campagna, 2005) shows how irrigation sheets are distributed applied in a square formed by four adjacent sprinklers (Figure 6). The darkest portions correspond to areas that received higher water sheet during crop cycle. In the square vortexes the sprinklers were located, the variability that is seen in the applied sheet is probably due to operation pressure variations of sprinklers by effect of load losses in pipes and land variations. On the other hand, the wind probably had some influence in the distribution pattern of irrigation sheets.

Crop yield (kg ha^{-1}). The mean semivariogram has clear space structure in which its characteristics patterns can be detected, such as nugget effect, top and scope (Figure 7). Exponential model is the best to fit to data, being:

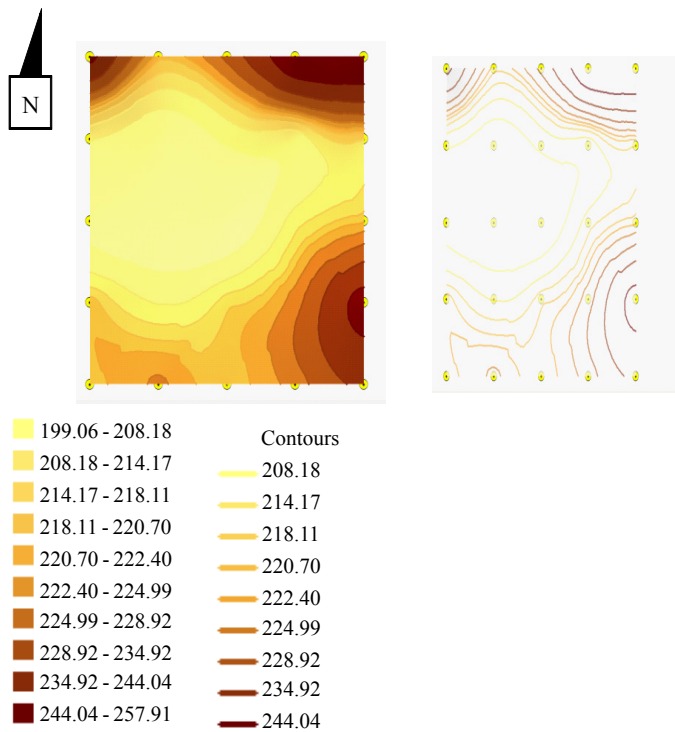


Figura 6. Mapa geográfico y líneas de contorno para la variable lámina total (mm).

Figure 6. Geographic map and contour lines for variable total sheet (mm).

Rendimiento del cultivo (kg ha⁻¹). El semivariograma medio presenta una clara estructura espacial donde se pueden apreciar sus parámetros característicos, como lo son el efecto nugget, la meseta y el alcance (Figura 7). El modelo exponencial es el que mejor se ajusta a los datos, siendo:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 1 - \frac{-3h}{7.8458} & \text{para todos } h \leq 7.8458 \end{cases}$$

Del modelo y gráficamente se puede extraer que el efecto nugget es 1.5810, y el alcance 7.8458. El efecto nugget revela la discontinuidad del semivariograma para distancias menores que las muestreadas. Parte de esa discontinuidad puede ser debida a errores de medición y a variabilidad en una escala menor que la muestreada. El hecho es que existe una variabilidad espacial entre medidas de rendimiento en hg ha⁻¹ debido al efecto pepita y al mismo tiempo se mantiene una dependencia espacial hasta valores de $h \leq 7.8458$ m. los colores azul y verde claro son los valores bajos del semivariograma y los colores marrón y crema son los valores altos, se nota que a medida que los cuadrillos se alejan del origen los valores del semivariograma de superficie aumentan esto indica que los valores se hacen más desiguales a medida que aumenta la distancia.

$$\gamma(h) = \begin{cases} 1 - \frac{-3h}{7.8458} & \text{para todos } h \leq 7.8458 \end{cases}$$

From the model and graphically it can be defined that nugget effect is 1.5810, and scope is 7.8458. Nugget effect shows the discontinuity of semivariogram for distance shorter than samples. Part of this discontinuity can be due measurements errors and to variability at a scale lower than sampled. The fact is that there is space variability between yield measurements in hg ha⁻¹ due nugget effect and at the same time space dependance is kept up to values of $de \leq 7.8458$ m. Blue and clear green colors are the low values of semivariogram and brown and cream color are high values, it is seen that in the extent the squares get away from origin surface semivariogram values increase, which means that values are more uneven as the distance increases.

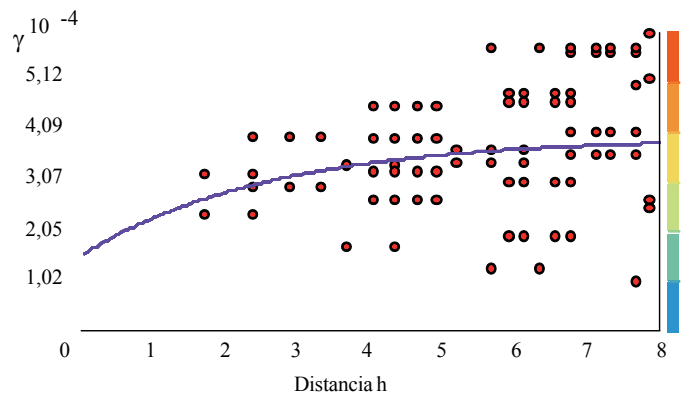


Figura 7. Semivariograma para rendimiento del cultivo (kg ha⁻¹). Modelo exponencial ajustado a los datos del semivariograma omnidireccional.

Figure 7. Semivariogram for crop yield (kg ha⁻¹). Exponential model adjusted to data of omnidirectional semivariogram.

The geographic map shows how yields are distributed in the square formed by four adjacent sprays (Figure 8). The darkest portions correspond to areas with highest yields. Probably many uncontrolled soil-related factors affected this distribution pattern, besides variability in applied water sheet distribution.

Conclusions

Space variability between total sheet (mm) from received irrigation was minimum and its dependence is in a radius of 5.70 m.

El mapa geográfico muestra como se distribuyen los rendimientos en el cuadrado conformado por cuatro aspersores adyacentes (Figura 8). Las partes más oscuras corresponden a áreas que registraron los más altos rendimientos. Probablemente muchos factores inherentes al suelo, no controlados influyeron en éste patrón de distribución además de la variabilidad en la distribución de la lámina de agua aplicada.

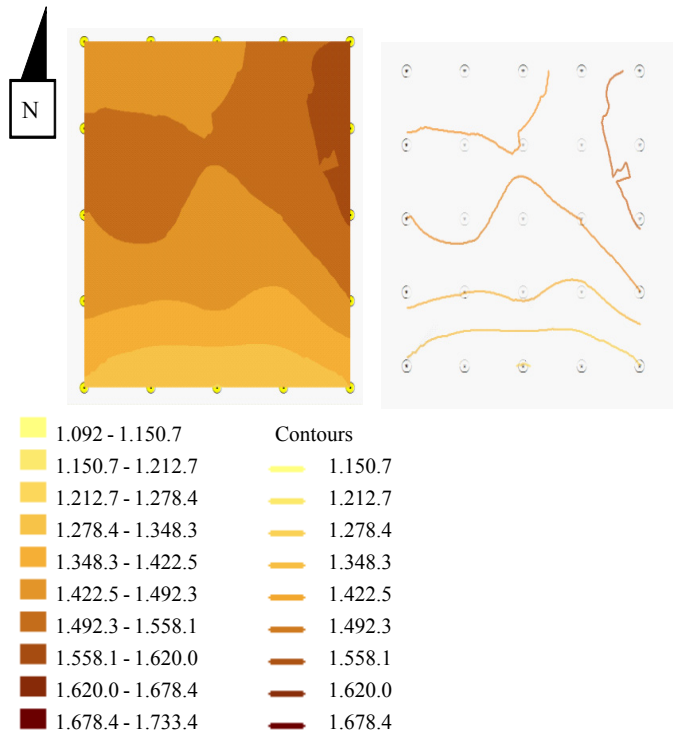


Figura 8. Mapa geográfico e isolíneas para la variable rendimiento (kg ha⁻¹).

Figure 8. Geographic map and isoline for variable yield (kg ha⁻¹).

Conclusiones

La variabilidad espacial entre lámina total (mm) de riego recibida fue mínima y su dependencia está en un radio de acción de 5.70 m.

Los rendimientos (hg ha⁻¹) presentan mayor variabilidad espacial de acuerdo con el valor presentado en el efecto pepita y su dependencia tiene un radio de acción de 7.84 m.

Para futuras investigaciones es recomendable adicionar otros factores como la variabilidad del suelo con el objetivo de encontrar una mejor explicación a dicha variabilidad.

Yields (hg ha⁻¹) have higher space variability according to value shown in nugget effect and its dependence has a radius of 7.84 m.

For future researches is advisable to consider other factors such as soil variability with the aim to find a better explanation of such variability.

End of the English version



Literatura citada

- ArcGis ver 9.3.1. Copyright© 2001, 2003-2008. ESRI USA.
- Arik, A. 1990. Effects of search parameters on kriged reserve estimates. *Int. J. Mining Geol. Engin.* 8(12) 305-318.
- Berenson, L. y David, M. 2001 *Estadística para administración*. 2^{da} Edición. Editorial Alambra Mexicana, S. A. México, D. F. 203-213 pp.
- Bivand, R. S. and Enzer, J. P. 2008. Application spatial data analysis with R. 2nd. Springer Science + Bussine media. LLC. EEUU. 185-205 pp.
- Burguess, T. M. and Webster, R. 1980. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties I. The semi-variogram and punctual kriging, *J. Soil Sci.* 31:315-331.
- Campagna, M. 2005. *Gis for sustainable developmen.* Universita delgi studi di cagliari. Italy. CRC Press, August 29. 93-105 pp.
- Chan, K. S. and Cryer, J. D. 2008. Time series analysis with applications in R. 2nd. Springer Science + Bussine media. LLC. USA. 155-157 pp.
- Cressie, N. 1986. Kriging nonstationary data. *Journal of the American Statistical Association.* 81:625.634.
- David, M. 1977. *Geostatistical ore reserve estimation.* Elsevier. Amsterdan. 68 p.
- Dorenbos, J. and Pruitt, W. O. 1977. *Crop water requeriments.* Irrigation and Drainage Paper 24. FAO, Roma. 144 p.
- Guimaraes, T. C. 2000. *Analise de dados espaciais utilizando a metodologia geoestadística.* UNEXP Departamento de Engenharia Rural. Campusche Botucatu. Botucatu-SP. Abril- Mayo, 2000.
- Matheron, G. 1963. *Traité de géostatistique appliquée.* Ediciones Technip, Paris. 63-96 pp.
- Waller, L. G. 2004. *Applied spatial statistics for public health data,* chaper appendix. Wiley. URL: <http://www.sph.emory.edu/Iwaller/WGindex.htm>. 3 p.

