

MODELO DE INTERPOLACIÓN ESPACIAL MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA EL ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL SUELO

SPATIAL INTERPOLATION MODEL USING GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS TO STUDY THE SPATIAL VARIABILITY OF THE RESISTANCE TO PENETRATION OF SOIL

LIBARDO ANTONIO LONDOÑO CIRO

Decano Facultad de Ingeniería, politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, libaranto@une.net.co

JOSÉ RODRIGO RAMÍREZ BOLÍVAR

Especialistas En Información Geográfica, Universidad San Buenaventura Medellín, aldebaran10@gmail.com

GLORIA ISABEL RAMÍREZ BOLÍVAR

Especialistas En Información Geográfica, Universidad San Buenaventura Medellín, gloriaramirezster@gmail.com

CARLOS ANDRÉS ORDÓÑEZ ANTE

Ingeniero Geólogo Magíster en Geotecnia, Docente Asociado Politécnico Colombiano J.I.C., caosony@une.net.co

Recibido para revisar Septiembre 1 de 2009, aceptado Abril 30 de 2010, versión final Mayo 30 de 2010

RESUMEN: Entre 1993 y 2005, se han realizado numerosos estudios de suelos en un amplio sector del barrio Laureles (Medellín, Departamento de Antioquia, Colombia), que han tenido como objeto la identificación de la estratigrafía de la zona y la determinación de la capacidad portante del suelo. Los ensayos de campo y laboratorio realizados durante estas exploraciones son resistencia a la penetración estándar (Standard Penetration Test) SPT y ensayos de laboratorio de resistencia a la compresión simple. A estos datos se les realizó un proceso de georeferenciación para profundidades específicas de 2.5, 5.0 y 7.5 metros para el ensayo SPT; y 2.30 y 3.30 metros para los ensayos de compresión simple. Mediante el uso de técnicas geoestadísticas (interpolación espacial), se modelaron superficies para el área en estudio, con el propósito de encontrar información en locaciones en las cuales no se han realizado estudios de suelos.

PALABRAS CLAVE: Geotecnia, SPT, Compresión Simple, Geoestadística.

ABSTRACT: Between 1993 and 2005, there have been numerous studies of soils in a wide sector of the Laureles neighborhood (Medellin, Antioquia, Colombia), which have aimed to identify the stratigraphy of the area and determine the bearing capacity of soil. Field tests and laboratory examinations realized during these explorations are resistance to the standard penetration (Standard Penetration Test) SPT and resistance laboratory tests to simple compression. This data was evaluated by a process of georeferencing for specific depths of 2.5, 5.0 and 7.5 meters for the SPT test and 2.30 and 3.30 meters for simple compression tests. Using geostatistical techniques (spatial interpolation) surfaces were modeled for the study area, in order to find information on locations where there have not been studies of soils

KEYWORDS: Geotechnical, SPT, Simple Compression, Geostatistic.

1. INTRODUCCIÓN

La aplicación de nuevas tecnologías emergentes en el análisis de información es cada día mas palpable y tiene repercusiones que hasta ahora se están explorando en un sin numero de áreas de ingeniería e investigación; es el caso de los sistemas de información geográfica los cuales en las ultimas décadas han abierto una nueva visión y operabilidad práctica para la toma de decisiones especialmente en el campo de la geostatística y las superficies de estimación a partir de datos puntuales.

Es en este campo es donde se aplican técnicas geostatísticas a diferentes datos recolectados de diversos estudios de suelos, con el fin de determinar si existe una correlación espacial en las propiedades geotécnicas.

En este caso se trabajó con parámetros tales como son la resistencia a la penetración estándar (SPT) [1][2] a profundidades de 2.5, 5.0 y 7.50 metros y la resistencia a la compresión simple (Qu) [3][4], a profundidades de 2.3 y 3.3 metros. A partir de estos datos se obtuvieron, las superficies de estimación a partir del modelo de semivariograma que mejor represente el fenómeno en estudio.

2. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Como se aprecia en la figura 1, la zona de interés, para este trabajo se localiza en el sector de Laureles comprendido entre las carreras 65 y 83 y entre las calles 33 y 44 de la ciudad de Medellín, Departamento de Antioquia, República de Colombia, América del Sur y corresponde a las coordenadas Este 830.421 y 833.490, Norte 1.181.613 y 1.183.304, de acuerdo al sistema de proyección Transverse Mercator con origen coordinado Observatorio de Bogota - Colombia. Este sector es uno de los principales sitios de desarrollo urbanístico en la ciudad debido principalmente a su entorno comercial y su topografía suave. Los suelos del sector se componen principalmente de limos y arcillas asociados a suelos transportados parcialmente meteorizados y en proceso de cementación y meteorización, el material

parental que ha dado origen a estos geomateriales corresponde a las rocas ígneas denominadas Dioritas que conforman el denominado Stock de Altavista, cuerpo ígneo que aflora en el sector Occidental de la ciudad de Medellín [5].

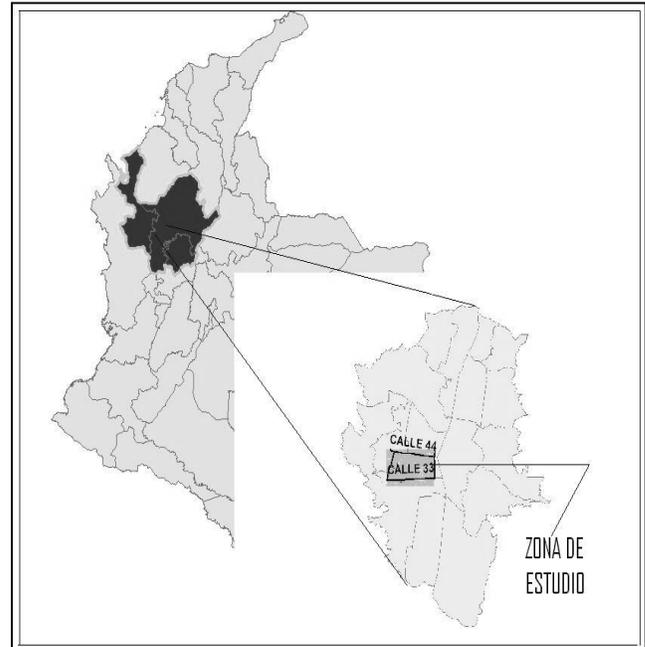


Figura 1. Ubicación de la zona en estudio

Figure 1. Location of study area

3. METODOLOGÍA

Los datos iniciales corresponden a perforaciones que fueron realizadas como parte de estudios de suelos efectuados para diferentes edificaciones entre los años 1993 y 2005, en el área de interés. En cada uno de los lotes donde se ubican las estructuras, fueron realizadas entre 2 y 4 perforaciones en promedio. En cada una de ellas se realizó el ensayo de penetración estándar (SPT) (golpes por pie), el cual permitió la obtención de muestras alteradas e inalteradas del subsuelo, a estas últimas se les realizó entre otros el ensayo de compresión simple, obteniéndose el valor de Qu (Kg/cm²).

Los datos fueron georeferenciados con base en el sistema Colombia – Bogota y ubicados sobre una plancha cartográfica del Sistema de Información

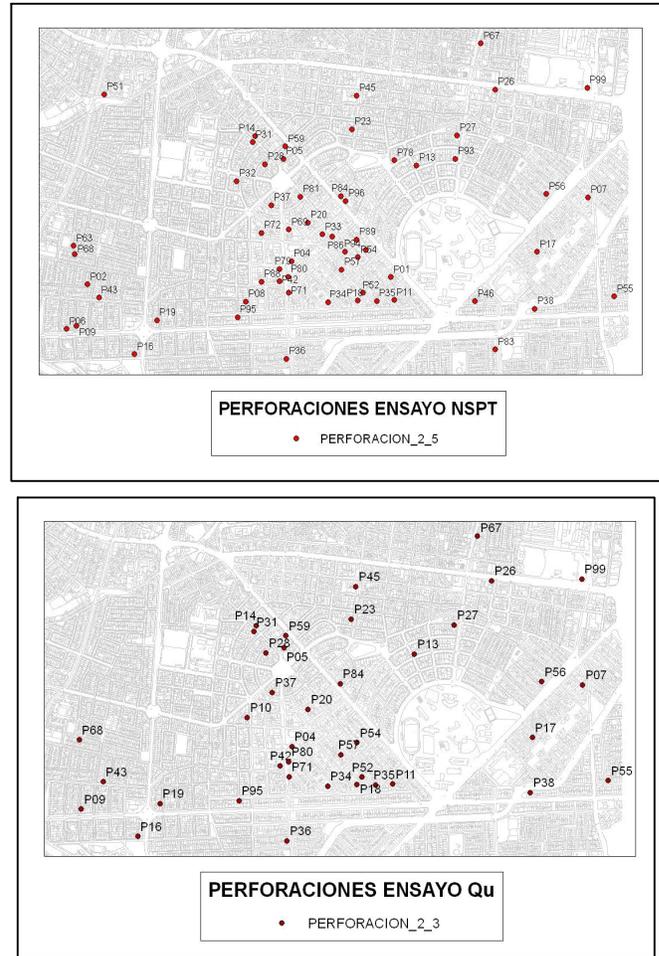
Geográfico para Medellín - SIGAME, con la cual se ubican vías y edificaciones.

Con el fin de conocer para la zona analizada la variabilidad espacial del parámetro SPT del suelo en dos dimensiones, se tomaron los datos para profundidades de 2.5, 5.0, y 7.5 metros, ya que tras un análisis de los datos iniciales esas profundidades garantizaban el mayor número de datos para el posterior análisis.

Las profundidades alcanzadas por las perforaciones difieren en toda la zona, lo que determina que a mayor profundidad se tenga un menor número de datos. Para el caso del ensayo SPT, a 2.50 metros se tiene un total de 67 datos, a 5.0 metros se tienen 61 datos y a 7.50 metros se cuenta con 49 datos.

Por su parte, para la estimación del comportamiento del parámetro de resistencia a la compresión simple, se utilizó el resultado aportado en los ensayos de laboratorio realizados a las muestras inalteradas obtenidas en las diferentes perforaciones realizadas en la zona. Para este caso, se tiene que los ensayos de laboratorio fueron realizados a profundidades de 2.3 y 3.3 metros dentro de las perforaciones analizadas. Así mismo, se tiene que este tipo de ensayo no fue realizado en todos los sitios donde se realizaron sondeos, por lo que se tienen diferencias entre el número de perforaciones que aportan datos del ensayo SPT y el de perforaciones que aportan datos de la resistencia a la compresión simple. Para el ensayo de compresión simple a 2.3 metros se tienen 39 datos y para el ensayo de compresión simple a 3.3 metros se tienen 44 datos.

En las figuras 2 y 3, se observa la ubicación de las perforaciones para los ensayos SPT a 2.5 metros y Compresión Simple a 3.3 metros.



Figuras 2 y 3. Ubicación de perforaciones para el ensayo SPT a 2.5 metros y Qu a 2.3 metros
Figures 2 and 3. Location of test drilling for the SPT to 2.5 meters and Qu to 2.3 meters

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis geostatístico usando geostatistical analyst®

Un principio fundamental para realizar un estudio geostatístico es que el fenómeno sea estacionario, lo que significa que la variable de estudio debe ser constante en todos los puntos de la región [6], para garantizar el principio de estacionariedad se realizar las graficas de dispersión (variable medida vs. coordenadas geográficas), con el fin de identificar posibles tendencias en el valor promedio de la variable, en el caso de que se presenten alguna tendencia

en los datos iniciales no se estaría cumpliendo con el principio de estacionariedad.

Para las variables de estudio (NSPT y Qu), con datos a diferentes profundidades se calcularon las graficas de dispersión y en ninguno de los casos se observaron tendencias, con lo que se pudo determinar el cumplimiento del principio de estacionariedad, permitiendo la utilización de técnicas Geoestadísticas en este caso.

En la figura 4, se muestra el grafico de dispersión para la variable NSPT a 5.0 metros, en el cual es clara la ausencia de tendencias.

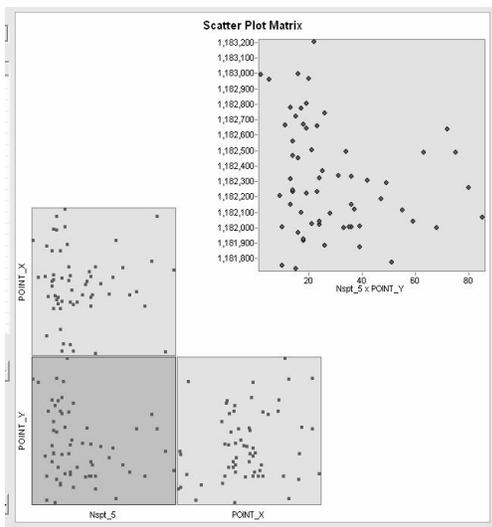


Figura 4. Grafica de tendencias variable NSPT a 5.0 metros

Figure 4. Graph of variable trends NSPT to 5.0 meters

4.1.1 Análisis Exploratorio de los datos

El análisis exploratorio pretende verificar el nivel de normalidad (distribución de Probabilidad Normal) de los datos, verificar la incidencia de los valores extremos sobre las estadísticas de los datos, verificar la presencia de tendencias polinómicas en el conjunto de los datos[7]. En este caso se construyó el histograma de datos para los casos del ensayo de Penetración Estándar SPT a profundidades de 2.5, 5.0 y 7.5 metros y del ensayo de Compresión Simple Qu, y se hicieron los siguientes cálculos:

- μ media
- Me Mediana
- Mo Moda
- CC Coeficiente de Curtosis
- CS Coeficiente de Sesgo
- Γ Desviación estándar
- CV Coeficiente de Variación
- Γ^2 Varianza

En la tabla 1, se muestra el resumen del análisis exploratorio para el ensayo SPT a 2.5 metros. Dado que los datos originales presentaban algunos valores extremos, se procedió a eliminarlos para obtener la población 1 y a partir de ella se hicieron los análisis posteriores.

Tabla 1. Resumen del análisis Exploratorio para los datos de SPT a 2.50 metros

Table 1. Summary of data for exploratory analysis of SPT to 2.50 meters

ENSAYO SPT 2.50 m de profundidad							
1. Datos originales							
μ	Me	Mo	CC	CS	Γ	CV	Γ^2
13	11	5.850	13.20	3.32	12.76	92.53	163.04
2. Datos corregidos							
μ	Me	Mo	CC	CS	Γ	CV	Γ^2
2.397	2.35	2.54	0.73	0.032	0.723	30.17	0.52
ENSAYO SPT POBLACIÓN 1							
1. Datos originales							
μ	Me	Mo	CC	CS	Γ	CV	Γ^2
11	10	3.50	3.43	0.870	6.81	57.47	46.37

En la tabla 2, se muestra el resultado de las estadísticas preliminares para el ensayo SPT a 5.0 metros de profundidad

Tabla 2. Resumen del análisis Exploratorio para los datos del ensayo SPT a 5.00 metros

Table 2. Summary Exploratory analysis of trial data for SPT to 5.00 meters

ENSAYO SPT a 5.0 m de profundidad							
1. Datos originales							
μ	Me	Mo	CC	CS	Γ	CV	Γ^2
29	23	14	0.830	1.24	19.37	66.64	375.54
2. Datos corregidos							
μ	Me	Mo	CC	CS	Γ	CV	Γ^2
3.15	3.135	2.77	1.51	-0.54	0.68	21.71	0.47

Para el caso del ensayo SPT (golpes por pie) a 7.5 metros de profundidad, las estadísticas preliminares se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Resumen del análisis Exploratorio para los datos del ensayo SPT a 7.5 metros

Table 3. Summary Exploratory analysis of trial data for SPT to 7.5 meters

ENSAYO SPT 7.50 m de profundidad							
1. Datos originales							
μ	Me	Mo	CC	CS	Γ	CV	Γ^2
36	30	23.00	2.83	0.84	20.95	56.99	438.90

En la tabla 4 se presentan los resultados del análisis exploratorio para los datos del ensayo de compresión simple a 2.30 metros.

Tabla 4. Resumen del análisis Exploratorio para los datos de Compresión Simple a 2.30 metros

Table 4. Summary of the exploratory analysis for data compression Simple to 2.30 meters

ENSAYO Qu 2.30 m de profundidad							
1. Datos originales							
μ	Me	Mo	CC	CS	Γ	CV	Γ^2
3.17	1.345	0.16	11.87	3.26	5.20	164.09	27.13
2. Datos corregidos							
μ	Me	Mo	CC	CS	Γ	CV	Γ^2
0.44	0.29	7.250	0.133	0.82	1.086	243.24	1.18

En la Tabla 5, se presenta el resumen del análisis Exploratorio para los datos de Compresión Simple a 2.30 metros de profundidad para la población 1, después de eliminar los valores extremos.

Tabla 5. Resumen del análisis Exploratorio para los datos de Compresión Simple a 2.30 metros, para la población 1

Table 5. Summary of the exploratory analysis for data compression simple to 2.3 meters, population 1

ENSAYO Qu 2.30 m POBLACIÓN 1							
1. Datos originales							
μ	Me	Mo	CC	CS	Γ	CV	Γ^2
1.77	1.16	0.63	3.96	2,15	1.83	103.57	3.37
Datos corregidos							
μ	Me	Mo	CC	CS	Γ	CV	Γ^2
0.21	0.14	-0.21	-0.90	0.48	0.82	390.95	0.67

Para el caso de los datos de Qu o compresión simple a 3.30 metros los resultados se presentan en la tabla 6. A pesar de que se mejora la normalidad en el conjunto de datos luego de su transformación, se acentúa valores extremos.

Tabla 6. Resumen del análisis Exploratorio para los datos de Compresión Simple a 3.30 metros

Table 6. Summary of the exploratory analysis for data compression Simple to 3.30 meters

ENSAYO Qu 3.30 m							
Datos originales							
μ	Me	Mo	CC	CS	Γ	CV	Γ^2
2.63	1.80	0.08	5.67	1.78	2.53	96.27	6.41

Se construyeron los gráficos intercuartiles (QQ Plot) y de su análisis e interpretación del histograma acumulado, se detectaron problemas con valores extremos para el caso del ensayo Qu a 2.30 metros. Para el resto de los datos no se observaron problemas con valores extremos en presencia de más de una población.

Adicionalmente, del análisis exploratorio se pudo determinar que la transformación a aplicar al conjunto de los datos iniciales era la transformación del tipo Logaritmo [8].

4.1.2 Análisis estructural de los datos (variografía).

Normalmente, el Semivariograma es una función monótona creciente, que alcanza un valor límite denominado meseta (sill), a cierta distancia h llamada rango o alcance, la cual determina la zona de influencia en torno a un punto, más allá del cual la autocorrelación espacial es nula [7].

En teoría el Semivariograma en el origen es cero [7]; pero con frecuencia muestra una discontinuidad en el origen, dando lugar al denominado efecto pepita (*nugget*). Éste se debe a la variabilidad de la propiedad a valores de distancia mucho menores que el mínimo considerado.

Para los datos en estudio se utilizó el aplicativo Arc Map® de la tecnología Arc- Gis® y la herramienta geoestadística Geostatistical Analysis®, utilizando el comando *Geostatistical*

Wizard®, dado que la media del conjunto de datos se conoce y se puede suponer constante en toda el área de estudio se usó el método del Kriging Simple. En la tabla 7, se muestran los resultados obtenidos en cuanto al modelo de interpolación, concluyendo que el modelo de semivariograma teórico que mejor representa el fenómeno estudiado es el J-Bessel, para la mayoría de los casos y Hole Effect, solo para los datos del ensayo SPT a 5.0 metros.

Tabla 7. Resultados del método de interpolación para el fenómeno estudiado

Table 7. Results of the interpolation method for studying the phenomenon

Propiedad y Profundidad	Modelo de semivariogram a teórico	Ecuación del Modelo	Error máximo %
SPT2.5 m	J-BESSEL	10.168*J-Bessel(611.31,360.49,89.1,0.01)+40.217*Nugget	7.08
SPT 5.0 m	HOLE EFECT	0.13575*Hole Effect(407.54,244.47,56.4)+0.2197*Nugget	28.28
SPT 7.5 m	IDW		2.71
Qu 2.30 m	J-BESSEL	1.4728*J-Bessel(138.22,64.157,5.1,0.01)+0*Nugget	5.71
Qu 3.30 m	J-BESSEL	0.38437*J-Bessel(571.54,178.5,9.8,0.01)+0.35363*Nugget	11.27

A continuación se presentan cada una de las ecuaciones de los semivariogramas teóricos obtenidos para el caso del semivariograma J Bessel [9].

$$\gamma = 10168 \left[1 - \frac{2^{0.01} \Gamma(1.01)}{(\Omega_{0.01} \|h\| / 611.31)^{0.01}} J_{0.01}(\Omega_{0.01} \|h\| / 611.31) \right]$$

$$\gamma = 1.472 \left[1 - \frac{2^{0.01} \Gamma(1.01)}{(\Omega_{0.01} \|h\| / 138.22)^{0.01}} J_{0.01}(\Omega_{0.01} \|h\| / 138.22) \right]$$

$$\gamma = 0.383 \left[1 - \frac{2^{0.01} \Gamma(1.01)}{(\Omega_{0.01} \|h\| / 571.54)^{0.01}} J_{0.01}(\Omega_{0.01} \|h\| / 571.54) \right]$$

En donde Ω_{0d} es un valor numérico encontrado mediante la expresión $0.95 * \theta_d$ con θ_d parámetro igual a 0.01. $\Gamma(\theta_d + 1)$ es la función gama y J_{0d} es

la función J-Bessel. Para el semivariograma Hole Effect [9]:

$$\gamma = 0.1357 \left[\frac{1 - \sin(2\pi \|h\| / 407.54)}{\sin(2\pi \|h\| / 407.54)} \right]$$

Para la selección del mejor modelo de semivariograma se usaron los siguientes criterios[7]:

- El valor de la meseta del modelo (partial Sill) este próximo a la varianza de los datos.
- El valor de la raíz cuadrada del error medio cuadrático, Root Mean Square (RMS), sea más pequeño.
- EL valor del error estándar promedio, Average Standard Error (ASE) sea más pequeño.
- El valor de la raíz cuadrada del error medio cuadrático estándar, Root Mean Square Standardized (RMSS), sea el más cercano a uno.

Para el caso del ensayo de penetración SPT a 2.50 metros, el mapa de estimación resultante se muestra en la figura 5, donde en tonos oscuros aparecen los valores bajos y en tonos claros los valores altos en el ensayo SPT, estas convenciones se mantienen para el resto de los mapas de estimación. El rango de valores está entre 2 y 32 golpes por pie.

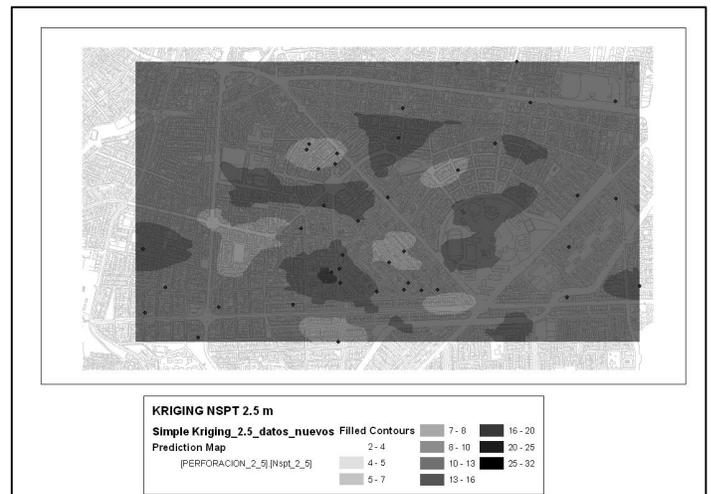


Figura 5. Mapa de estimación para el ensayo SPT a 2.50 metros
Figure 5. Map of estimate for SPT test to 2.50 meters

En el mapa anterior se evidencia la alta concentración de zonas de valores medios de la resistencia (valores entre 16 y 20 golpes por pie) e igualmente zonas con valores bajos (entre 5 y 6 golpes por pie), sin embargo, la ubicación es aleatoria dentro de la zona. Por su parte, el mapa porcentual de error de estimación muestra como los valores más bajos de error se encuentran en la zona donde se tiene una mayor concentración de datos. (ver figura 6), en este caso los tonos oscuros muestran los menores errores y los tonos claros para la zona de mayor error, esta convención se mantiene para todos los demás mapas de error. El rango de valores está entre 6.69% y 7.08%.

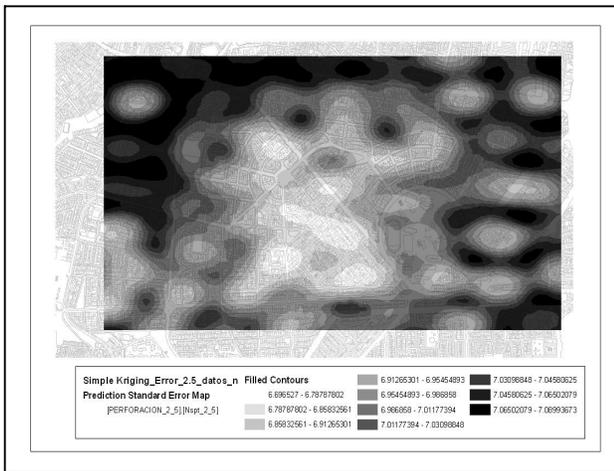


Figura 6. Mapa porcentual de error de estimación para el ensayo SPT a 2.50 metros
Figure 6. Map of percentage of error estimate SPT test to 2.50 meters

Para el ensayo de penetración SPT a 5.00 metros, se establece que este es uno de los casos de mayor particularidad, ya que el modelo de semivariograma que mejor modela el fenómeno estudiado, en este caso, es el Hole Effect, el cual se caracteriza por presentar puntos de valores bajos o altos con una cierta periodicidad, simulando cúpulas y depresiones dentro del modelo del fenómeno subyacente ver figura 7. El rango de valores está entre 2 y 85 golpes por pie.

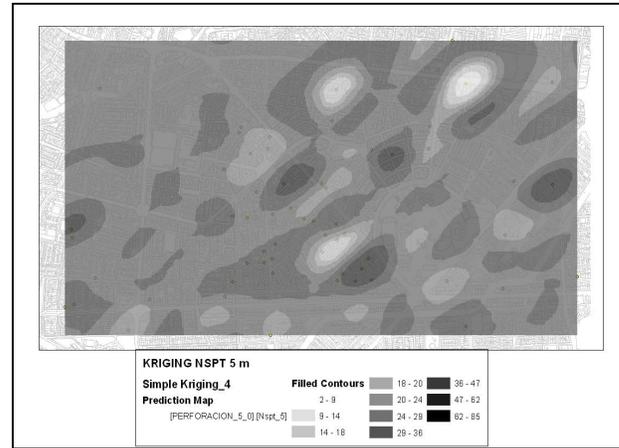


Figura 7. Mapa de estimación para el ensayo SPT a 5.0 metros
Figure 7. Map of estimate for SPT test to 5.0 meters

En la figura 8, se muestra el mapa porcentual de error para el ensayo SPT a 5.0 metros. El rango de valores está entre 6.98% y 28.28%.

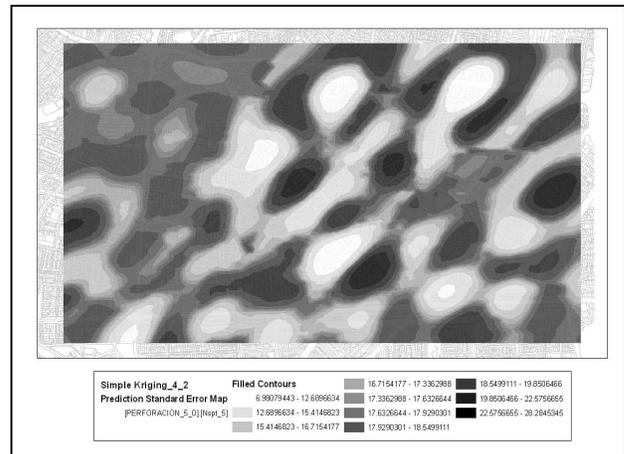


Figura 8. Mapa porcentual de error de estimación para el ensayo SPT a 5.00 metros
Figure 8. Map percentage error estimate for SPT test to 5.00 meters

Para el caso de los datos del ensayo de penetración estándar SPT a 7.50 metros, se observó que al realizar la transformación sugerida de acuerdo al Coeficiente de Sesgo de $0.5 < |CS| \leq 1.0$, (raíz cuadrada de los datos) [8]; se observó que los mapas obtenidos presentaban inconsistencia en los valores estimados, ya que se generaba un mapa donde se tenía el predominio de un solo rango de datos, tal como se observa en la figura 9.

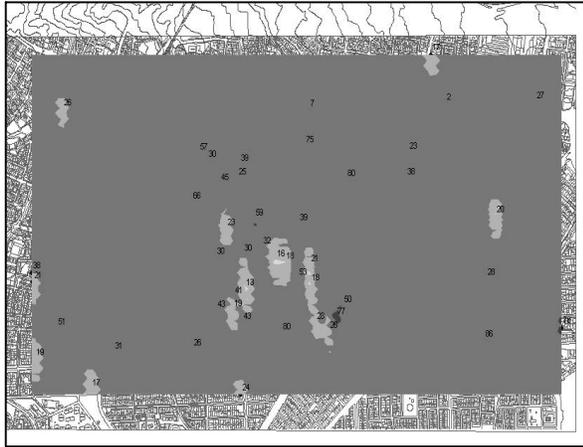


Figura 9. Mapa de estimación mediante un moldeo de interpolación de Kriging para datos transformados
Figure 9. Map estimation via a molding Kriging interpolation of data processed

Por esta razón, se consideró analizar el comportamiento de la propiedad bajo estudio, mediante otro método de interpolación espacial denominado Inverso de la Distancia (IDW – Inverse Distance Weight). El Mapa obtenido se presenta en la figura 10. El rango de valores está entre 2 y 88 golpes por pie.

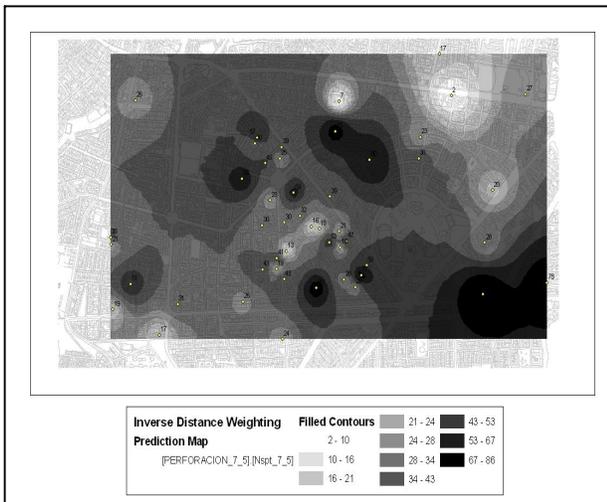


Figura 10. Mapa de estimación para el ensayo de penetración estándar SPT a 7.50 metros
Figure10. Map of estimate for the SPT standard penetration test to 7.50 meters

En este caso el error (E) se calculó manualmente mediante la siguiente expresión:

$$E = \frac{|VR - VE|}{VR}$$

En donde VR es el valor real de la prueba y VE el valor estimado.

En este caso el error total es de 8.47 % y el error máximo es de 2.7142857% obteniendo una confiabilidad del 97.2857%, el cual es un buen valor para este criterio.

Para el ensayo de Compresión Simple Qu a 2.3 metros, el modelo de semivariograma que mejor modela el fenómeno en el área en estudio es el J Bessel, en la figura 11, se observa el mapa de estimación cuyo rango de valores está entre 0.23 y 8.25 Kg/cm².

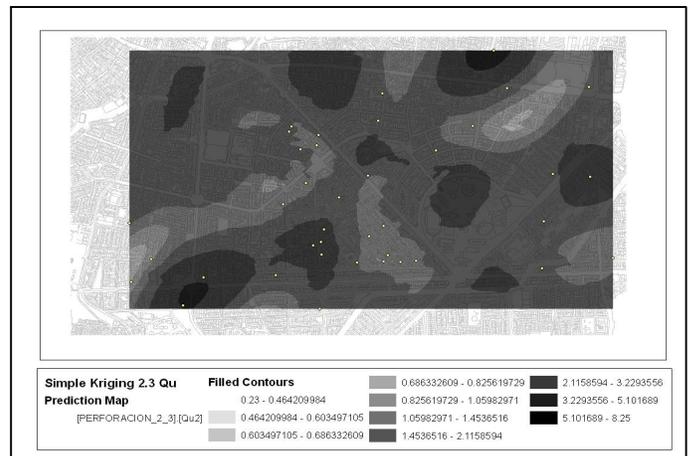


Figura 11. Mapa de estimación para el ensayo de compresión simple Qu a 2.30 metros.
Figure 11. Map of estimate for the simple compression test Qu 2.30 meters

En el mapa porcentual de error de estimación se muestra la concentración de una zona baja en error en la parte media, donde se observa la mayor concentración de datos, tal como se observa en la figura 12. El rango de valores está entre 6.69% y 7.08%.

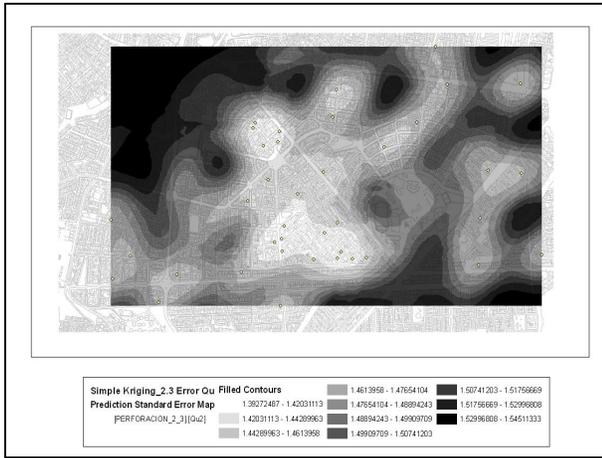


Figura 12. Mapa porcentual de error de estimación para el ensayo de compresión simple Qu a 2.30 metros

Figure 12. Map of percentage error of estimation for the simple compression test Qu 2.30 meters

Para el caso del parámetro Qu a 3.30 metros, se presenta el mapa de estimación en la figura 13. El rango de valores está entre 0.67 y 5.71 Kg/cm².

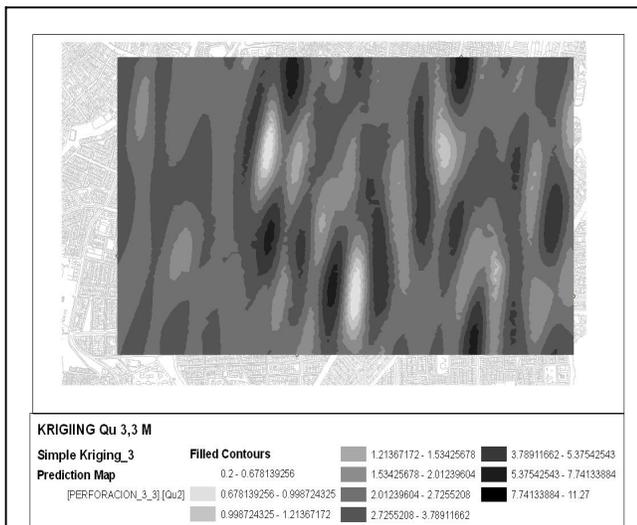


Figura 13. Mapa de estimación para el ensayo de compresión simple Qu a 3.30 metros

Figure 13. Map of estimate for the simple compression test Qu to 3.30 meters

Respecto al error se observa que tiene el predominio de valores medios y altos del error, tal como se observa en la figura 14. El rango de valores está entre 0.2% y 11.27%.

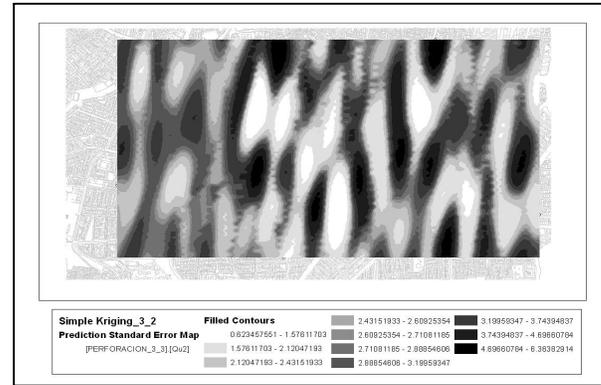


Figura 14. Mapa porcentual de error de estimación para el ensayo de compresión simple Qu a 3.30 metros

Figure 14. Map of percentage error of estimation for the simple compression test Qu a 3.30 meters

5. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se puede concluir:

Del análisis de las graficas intercuartiles QQplot, se establece como los datos del ensayo de penetración estándar SPT intermedios para la profundidad de 5.0 metros y de compresión simple Qu a profundidades de 2.30 y 3.30 metros, se tiene una función de distribución similar a una normal, siendo este último el que más se aproxima. Los datos de SPT a 7.5 metros se alejan más de un comportamiento normal.

Respecto al análisis variográfico se observa que para los datos del ensayo SPT los semivariogramas que más se acercan a modelar el fenómeno subyacente en la zona en estudio son el J-Besell y Hole effect. siendo el Hole Effect el que mejor modelo los datos de SPT a 5.0 metros, en este caso se puede establecer que el fenómeno presente en la zona posee una componente periódica o cuasi periódica.

Los modelos teóricos usados J-Besell y Hole effect, son nuevos para estudiar este tipo de fenómenos, ya que la literatura reporta como modelo usado para estos estudio el modelo esférico. Este es un aporte de este trabajo al entendimiento de este tipo de fenómenos. En relación a los datos se observa en particular como para el caso del ensayo de penetración estándar SPT a una profundidad de 7.50 metros,

no fue posible realizar la modelación mediante un modelo de interpolación del tipo Kriging.

El error promedio obtenido en el método de interpolación IDW permite concluir que los valores estimados son bastante buenos para los datos de SPT a 7.5 metros.

Debido a la gran heterogeneidad espacial de los suelos de la ciudad y en especial en este sitio, debido al origen de los mismos, además de los procesos de meteorización tropical que han actuado sobre ellos, se recomienda realizar en el futuro, mapas de suelos en áreas de menor tamaño a la evaluada o contar con un mayor número de datos.

Los resultados obtenidos con el ensayo de compresión simple, deben ser mirados con cautela debido a que el resultado del ensayo puede variar en el tiempo, especialmente si se tienen suelos saturados o parcialmente saturados.

Al analizar los resultados obtenidos se observa como en variograma que mejor representa el fenómeno en los diferentes casos del ensayo de penetración NSPT y resistencia a la compresión simple corresponden a variogramas que evidencian cierta periodicidad del fenómeno (ciclicidad), lo cual puede ser analizado desde el punto de vista de una alternancia en la información encontrada en las perforaciones analizadas por otro lado, esta condición evidencian la incidencia de un factor que no fue tenido en cuenta como lo es las diferentes épocas y años en los que fue obtenida la información, por lo que la periodicidad que se muestra puede estar asociada a una periodicidad temporal. En este caso se tiene para las variables analizadas tanto una variabilidad espacial y la variabilidad temporal. En este aspecto la variabilidad del suelo puede ser considerado como el producto de los procesos formadores de mismo que operan e interactúan en un continuo a escalas espaciales y temporales.

Por otro lado, dado el origen de los suelos que conforman la zona pensar solo en una periodicidad litológica puede llevar a un error, ya que por su origen puede ser considerados suelos muy homogéneos.

REFERENCIAS

- [1] GONZÁLEZ, ÁLVARO. Estimativos de Parámetros efectivos de resistencia con el SPT en X Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana - SCI-SCG, 1999.
- [2] J. VARELA E. Y I. HERRERO. Exploración del Subsuelo Mediante Penetrómetro, ingeniería técnica de minas, especialidad en explotación de minas, (2001/2002). *Disponible en Web:* [http://www.ingenieriageologica.iespana.es/biblioteca/penetrometros/reconocimiento_in_situ\(spt,cpt,dinamico\).pdf](http://www.ingenieriageologica.iespana.es/biblioteca/penetrometros/reconocimiento_in_situ(spt,cpt,dinamico).pdf). Consultado el 19 junio del 2008.
- [3] ENSAYOS GEOTÉCNICOS IN SITU, Igeotest, 1995. Disponible en Web: www.igeotest.com/spanish/geotecnia_terrestre/ensayos.asp. Consultado el 6 julio del 2008.
- [4] NORMA ASTM D2850. Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils.
- [5] MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE MEDELLÍN. Departamento Administrativo de Planeación, Alcaldía de Medellín, 1995.
- [6] GIRALDO HENAO R, Introducción a la Geoestadística teórica y aplicada, Departamento Estadística Universidad Nacional de Colombia, (2002).
- [7] MEJÍA RIVERA, O., BETANCUR VARGAS, T., LONDOÑO CIRO, L. A. Aplicación de Técnicas Geoestadísticas en la Hidrogeología del Bajo Cauca Antioqueño, Revista DYNA, Vol. 74, 2007, pag 142.
- [8]. WEBSTER, RICHARD. OLIVER MARGARET. 2001. Geostatistics for environmental scientists. Great Britain. John Wiley & Sons Inc, pág. 19 – 20.
- [9]. KEVIN JOHNSTON, JAY M. VER HOEF, KONSTANTIN KRIVORUCHKO, and Neil Lucas. ArcGIS Geostatistical Analyst Tutorial. ESRI. 2003, pág 256-258.