

Análisis de la variabilidad espacial del peso unitario seco en un sector céntrico de la ciudad de Rosario. Uso de técnicas geoestadísticas.

Sosa Virginia, Zimmermann Erik, Chiarito Eugenia, Bessone Carlos

virrosa@fceia.unr.edu.ar ; erikz@fceia.unr.edu.ar; eugechiarito@gmail.com; cebesso@hotmail.com

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura - UNR

RESUMEN: Se cuenta con resultados de campo y laboratorio de más de 1.000 muestras ensayadas, entre los años 2007 y 2011, con profundidades hasta los nueve metros, en la sección catastral I de la ciudad de Rosario, ubicada entre Av. Pellegrini, Bvard. Oroño y el río Paraná, abarcando una extensión aproximada de 500 Has. Debido a su baja variabilidad temporal, se analizó el peso unitario seco para las muestras a distintas profundidades. Para cada profundidad se ajustaron variogramas teóricos mediante técnicas geoestadísticas. Se presentan las cartas de isovalores de peso unitario seco interpolados mediante kriging analizando el grado de correlación espacial a diferentes profundidades. Se verifica la robustez del método estadístico empleado, mediante la calibración de parámetros geoestadísticos con un número menor de muestras y la posterior contrastación con los valores obtenidos de los ensayos en muestras restantes. Hasta el presente se consideran satisfactorios los resultados de validación alcanzados. No obstante debe aclararse que la extrapolación de parámetros hacia otras áreas no exploradas resulta útil preferentemente para estudios preliminares. La metodología utilizada y validada será investigada para otros parámetros geotécnicos e hidrológicos en posteriores trabajos.

Palabras clave: PESO UNITARIO SECO – KRIGING – GEOESTADÍSTICA –ROSARIO - GEOTECNIA

ABSTRACT: There are over 1.000 field and laboratory available data of site geotechnical investigation, between 2007 and 2011, with depths up to nine meters, in cadastral section I of the city of Rosario, between Pellegrini Avenue, Oroño Boulevard and Paraná River, embracing about 500 Has. Due to its low temporal variability, the bulk density was analyzed for the samples at different depths. For each depth theoretical variograms were adjusted using geostatistical techniques. Isophlets of each bulk density are plotted using kriging, analyzing the degree of spatial correlation at different depths. The method reliability was verified through geostatistical parameters calibration for a number of samples and its comparison with values from the corresponding samples. So far the validation results are considered satisfactory. However it must be stated that the parameters extrapolation to other non-explored areas is useful preferably for preliminary studies. The applied and validated methodology will be researched for other geotechnical and hydrological parameters in future investigations.

KEYWORDS: BULK DENSITY – KRIGING – GEOSTATISTIC – ROSARIO- GEOTECHNICAL

1 GENERALIDADES

1.1 Introducción

La necesidad de contar con información confiable de los suelos que interactúan con las estructuras dentro de la resolución de problemas de Ingeniería Civil, atribuye relevancia al conocimiento de las masas de suelo, en cuanto a sus propiedades físicas, relación tenso-deformación y su comportamiento hidráulico.

Las propiedades y condiciones que se indican en los estudios de suelos, son el resultado del análisis de los ensayos de campo y de laboratorio, tomando como referencia los datos recopilados de los sondeos y diferentes muestreos realizados.

Si bien son resultados discretos, se asumen representativos de todo el predio en estudio a fin de establecer una imagen global y única de la estratigrafía a utilizar en el problema.

Teniendo en cuenta la variabilidad de los parámetros geotécnicos en su distribución espacial y temporal, resulta de compleja realización un análisis estadístico global. Por este motivo se ha comenzado el estudio de variabilidad de algunos parámetros geotécnicos aislados.

Debido a su baja variabilidad temporal, se analizó en este trabajo inicial, el parámetro geotécnico *peso unitario seco* para muestras a distintas profundidades. Cabe mencionar que este parámetro presenta una elevada correlación con la conductividad hidráulica junto a otras variables que controlan la aptitud para retener el agua en el material sedimentario. Por ello, el peso unitario seco casi siempre está presente en las funciones de edafotransferencia que relacionan parámetros físicos-químicos e hidráulicos.

Los datos fueron obtenidos de una base de datos con 66 localizaciones ubicadas en el barrio Centro de la ciudad de Rosario, entre los años 2007 y 2011. Específicamente el área estudiada comprende la limitada por la avenida Pellegrini, Boulevard Oroño y el río Paraná

Sin embargo, se considera que la extrapolación de datos a localizaciones diferentes de las correspondientes a las de las muestras puede conducir a interpretaciones imprecisas o de representatividad reducida. Por ello se recomienda corroborar los datos de este estudio con mediciones específicas de cada predio que así lo requiera.

La problemática a abordar en este trabajo es el análisis de la variabilidad espacial de la densidad seca medida a diferentes profundidades.

1.2 Antecedentes geológicos y geotécnicos

A fin de lograr una mejor interpretación de los datos se enuncian los principales rasgos geológicos encontrados, siendo una región definida por una determinada sucesión estratigráfica, un estilo estructural propio y rasgos geomorfológicos peculiares.

Rosario pertenece a la *provincia geológica* denominada *Llanura Chaco-Bonaerense*, cuyo período de pertenencia es el Cuaternario. Los sedimentos estudiados corresponden a la Cuenca sedimentaria Llanura Pampeana, Subcuenca morfoestructural Rosario, la cual describe un arco que limita al este con el río Paraná y comprende una zona encerrada entre el extremo sudeste de la provincia de Santa Fe y una porción del noreste de la provincia de Buenos Aires.

La estratigrafía resulta conocida principalmente a partir de perforaciones realizadas sobre un eje entre Maciel y Villa Sauce, siendo descripta por Padula, Ref.[1]. De acuerdo a la descripción de este autor el perfil estratigráfico está compuesto por un manto de unos quinientos metros (500m) de espesor compuesto por limos y arcillas en la parte superior, y areniscas, calizas y basaltos que se encuentran sobre granitos y metamorfitas precámbricas.

La geología de la subcuenca Rosario ha sido estudiada por el Instituto de Fisiografía de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA) de la Universidad Nacional de Rosario (UNR). Parent et al., Ref. [2], denominan como *Formación Saladillo*, de espesor poco variable, presentando los mayores espesores hacia el este, cuya descripción es "Conjunto de veinte a treinta y tres metros de espesor constituidos por limos, limos finamente arenosos, arcillas y margas (tosca) marrón, poco coherente, friables, con carácter loésico dominante, de colores amarillo claro a marrón rojizo. La unidad asienta sobre el cuerpo sedimentario clástico denominado localmente Ensenadense, constituido por arenas

finas, amarillentas a marrón rojizas, laminadas. Desde la base alternan cuatro lentes de arcillas, a veces ligeramente margosas, lacustres, de color verde." Las arenas finas laminadas descansan sobre el horizonte identificado como Puelchense, compuesto por arenas cuarzosas de grano mediano y grueso de color blanco amarillento.

Se puede observar en la sección tipo correspondiente a la descripción que existe una sucesión de cinco conjuntos de limos limitados por las arcillas lenticulares.

Resulta apropiado aclarar que las denominaciones de términos pampeano o *Formación Pampeana*, y post-pampeano o *Formación Post-Pampeana* originarios de la representación litológica de provincia de Buenos Aires, han sido referidas para describir los cuerpos sedimentarios locales que en parte serían equivalentes a la Formación Saladillo.

Estos suelos de origen eólico forman terrazas de marcada horizontalidad que han sufrido sucesivos períodos de humedecimiento y secado alternativos, representando un factor fundamental en el comportamiento mecánico de estos suelos, considerados cohesivos de carácter pre-consolidado.

Núñez, Ref. [3], además indica que esta acción se manifiesta también en el mayor o menor grado de fisuración producido por la desecación, y que ha permitido la infiltración heterogénea de agua, con la consecuente precipitación errática de carbonatos de calcio y manganeso.

Los limos y arcillas comprendidos en la zona céntrica de la ciudad de Rosario, presentan características típicas tales que en la Carta de Casagrande las muestras se ubican muy próximas a la línea A, de plasticidad variable y en general, bajo potencial de expansividad, Ref. [6].

En cuanto al tema propuesto, ha sido considerado como antecedente el proyecto final de carrera de grado Ingeniería Civil de la FCEIA, denominado Propuesta de metodología para la caracterización geotécnica del subsuelo en la ciudad de Rosario, realizado por Silvia M. Quemada y Abel R. Lorenth, Ref. [4], cuyo director técnico de proyecto fue el Ing. Carlos E.H. Bessone. En este trabajo se presentan cartas con curvas de isovalores de características geotécnicas de la misma zona en estudio, sobre una base de datos de más de diez mil muestras tratadas estadísticamente. Los parámetros geotécnicos representados fueron el peso unitario húmedo y la humedad, para cada profundidad de referencia.

1.3 Tareas de campo y laboratorio. Peso unitario seco

Se obtuvieron, de estudios de suelos realizados en la zona, las propiedades geotécnicas relevantes a fin de determinar los parámetros de diseño geotécnico. Para la selección de estos parámetros se consideró la información obtenida en ensayos de campo y laboratorio así como los antecedentes disponibles de cada predio y zona.

La pre-consolidación de estos suelos indica baja variabilidad estructural, ya que la estructura floculada original ha sido comprimida y arreglada en un nuevo orden, este hecho ha sido comprobado también como resultado de este análisis.

Los datos recopilados corresponden a distintas profundidades, referidas al nivel de terreno natural. Las profundidades estudiadas son: 1,50 m; 2,50 m; 3,50 m; 4,50 m; 6,00 m; 7,50 m y 9,00 m.

Se ha considerado que la distribución en planta y cantidad de prospecciones son adecuadas a la superficie y extensión de las obras, complejidad del terreno y a las particularidades de los proyectos, que en general resultaron viviendas individuales y colectivas (Fig. 1).

La profundidad máxima de investigación, se ha considerado como límite de estudio existente en todas las prospecciones, siendo suficiente para identificar riesgos de origen geotécnico y determinar parámetros de diseño para el uso del suelo urbano, permitido para la zona por la Municipalidad.

Esta información, debidamente archivada, con ayuda de planillas electrónicas, ha permitido el análisis de los mismos en cuanto a su variabilidad propia.

El empleo de técnicas geoestadísticas de análisis ha permitido una mejor interpretación en cuanto a la caracterización de los suelos de la zona.

Las técnicas de exploración o campaña utilizadas corresponden a técnicas habituales de perforación en la región, de tipo manual, con barreno, con inyección de agua en profundidad. Se ha utilizado la herramienta para extracción de muestras tipo sacamuestras Moretto, extraídas en el mismo momento que se realiza el ensayo SPT (Standard Penetration Test). Debido a las características estables de las paredes de las perforaciones, no suele utilizarse encamisado ni lodo bentonítico durante la ejecución de los sondeos.

Luego se acondicionan las muestras, que son trasladadas al laboratorio para su posterior procesamiento. El parámetro geotécnico básico que se ha estudiado es el *peso unitario*, también denominado peso o densidad aparente. Es la relación entre el peso de una masa de suelo (fases sólida y líquida) y el volumen total (fases sólida, líquida y gaseosa).

El peso unitario seco expresa la relación existente entre el peso de las partículas sólidas de un suelo y el volumen total, siendo invariable con el contenido de agua.

La decisión de analizar el peso unitario seco para este trabajo corresponde a que es un parámetro que resulta independiente del tiempo. Al investigar la variabilidad espacial, resultó de gran utilidad el poder eliminar la variación en el tiempo. Luego, con los valores correspondientes de humedad, es posible estudiar también el peso unitario húmedo, aunque en la zona afectada por movimientos del nivel freático sería poco representativo. Para estas determinaciones es necesario proceder de acuerdo a las indicaciones de las normas correspondientes del Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), IRAM 10.519/70: Contenido de humedad natural ; IRAM 10.506/61: Peso unitario - Peso específico aparente.

El peso unitario seco se obtiene como resultado de la siguiente expresión:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{(1 + \omega)} \quad (1)$$

Donde:

γ_d : peso unitario seco, γ_h : peso unitario húmedo y ω : contenido de humedad.



Figura 1. Ubicación de los lugares de muestreo en el casco céntrico de la ciudad de Rosario.

1.4 Geoestadística

La geoestadística es una herramienta imprescindible para analizar patrones de distribución espacial de datos provenientes de disciplinas tales como minería, geología, edafología, ecología y otras. Comprende un conjunto de herramientas y técnicas que sirven para analizar y predecir los valores de una variable que se muestra distribuida en el espacio o en el tiempo de una forma continua, por lo que usualmente son estudiados a través de mapas. En general nos interesa el estudio de algún aspecto de estos datos ya sea sus valores máximos, mínimos o medios sobre alguna área de interés.

Para el análisis de este tipo de datos, distribuidos espacialmente, existen procedimientos de diversos orígenes, pero se pueden agrupar en forma general en dos grandes metodologías: (a) esquemas determinísticos y (b) esquemas estadísticos ó estocásticos. Los primeros emplean funciones matemáticas de varios tipos y grados de complejidad para ajustar superficies $z(x)$ a través de los puntos, donde x representa a las coordenadas espaciales. Una vez que esto se hace puede determinarse el valor del estimador $z'(x)$ de la superficie $z(x)$ para cualquier posición (Fig. 2).

Los métodos estadísticos parten de la base que los datos espaciales proceden de una realización de procesos aleatorios. Consecuentemente, la estimación de $z(x)$ puede hacerse en términos de probabilidad. Las funciones empleadas para la modelación están basadas en expresiones de probabilidad simples en el dominio espacial.

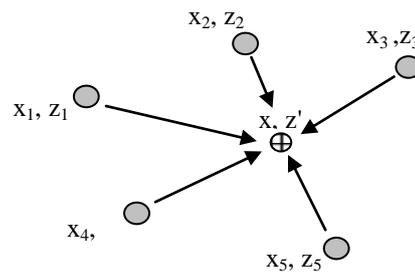


Figura 2. Esquema de predicción de variable $z(x)$

La selección del método de la interpolación depende principalmente de la naturaleza de la variable y su variación espacial asociada.

El principio básico de interpolación establece la suposición que en distancias cortas es probable que los valores de una variable sean más similares que a distancias más grandes.

Para examinar si esto es verdad y analizar cómo cambia la *similaridad* (entorno de similitud) con la distancia se debe realizar una exploración de los datos espaciales. Esto es lo que se analiza en la denominada geoestadística o estadística espacial.

Todo trabajo geoestadístico se lleva a cabo en tres etapas:

1. Análisis exploratorio de los datos: Consiste en la aplicación de técnicas descriptivas al conjunto de datos disponible, con el fin de conocer su distribución e identificar datos erróneos, pero sin tener en cuenta su distribución geográfica. Es la etapa de aplicación de la estadística clásica.
2. Análisis variográfico o análisis estructural: Está compuesto por el cálculo del semivariograma experimental y el ajuste a éste de un modelo teórico conocido. El semivariograma experimental es la herramienta geoestadística más importante en la determinación de las características de variabilidad y correlación espacial del fenómeno estudiado, es decir, permite conocer cómo la variable cambia de una localización a otra.
3. Predicciones: Consiste en realizar estimaciones de la variable en los puntos no muestreados, es decir, estimar valores desconocidos a partir, no sólo de los conocidos, sino también de su estructura de continuidad espacial. Con la información procedente de la estimación se puede realizar una serie de mapas sobre la distribución de la variable en el área de interés.

1.4.1 Estructura de correlación espacial

Pueden compararse los valores de $z(x)$ de a pares y expresarse tales comparaciones en función de varianzas o covarianzas. La estructura de la correlación espacial puede examinarse de varias maneras, pero normalmente es analizada por el método llamado semivarianza.

La semivarianza, $\gamma(h)$, es una medida del grado de dependencia espacial y se define como:

$$(2)$$

Donde:

n es el número de pares de puntos con distancia h , $z(x_i)$ es el valor de la variable a la posición x_i y $z(x_i+h)$ es el valor a una distancia h de x_i . Las distancias h entre los pares de puntos de la observación se llaman retraso ó lag.

La gráfica de la semivarianza contra distancia h se denomina semivariograma. En este tratamiento se asume que la variación es independiente de lugar y dirección (propiedad de isotropía). El semivariograma es una herramienta básica para examinar la estructura de correlación espacial.

El denominado *umbral* del semivariograma es un valor meseta que alcanza a una distancia (o retraso) referida como *rango*. El umbral es a menudo igual a la varianza estadística de la serie de datos. El rango es la distancia a la que el umbral se alcanza, indicando que los valores de la variable no están más correlacionados a distancias mayores que el rango.

Se considera que la presencia de una parte horizontal de la curva en el semivariograma experimental es un caso ideal. En ciertos casos, el semivariograma experimental no exhibe un umbral y esto se da en algunos casos donde cabe esperar que el patrón espacial no es estacionario. En otros casos, suele ocurrir que para $h = 0$, la varianza no se anula, dando lugar a un efecto denominado *pepita* o *nugget* y el mismo puede asociarse a errores de medición.

1.4.3 Método de kriging.

El objetivo del método de krigeado es obtener una estimación de una variable $z(x)$, en determinada región como una combinación lineal de valores medidos en puntos de observación y además conocer la varianza del error de estimación. Por ser lineal el estimador se puede expresar de la siguiente forma:

$$z(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (3)$$

Donde:

n es el número de puntos de observación, $z'(x)$ es el valor a estimar de la variable en la posición x y los parámetros λ_i se denominan coeficientes de ponderación o coeficientes de krigeado.

El error de estimación es la diferencia entre el valor estimado y el verdadero (desconocido) $z'(x) - z(x)$, el cual debe ser minimizado. Así, el error de estimación debe tener el error medio cuadrático más pequeño, que constituye la condición de mínima varianza. La varianza del error se minimiza usando la teoría de funciones aleatorias y aplicando mínimos cuadrados resultando un sistema de ecuaciones lineales. Los pesos óptimos son determinados resolviendo:

$$\Gamma(x_0, x_j) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \Gamma(x_i, x_j) + v \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (5)$$

Donde el sistema de ecuaciones (3) se extiende con $i=1, \dots, n$, $\gamma(x_i, x_j)$ es la semivarianza de los estimados $z'(x_i)$ y $z'(x_j)$, x_i, x_j es la distancia entre los puntos muestreados, $\Gamma(x_i, x_0)$ es la semivarianza del valor estimado $z'(x_i)$ y de la variable aleatoria z' en el punto de interpolación x_0 , v es un parámetro conocido como coeficiente de Lagrange.

Para las semivarianzas $\gamma(x_i, x_j)$ se adoptan modelos teóricos de semivariogramas con abatimientos lineales, exponenciales o gaussianos en función del retraso h .

2 PROCEDIMIENTO

2.1 Tratamiento de datos

En primer lugar se procedió a seleccionar los trabajos realizados en la zona comprendida entre las calles Boulevard N. Oroño, Avenida C. Pellegrini y el río Paraná de una base de datos amplia de trabajos ejecutados durante los años 2007 y 2011 por el Ing. Carlos E.H. Bessone, quien generosamente facilitó la información.

Luego se volcó en una planilla de cálculo electrónica la información correspondiente a localización, fecha, cantidad, identificación y profundidad de los sondeos. También número de golpes de SPT, peso unitario húmedo y humedad para cada muestra y profundidad hasta los 9.00 m. Se calculó para cada muestra el valor correspondiente de *peso unitario seco*.

Se procedió a georeferenciar las posiciones de los distintos predios con Google Earth, programa de libre uso, basado en información satelital.

A continuación se procedió a promediar, para cada predio, los valores de peso unitario seco ajustados a la misma profundidad. El motivo de esta decisión fue que al georeferenciar mediante el empleo de imágenes satelitales, las distancias entre muestras en un mismo predio son un orden de magnitud mayor que las distancias entre los predios muestreados (Fig. 1- Imagen satelital con los puntos muestreados).

Finalmente se georeferenció cada predio utilizando imágenes del Google Earth, obteniendo coordenadas geodésicos (Lat-Lon). Se efectuó una transformación de coordenadas a un sistema cartesiano, POSGAR WGS 84. Se cuenta entonces con tres datos básicos para el análisis geoestadístico, cuyas coordenadas responden al siguiente criterio: $(x, y, z) = (\text{latitud}, \text{longitud}, \text{peso unitario seco})$.

El análisis de los resultados se abordó mediante el uso de herramientas geoestadísticas consideradas apropiadas.

3 RESULTADOS DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL

3.1 Análisis exploratorio de los datos

El análisis exploratorio de datos, considerando todos en un mismo conjunto, sirve para detectar observaciones atípicas y analizar la simetría de los histogramas.

Tabla 1. Estadísticos de los Pesos unitarios secos (KN/m^3) de las muestras extraídas.

	Profundidades (m)						
	1,5	2,5	3,5	4,5	6,0	7,5	9,0
Mínimos	12,8	12,1	12,4	13,5	13,6	13,4	13,0
25%-cuartil	14,3	14,0	14,5	14,6	14,6	14,3	14,5
Mediana	14,8	14,6	14,8	15,0	15,0	15,0	15,4
75%-cuartil	15,2	15,0	15,2	15,4	15,6	15,7	16,1
Máximos	16,2	16,9	16,2	17,3	17,1	17,3	18,0
Valor medio rango	14,5	14,5	14,3	15,4	15,3	15,4	15,5
Rango	3,4	4,8	3,7	3,8	3,4	3,9	4,5
Promedio	14,7	14,5	14,8	15,0	15,1	15,1	15,4
Desvío estándar	0,74	0,76	0,63	0,71	0,76	0,95	1,06
Coef. Variación	0,05	0,053	0,042	0,0475	0,0502	0,063	0,069
Coef. Simetría	-0,524	0,099	-0,642	0,566	0,1156	0,411	0,291

En la Fig. 1 se representan el rango y valor central de los datos junto con el promedio para las diferentes profundidades analizadas. Por las particularidades mencionadas en el punto anterior cabría esperar diferentes estadísticos para los primeros metros de profundidad y las muestras más profundas. En Tabla 1,

se muestran medianas, cuartiles, extremos, rangos, promedios y coeficientes de variación y simetría para las diferentes profundidades.

Puede observarse una tendencia general, lógica, a aumentar la densidad seca con la profundidad, tanto para las medias como las medianas. Las distribuciones parecen bastante simétricas, como se observa en la Fig. 3, con coeficientes de simetría son muy cercanos a 0 (Tabla 1). Los coeficientes de variación son bajos, lo que muestra que hay poca dispersión alrededor de los valores medios.

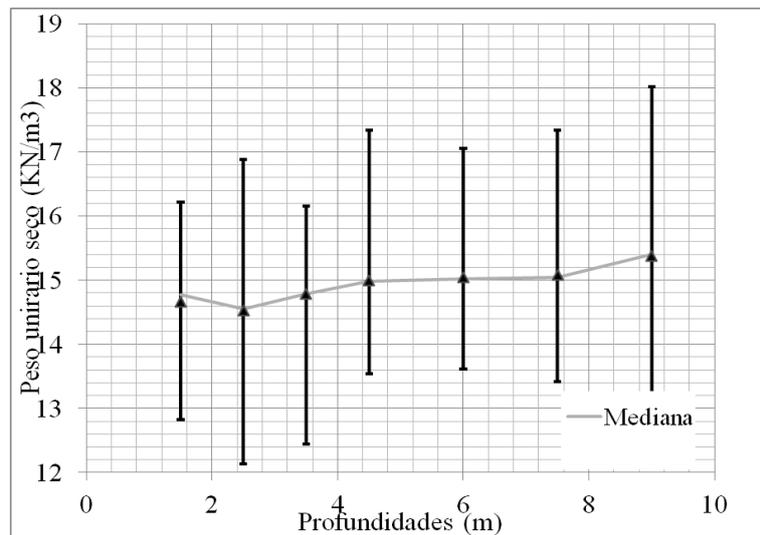


Figura 3. Pesos unitarios secos en función de la profundidad, las barras verticales representan los valores extremos relevados en cada profundidad, la línea gris las medianas y los triángulos los valores medios, respectivamente.

3.2 Diagramas Post Plot

El gráfico post-plot es un gráfico en donde se ubica la variable de estudio con los valores extraídos de las muestras clasificados en cuartiles y representados a través de distintos símbolos. Es decir, primeramente se ordenan los valores del muestreo, se divide la muestra en cuartiles (Tabla 1), y se clasifican en el cuartil que corresponde, caracterizado mediante diferentes símbolos. Luego se ubican los mismos, en un mapa de datos con las coordenadas de cada muestra.

En esta investigación se realizaron las determinaciones para todas las profundidades correspondientes a la base de datos, mostrando en el trabajo algunas de ellas. El criterio seguido en la elección de las tres profundidades elegidas se centra en el estudio de la variable en el segundo grupo estratigráfico encontrado. La menor profundidad estudiada (1,50 m) se ubica cerca del techo del estrato, la intermedia en una profundidad cercana a la máxima utilizada como nivel de fundación en la zona céntrica de la ciudad (3,50 m) y la última representa aproximadamente el piso del estrato (6,00 m).

Las Fig. 4, Fig. 5 y Fig. 6 representan los diagramas para las muestras extraídas a 1,50 m, 3,50 m y 6,00 m de profundidad respectivamente.

En cuanto al comportamiento espacial del peso unitario seco, se observa que la localización de los distintos cuartiles en la zona estudiada no evidencia una concentración apreciable de los valores en un sector determinado, referida a la distribución de frecuencias analizadas. Por otro lado, tampoco se destaca una concentración areal de valores bajos o altos con la profundidad.

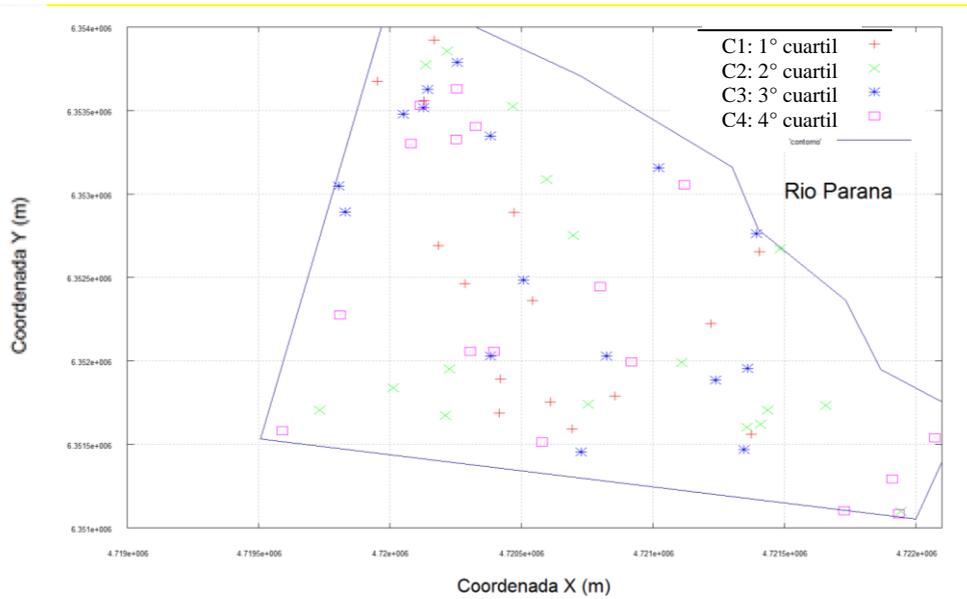


Figura 4. Diagrama Post Plot para profundidad 1,50 m

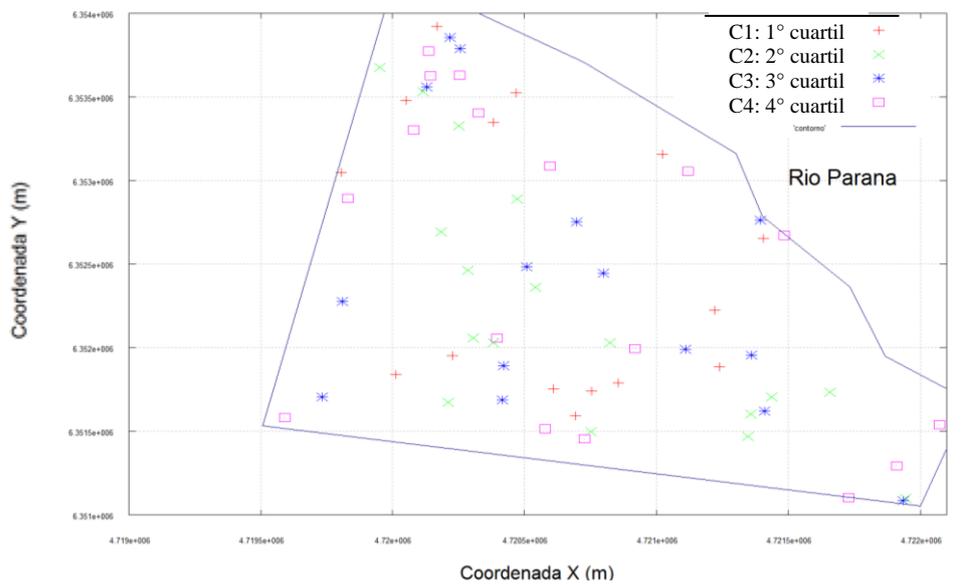


Figura 5. Diagrama Post Plot para profundidad 3,50 m

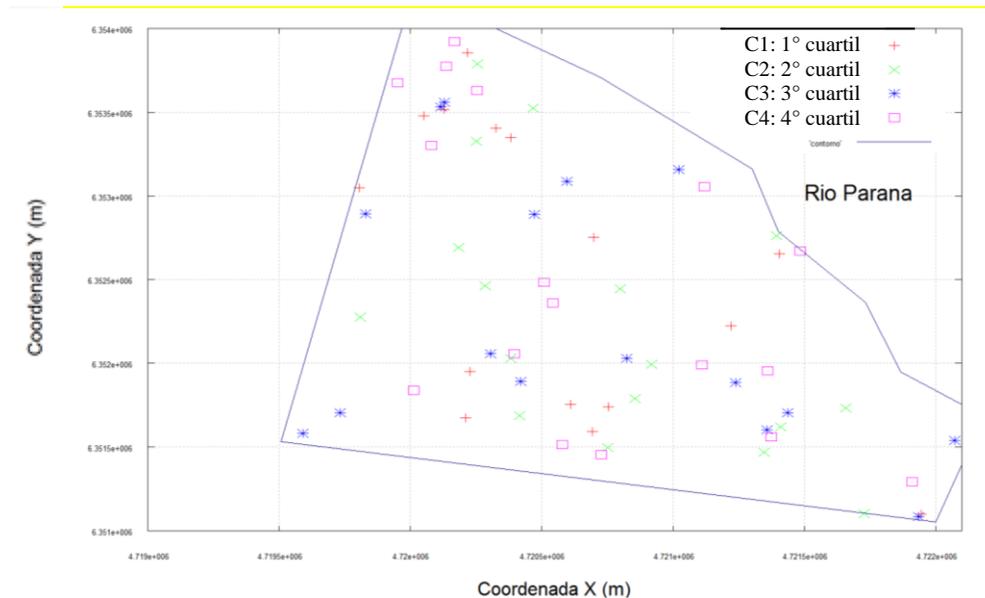


Figura 6. Diagrama Post Plot para profundidad 6,00 m

3.3 Cálculo de semivariogramas

Se calcularon los semivariogramas experimentales (ec. 2) con el programa VarioWin (Ref. [5]: Pannatier, 1996). Este software, diseñado únicamente para la exploración y modelado de semivariogramas, permite realizar el análisis estructural de datos espaciales y es de dominio público. Presenta cuatro rutinas independientes que permiten el procesamiento de datos para la confección del semivariograma experimental, el ajuste de modelos teóricos y, finalmente, la interpolación de datos para todo el dominio. Se aplicó el software mencionado, seleccionando un paso h de 350 m para los semivariogramas experimentales de superficie que se grafican en las Fig. 7, Fig. 8 y Fig. 9. El paso seleccionado garantizó la cantidad de pares de puntos suficientes para promediar las diferencias cuadráticas (ec. 2).

El *mapa de semivariograma* es una herramienta que, mediante las características propias, dan información que permite determinar direcciones de anisotropía de la variable en estudio.

En todos los mapas se observan sectores de borde sin color que indican una localización fuera del área de estudio.

La escala adoptada y la representación resultante merecen las siguientes consideraciones:

Comparativamente los valores correspondientes a la profundidad de 1,50m (Fig. 7) presentan mayor contraste que aquellos referidos a las profundidades 3,50 m y 6,00 m (Fig. 8 y Fig. 9). Una interpretación de estos resultados puede ser que a poca profundidad el suelo se ve afectado por la intervención propia de las fundaciones e instalaciones de las viviendas existentes previas a los estudios, ya que el casco céntrico refleja mayor densidad y antigüedad de construcción.

El semivariograma ajustado a 6,00 m de profundidad indica escasa dispersión de los valores. En este caso es posible buscar una explicación en la menor heterogeneidad producida por la deposición de varios metros de suelo de estratos superiores y la menor o casi nula influencia de las construcciones previas.

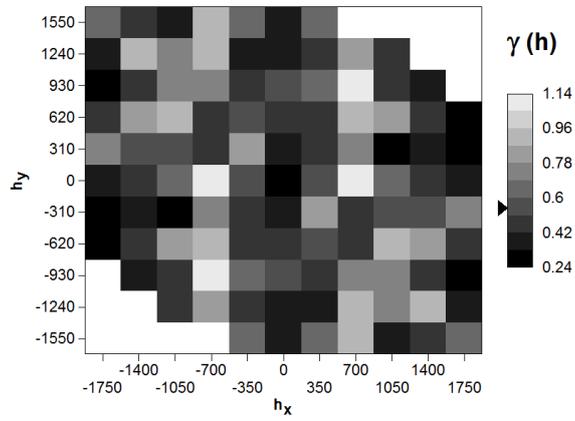


Figura 7. Semivariograma $\gamma(h)$ para profundidad 1,50 m

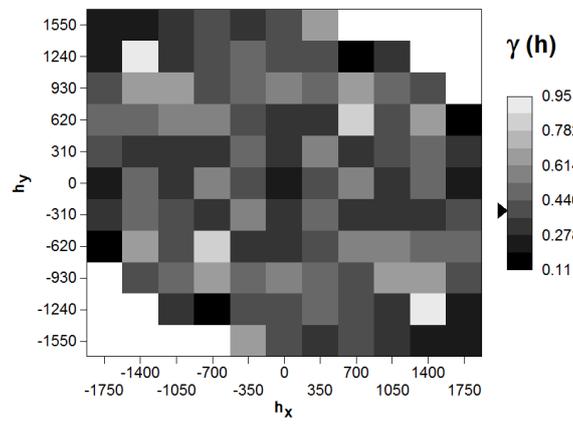


Figura 8. Semivariograma $\gamma(h)$ para profundidad 3,50 m

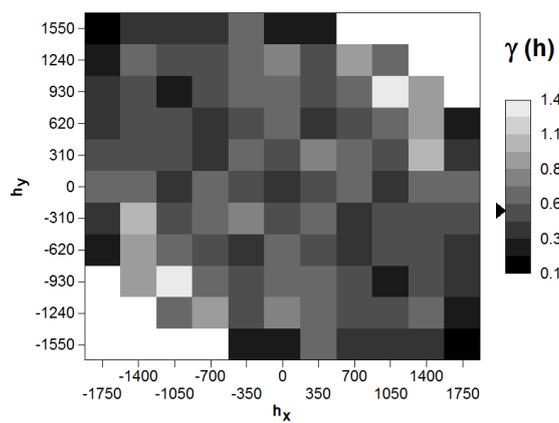


Figura 9. Semivariograma $\gamma(h)$ para profundidad 6,00 m

3.4 Semivariogramas omnidireccionales

Aquellos semivariogramas que no dependen de la dirección se encuadran en esta categoría, se puede pensar como el promedio del semivariograma experimental en todas las direcciones posibles. Tanto en los mapas de semivariogramas como en los diagramas post-plot no se verifican comportamientos de tipo anisotrópico en los pesos unitarios secos. Consecuentemente, se construyeron los semivariogramas omnidireccionales que se muestran en las Fig. 9, Fig. 10 y Fig. 11. En las mismas se grafican los semivariogramas experimentales (puntos) y los teóricos ajustados mediante el software *VarioWin* (líneas continuas).

Por simplicidad y buen ajuste alcanzado se utilizó el modelo exponencial como modelo teórico de los semivariogramas experimentales. En las Figuras se señalan los parámetros de ajuste, efecto pepita, rango y meseta, junto con el error cuadrático medio obtenido en el ajuste (RMSE). El factor anisotropía igual a uno indica que se ha adoptado un comportamiento isotrópico.

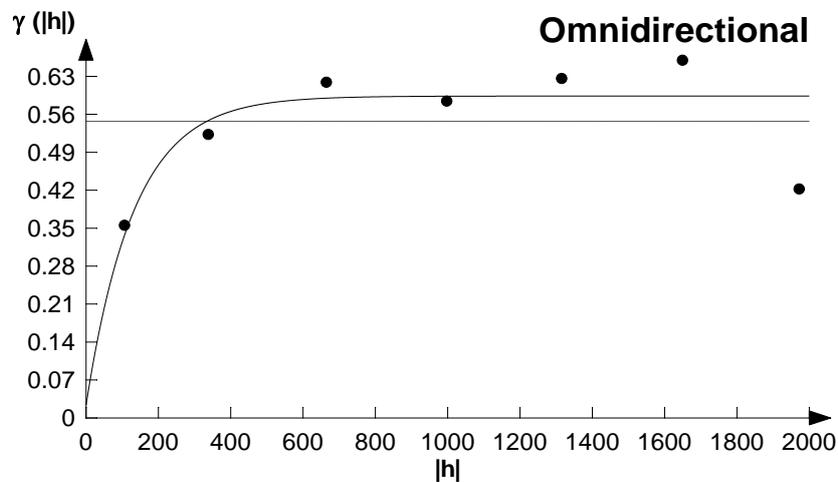


Figura 9. Semivariograma $\gamma(h)$ ajustado para pesos unitarios secos tomados a 1,50 m de profundidad. Parámetros: pepita = 0,024; rango = 400 m; meseta = 0,570; factor de anisotropía = 1; RMSE = 2,05e-02.

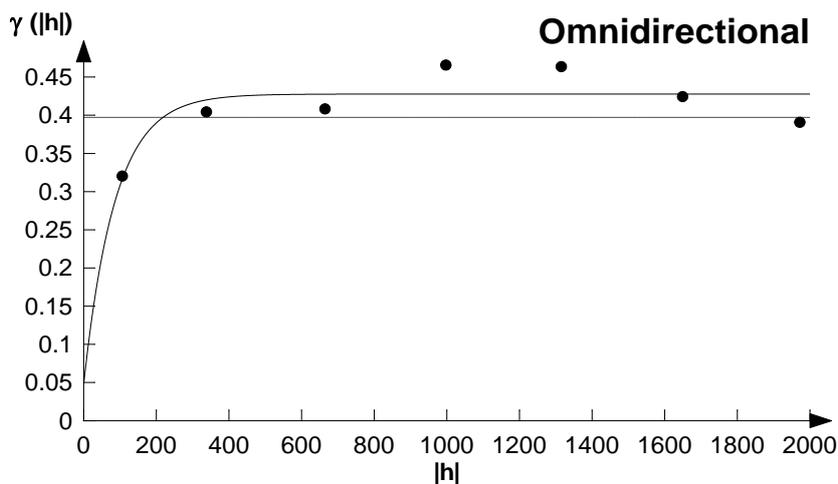


Figura 10. Semivariograma $\gamma(h)$ ajustado para pesos unitarios secos tomados a 3,50 m de profundidad. Parámetros: pepita = 0,048; rango = 260 m; meseta = 0,38; factor de anisotropía = 1; RMSE = 9,12e-03.

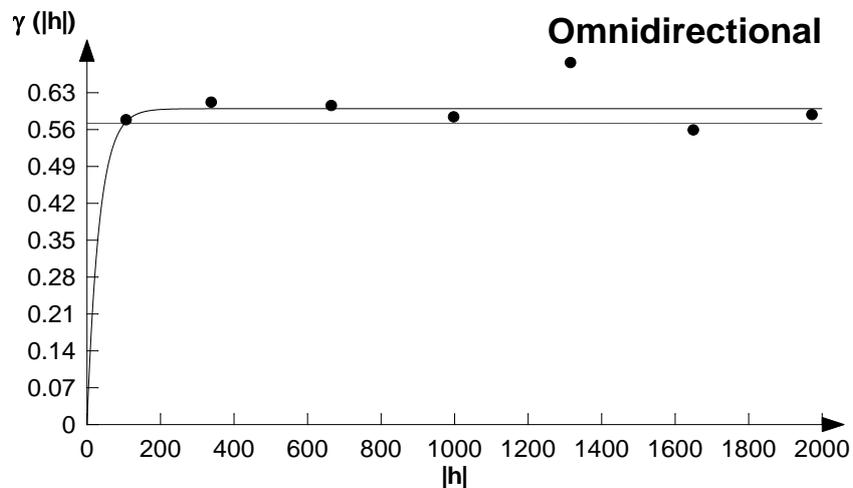


Figura 11. Semivariograma $\gamma(h)$ ajustado para pesos unitarios secos tomados a 6,00 m de profundidad. Parámetros: pepita = 0,0; rango = 100 m; meseta = 0,6; factor de anisotropía = 1; RMSE = 8,08e-03.

Puede observarse que el rango disminuye con la profundidad de análisis (400 m, 260 m y 100 m, para profundidades de 1,5 m, 3,5 m y 6,0 m, respectivamente). Esto hace presuponer que la *distancia significativa* de correlación espacial entre los datos disminuye con la profundidad. En otras palabras, los estratos más profundos presentan pesos unitarios secos con mayor grado de independencia estadística en el espacio, alcanzando más rápidamente la varianza regional.

4 PREDICCIONES Y VALIDACIÓN APLICANDO EL MÉTODO DE KRIGING

4.1 Predicción

Como se mencionara anteriormente, se realizan estimaciones de la variable en los puntos no muestreados. Con la información procedente de la estimación se puede realizar una serie de mapas sobre la distribución de la variable en el área de interés.

Se obtuvieron mediante kriging las líneas de isovalores de peso unitario seco, para las distintas profundidades analizadas. Para su construcción se utilizaron los semivariogramas teóricos ajustados que fueran mencionados en el punto anterior.

Aplicando el método de kriging, mediante uso del programa Golden Software Surfer 9.0, es posible representar las curvas de isovalores de peso unitario seco para cada profundidad. El mismo permite aplicar versiones generales de kriging proponiendo semivariogramas o utilizando los que propone por defecto, junto a otros algoritmos de interpolación (inversa de la distancia, mínima curvatura, etc.). El campo de valores generado permite la estimación en puntos donde no se han obtenidos muestras de peso unitario seco.

Se incluyen en las Fig. 12 y Fig. 13 con las curvas de isovalores de peso unitario seco a una profundidad de 1,50 m. La Fig. 12 expone curvas resultantes con la totalidad de las muestras observadas (66 datos), mientras que en la Fig. 13 se pueden ver las curvas con el 60% de las muestras (46 datos) elegidas al azar.

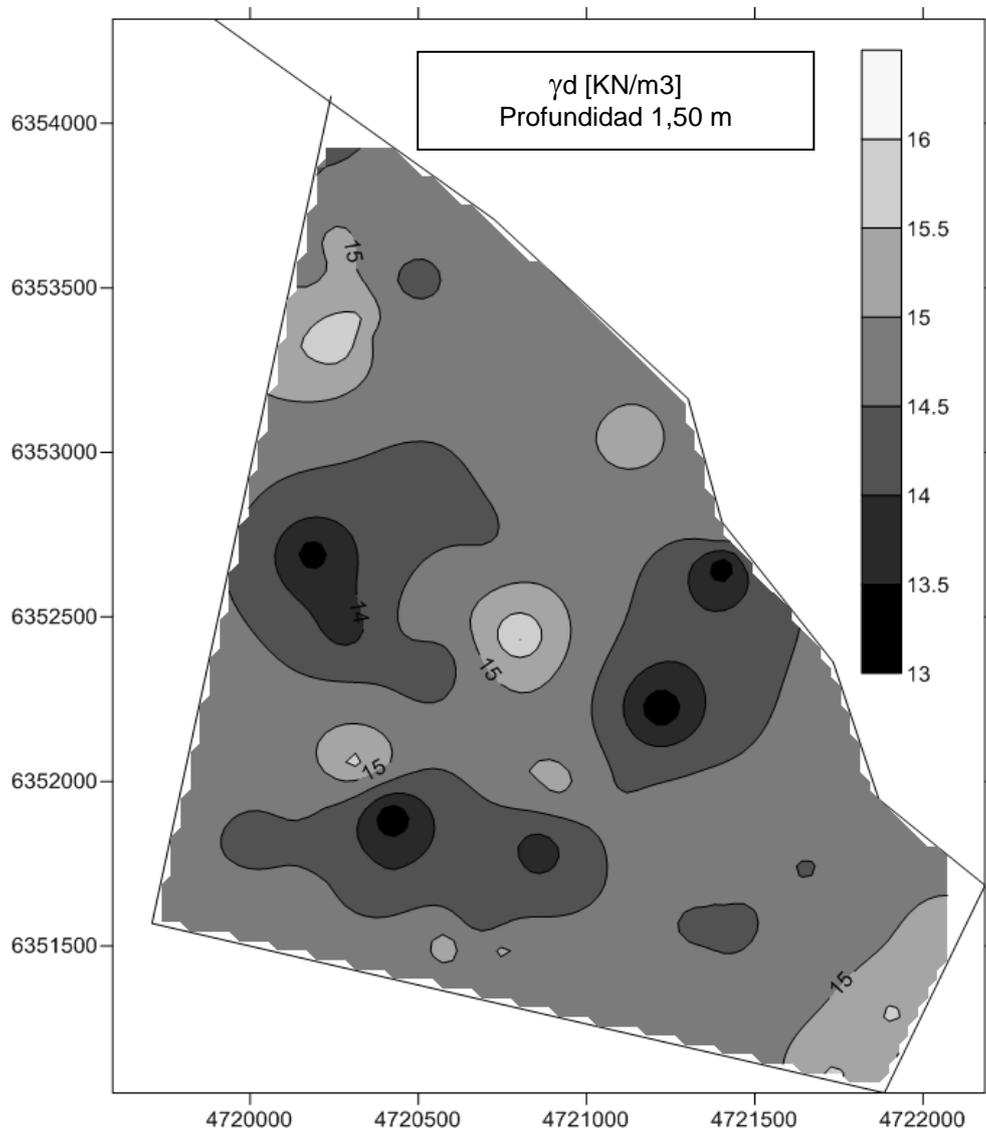


Figura 12. Curvas de isovalores de peso unitario seco, para una profundidad de 1,50 m, con la totalidad de las muestras observadas (66 datos)

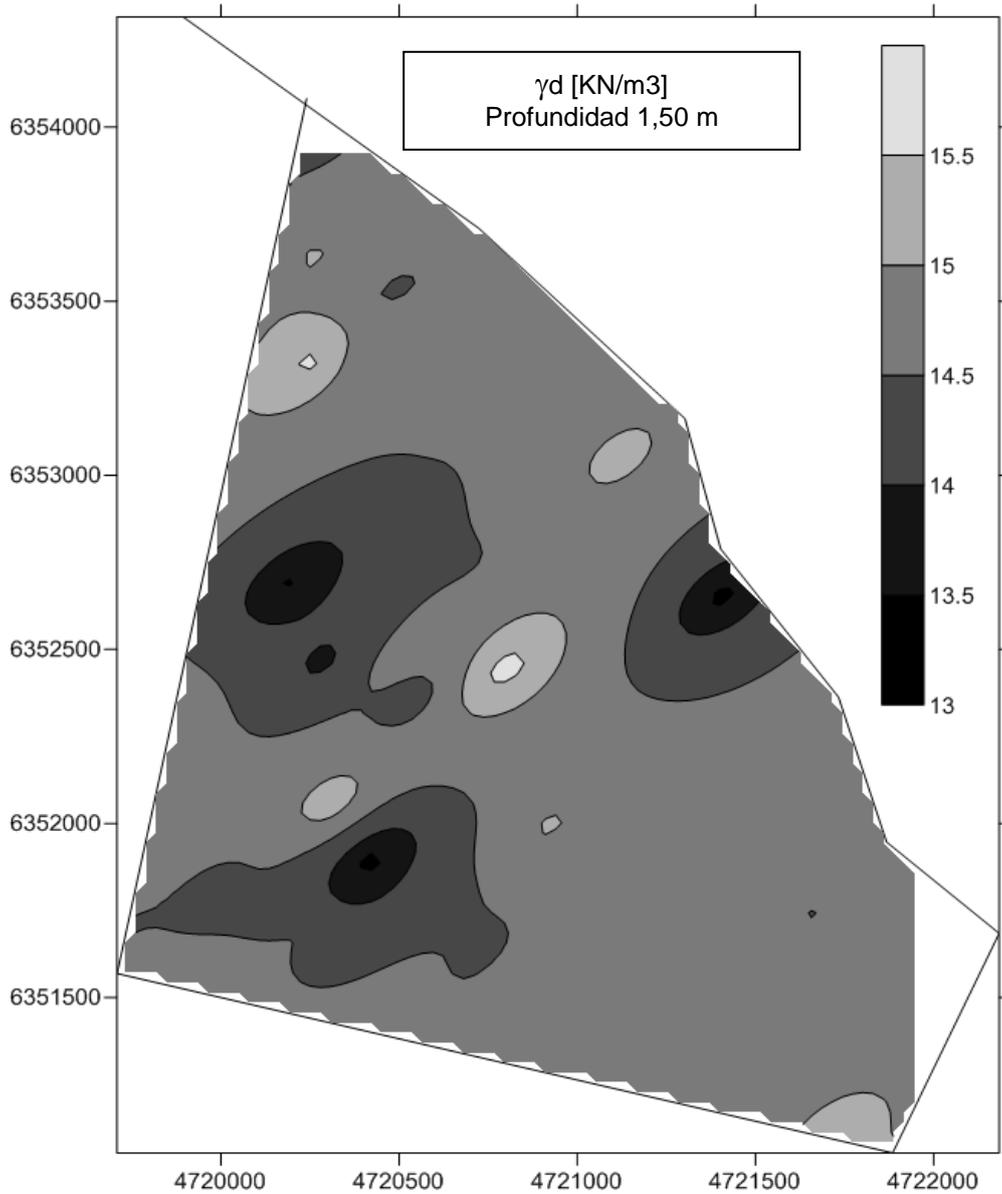


Figura 13. Curvas de isovalores de peso unitario seco, para una profundidad de 1,50 m, con el 60% de los muestras (46 datos) elegidas al azar.

4.2 Validación

Se realizó una validación del método, comparando los campos generados con todo el muestreo (66 datos por cada profundidad) y con aproximadamente el 60% de los datos (46 datos). Los datos no considerados en la validación se seleccionaron al azar de la muestra total. Tal como se mencionara anteriormente, en las Fig. 12 y Fig. 13 se muestra los resultados correspondientes para una profundidad de 1,50 m.

Se analizó también la robustez de los semivariogramas teóricos, comparando validaciones utilizando el semivariograma teórico exponencial ajustado y uno lineal que propone por defecto el programa Golden Software Surfer 9.0.

Como se observa en la Tabla 2, la robustez de predicción del semivariograma exponencial es mayor, ya que tanto el error cuadrático medio (RMSE) como el error relativo porcentual son menores para este caso.

Tabla 2. Valores comparativos de γ_d experimentales y teóricos

Puntos tomados como muestra			SV Lineal	SV Expon.
X m	Y m	γ_d obs KN/m ³	γ_d est KN/m ³	γ_d est KN/m ³
4721910,5	6351293	15,8	14,6	14,9
4722072,5	6351540	15,5	14,3	14,7
4721373,5	6351561	13,8	14,6	14,6
4719591,5	6351580	15,7	14,6	14,6
4721358	6351603,5	14,5	14,6	14,6
4720753,5	6351739,5	14,4	14,4	14,1
4720855,5	6351788,5	13,4	14,7	14,6
4721111,5	6351992	14,4	15,1	14,8
4720381,5	6352030	14,9	14,56	14,6
4720825	6352030	15,0	15,0	14,7
4720395	6352058	15,2	14,79	14,8
4721220	6352221,5	12,8	14,7	14,6
4721484,5	6352669,5	14,3	13,0	13,8
4721395,5	6352761,5	15,1	13,5	14,2
4720080	6353303	15,5	15,4	15,0
4720325,5	6353404,5	15,7	15,1	15,1
4720050	6353477	14,8	15,2	14,8
4719951	6353677	14,2	14,5	14,5
4720136,5	6353775	14,5	14,5	14,5
4720255,5	6353790,5	14,9	14,8	14,7
RMSE			0,88	0,72
Error relativo %			4,67	3,90

5 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se estudió la estructura espacial de los pesos unitarios secos, obtenidos de muestras a diferentes profundidades, observados en la zona céntrica de la ciudad de Rosario.

El objetivo perseguido fue verificar un modelo de variación espacial que ajuste al comportamiento estadístico observado en la zona estudiada y analizar la robustez de las interpolaciones realizadas con el método propuesto.

La elección para el análisis geoestadístico del parámetro geotécnico *peso unitario seco*, se ha fundamentado en su baja variabilidad temporal, reduciendo así interpretaciones sesgadas por la influencia del agua en el comportamiento del suelo. A los fines geotécnicos indica una medida de la estructura del del suelo, también esta propiedad frecuentemente está presente en las funciones de edafotransferencia que relacionan parámetros físicos-químicos e hidráulicos.

La metodología empleada consistió en caracterizar la estructura de correlación espacial, mediante el semivariogramas típicos para los pesos unitarios secos e interpolar valores mediante el método de kriging. En el análisis exploratorio preliminar se dedujo que no existen componentes anisotrópicas para ninguna de las siete profundidades analizadas. Los semivariogramas exponenciales seleccionados como modelo teórico de correlación espacial han permitido un buen ajuste con los experimentales.

De los resultados obtenidos mediante la interpolación mediante kriging puede concluirse que la metodología muestra gran robustez y confianza a la hora de predecir valores espaciales de pesos unitarios secos en puntos no medidos. Las validaciones realizadas considerando una submuestra, aleatoriamente seleccionada, con el 60% de los datos, mostraron errores relativos menores al 4%, cifra que se acerca a los errores típicos obtenidos en laboratorio para estimación de la variable analizada.

Se destaca la robustez del método utilizado así como para la variable analizada, teniendo en cuenta el mejor ajuste con un semivariograma de tipo exponencial sobre la función lineal propuesta por defecto por el software utilizado.

Se prevén posteriores trabajos analizando la metodología de interpolación empleada para otras variables geotécnicas y en otras zonas de análisis.

Este trabajo permite enfatizar que la geoestadística es una herramienta de gran utilidad y que debería ser de uso frecuente en el estudio de propiedades y comportamientos de los suelos, incrementando así la solidez en la interpretación de datos experimentales.

6 REFERENCIAS

- [1] Padula E. L., *Subsuelo de la mesopotamia y regiones adyacentes*, En: A.F. Leanza (ed.): Geología regional argentina 1, 1972, pp. 213-235.
- [2] Parent Horacio, Polare Marcelo y Lattuca Francisco., *Estratigrafía del cuaternario del sur de la provincia de Santa Fe, Argentina*, Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología 72-75, Rosario, 2010, ISSN 1666-115X, pp: 47-54.
- [3] Nuñez Eduardo, *Condiciones geotécnicas en la ciudad de Buenos Aires*, V ICIAEG Proceedings , Volumen 4, Buenos Aires, Ed: Horacio Víctor Rimoldi, 1986, pp. 2623-2630
- [4] Quemada Silvia M., Lorenth Abel R., *Propuesta de metodología para la caracterización geotécnica del subsuelo en la ciudad de Rosario*, Proyecto de Ingeniería de fin de carrera de grado Ingeniería Civil de la FCEIA, Rosario, mayo 1993.
- [5] Pannatier, Y. (1996). *VARIOWIN: Software for Spatial Data Analysis in 2D*. Springer-Verlag. New York.
- [6] Sosa V. et al. *Determinación del límite líquido. Método del penetrómetro de cono y correlación estadística con el método de Casagrande*, Memorias del XVII Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. SINERGIA 2004, Córdoba, octubre de 2004.