

Sistemas de Información Geográfica en el Desarrollo de Mapas para ayudar en la Exploración de Suelos en la ciudad de Guayaquil, Ecuador

David E. Matamoras C. ^(a) y Esthela Criollo ^(b)

^(a)Instituto de Ciencias Químicas y Ambientales, ^(b)Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
Escuela Superior Politécnica del Litoral
Km 30.5 vía Perimetral, Código Postal, Guayaquil, Ecuador
dmata@espol.edu.ec, esthelita7@yahoo.com

Resumen

Desde un punto de vista geotécnico, un mapa de suelo es un elemento clave en diversos aspectos que un ingeniero civil debe enfrentar. Cuando no se dispone de dicha herramienta, la exploración es crítica frente a la falta de información. Sin embargo, la exploración de suelos representa costos que algunas veces los países en vías de desarrollo, tales como el Ecuador, no pueden costear. El GIS puede ayudar en optimizar este aspecto usando mapas subsuperficiales generados a partir de datos existentes. El presente artículo muestra una investigación piloto para generar un juego de mapas basados en datos disponibles que pudieran ayudar a las compañías de exploración de suelos para optimizar la ubicación, el número y la profundidad de las perforaciones de suelo en proyectos específicos.

Palabras Claves: Mapas de suelo, exploración de suelos, interpolación, permisos municipales.

Abstract

From geotechnical point of view, a soil map is a key element in several issues that a civil engineer should face. When it is not available, exploration is critical to overcome the lack of information. However, soil survey represents costs that sometimes poor-developing countries, such as Ecuador, can not afford. GIS can help in optimising this issue by using generated subsurface maps from existing data. The present article presents a pilot research to generate a map set based on available data that could help soil surveyors to optimise location, number and depth of soil boreholes for specific projects.

1. Introducción

La ciudad de Guayaquil está ubicada a 2.18° S y 79.92° W en la desembocadura del Golfo de Guayaquil, Ecuador, América del Sur (Figure 1). Es el principal puerto del país, y el último asentamiento humano importante en las márgenes del río Guayas antes de descargar en el Golfo de Guayaquil. Debido a su ubicación, los estratos de suelo se componen principalmente de suelos limosos y arcillosos de característica aluvial. Sin embargo, también se encuentran lentes arenosos a diversas profundidades. La capa de lecho rocoso se encuentra más profunda que la información usada en esta investigación, y el área de estudio no muestra un sistema de fallamiento geológico significativo.

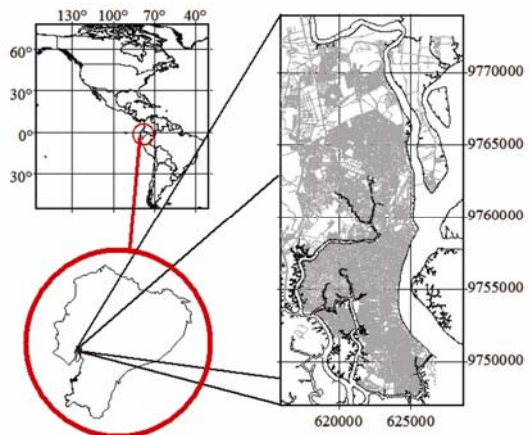


Figura 1. Mapa de ubicación de la ciudad de Guayaquil.

Existen diversas compañías de exploración de suelos en la ciudad que han estado generando información por más de 30 años. Sin embargo, no se ha podido tener éxito en producir mapas geotécnicos que puedan ser usados en el proceso de optimización

de futuras exploraciones de suelos. Por otro lado, los costos de exploración son muy altos para realizar un número adecuado de perforaciones en proyectos de diseño geotécnico. Por lo tanto, los ingenieros diseñadores locales normalmente mantienen el número de perforaciones al mínimo lo que no necesariamente significa una mejor comprensión de la litología del sitio explorado.

El uso de mapas geotécnicos puede ayudar a optimizar cualquier planificación de exploración de suelos al indicar que clase de suelo se espera encontrar. Por lo tanto, toda la planificación se puede ajustar por medio de características fijas tales como la profundidad de muestreo, el número de puntos de muestreo por perforación, el número de perforaciones, entre otros.

El propósito de la presente investigación es desarrollar mapas geotécnicos que puedan servir como referencia en un proceso de toma de decisiones para la planificación de exploración de suelos en la ciudad de Guayaquil. Todos los mapas fueron construidos basándose en información existente disponible colectada de compañías de exploración de suelos en la ciudad.

En el futuro cercano, estos mapas serán presentados a las autoridades municipales de Guayaquil, ingenieros consultores y ciudadanía en general. Como una manera de involucrar a los actores, el siguiente paso en la investigación será desarrollar una página web para presentar los mapas a través de internet. La idea es que los involucrados puedan interactuar con los mapas al recuperar información de las celdas raster de cada mapa y además puedan ingresar información que después de ser filtrada, sea usada para actualizar los mapas. Otro aspecto es la actualización de las ordenanzas municipales respectivas considerando los mapas geotécnicos en el proceso.

En términos de resultados de la investigación, el sistema de mapeo geotécnico indudablemente ofrece una opción económicamente eficiente para ayudar a las autoridades a evitar el caos en sitios de construcción (i.e. estructuras localizadas en suelos no apropiados). Adicionalmente, los mapas podrían ayudar a los contratistas a “predecir” problemas potenciales en sus respectivos sitios de construcción. Los mapas también pueden ayudar a optimizar la exploración de suelos sin incrementar los costos relacionados.

2. Metodología

La presente investigación colectó datos provenientes de tres compañías [1, 2, 3] en un total de 586 perforaciones, tal como se muestra en la Figura 3. Aún cuando los pozos de exploración fueron

realizados en diversas épocas, se asume que la litología del suelo no cambia entre períodos de perforación.

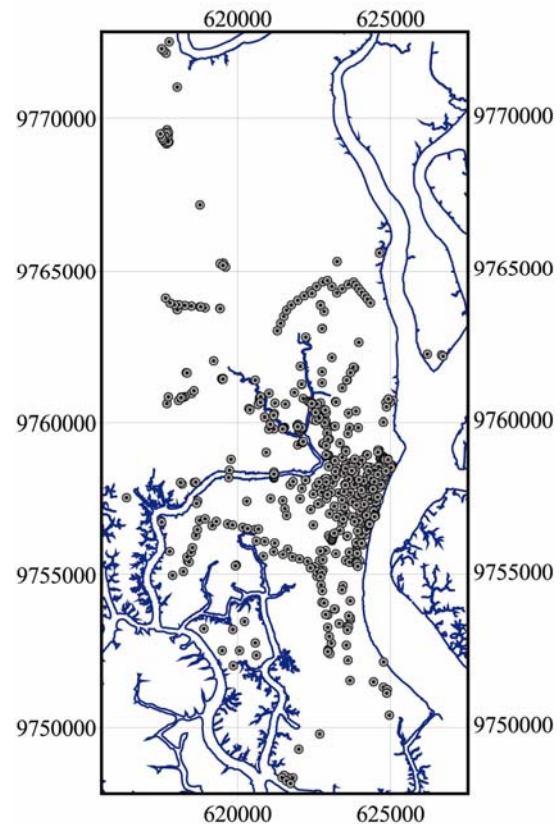


Figura 2. Mapa de ubicación de las perforaciones consideradas en la investigación.

La información de los registros de perforación varía con la profundidad dependiendo del objetivo de cada exploración. Debido a eso, todos los datos se agruparon en rangos de profundidad para estandarizar el resultado final, tal como se muestra en la Tabla 1 y la Figura 3.

Tabla 1. Distribución de perforaciones basada en rangos de profundidad

Rango de Profundidad (m)	Profundidad promedio (m)	Distribución parcial de las perforaciones (%)	Perforaciones con una profundidad mayor o igual a (%)
0-2	1.0	11.09	100.00
2-4	3.0	2.90	88.91
4-6	5.0	12.63	86.01
6-8	7.0	9.56	73.38
8-10	9.0	10.24	63.82
10-15	12.5	14.51	53.58
15-20	17.5	12.46	39.08
20-25	22.5	8.70	26.62
25-30	27.5	9.04	17.92
30-50	40.0	8.87	8.87

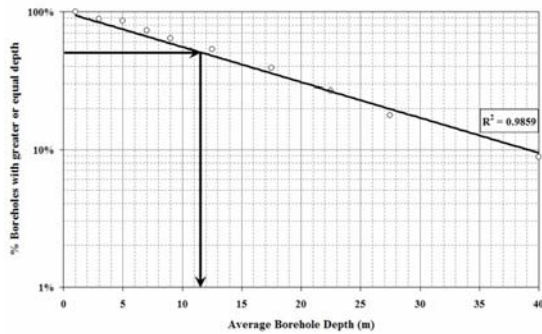


Figura 3. Distribución de perforaciones en función de la profundidad de exploración.

De la figura, se puede estimar una profundidad de perforación crítica que corresponde a 11.5 m (50 por ciento de las perforaciones tienen profundidades mayores o menores que el valor de referencia). Se espera que los datos obtenidos a profundidades menores al valor crítico produzcan mapas más confiables (menor error en el procedimiento de interpolación) debido a que una mayor cantidad de datos son considerados a dichas profundidades. Sin embargo, los mapas generados para estratos más profundos todavía se podrían considerar confiables, tal como se explica en la siguiente sección.

Otro aspecto evaluado en la generación de mapas es la disponibilidad espacial de los datos para realizar el procedimiento de interpolación dentro de un área de referencia adecuada (o ¿cuál es la extensión de la interpolación?). Este problema se resuelve usando el procedimiento de la densidad de los datos (puntos por unidad de superficie). El área de interpolación recomendada deberá ser definida en la zona de más alta densidad de datos. El procedimiento fue implementado considerando todas las perforaciones disponibles en la ciudad de Guayaquil, tal como se muestra en la Figura 4. El valor de densidad calculado, de ahora en adelante denominada densidad global, es afectado por una distancia radial de búsqueda. En la presente investigación, se seleccionó un valor de 4 km. Basándose en la figura, se recomienda que la interpolación sea hecha dentro de un área que cubra las dos zonas más oscuras mostradas en el mapa y definida por las coordenadas UTM (Zona 17 S) N 9761700, E 625500, N 9754600 y E 620000. Esta área representa alrededor de 3900 Ha (11.5% del área urbana al año 2000) y principalmente corresponde al área central de la ciudad.

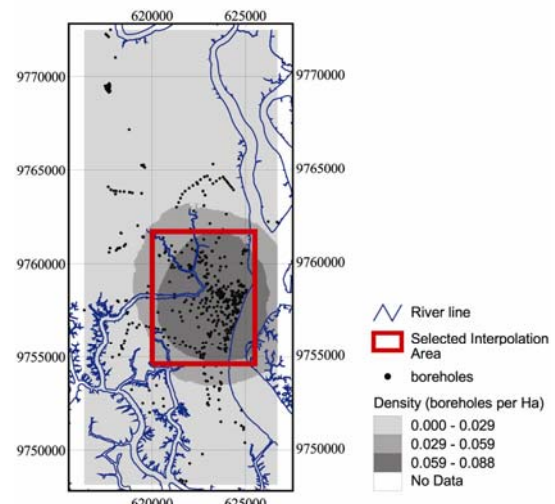


Figura 4. Determinación del área de interpolación basándose en la densidad superficial de la información.

Respecto al tipo de mapa geotécnico, los mapas fueron desarrollados basándose en los parámetros que comúnmente se determinan después de una campaña de muestreo tales como textura (arena y fracción fina), límites de Atterberg, índice de clasificación SUCS, densidad del suelo, contenido de humedad del suelo y resistencia a la compresión no confinada. Existen otros parámetros que son principalmente específicos a cada proyecto y que no fueron considerados en esta investigación debido a los pocos datos disponibles. Todos los mapas fueron hechos para cada rango de profundidad (Tabla 1) usando técnicas de interpolación en el área propuesta.

Los mapas geotécnicos fueron hechos en formato raster dentro de la plataforma ArcView. Ya que los mapas generados serán usados como referencia para optimizar exploraciones geotécnicas futuras, se seleccionó un tamaño de celda raster igual al tamaño típico de un bloque (manzana) de la ciudad. Por lo tanto, el tamaño de celda se fijó en 2500 m² (50 m × 50 m). Si en el futuro hay más datos disponibles, se podrán elaborar mapas más detallados disminuyendo el tamaño de la celda raster seleccionada. Dentro del contexto de la presente investigación, no se ha aplicado la capacidad tridimensional de la herramienta GIS debido a que se requiere una mayor cantidad de datos para generar mapas 3D.

3. Resultados y Discusión

Se probaron diversos procedimientos de interpolación para producir mapas raster con el menor error posible (diferencia entre valores observados y calculados). El coeficiente de eficiencia E[4, 5] y el sesgo promedio (Ecuación 1) fueron usados para probar la bondad de ajuste de la interpolación.

$$Bias_{average} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{Observed_i - Predicted_i}{Observed_i} \right) \quad (Ec. 1)$$

La ecuación previa calcula el sesgo promedio para el juego completo de datos interpolados a un rango específico de profundidad. Un valor negativo en esta ecuación indica que un mapa específico predice valores mayores que el valor real del parámetro mostrado. Un análisis completo de los resultados se expone en una tesis de pregrado [6] elaborada en la Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Entre los parámetros evaluados, el contenido de humedad del suelo normalmente varía con el tiempo. Sin embargo, los datos obtenidos de los registros no mostraron diferencias significantes entre pozos perforados en diferentes períodos de perforación. Por lo tanto, los mapas generados reflejan muy bien el rango de humedad esperado en texturas de suelo específicas.

Existen diversos procedimientos de interpolación para generar mapas a partir de datos puntuales. Sin embargo, los resultados no son los mismos debido a que la aproximación teórica varía de método a método. La selección de un procedimiento adecuado de interpolación dependerá de que tan bien se ajusten los datos observados con las estimaciones. En la investigación actual, la selección se hizo basándose en el diagrama de flujo propuesto en la figura 5.

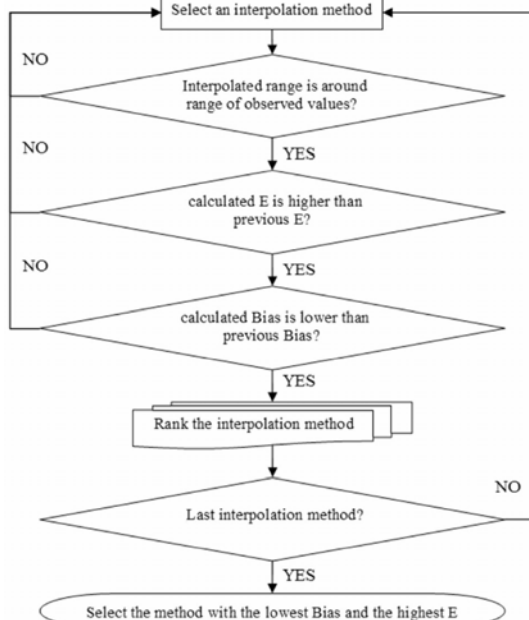


Figura 5. Criterio usado para seleccionar el mejor método de interpolación.

La tabla 2 muestra un resumen de los mejores procedimientos de interpolación para los mapas de humedad obtenidos en todos los rangos de profundidad. Se muestra también la cantidad de datos involucrados en cada rango de profundidad y el inverso de la densidad de datos. Se puede observar que los rangos más profundos tienen menor cantidad de datos para realizar la interpolación. Sin embargo, la precisión de la interpolación todavía es buena ya que la mayoría de los coeficientes de eficiencia (E) son mayores a 0.8. Respecto al sesgo, todos los procedimientos de interpolación seleccionados producen predicciones ligeramente mayores que los valores observados ya que el sesgo es negativo. Esta “sobre predicción” deberá ser tomada en cuenta cuando se use los mapas generados en el campo. Se obtuvieron resultados similares para todos los parámetros evaluados. En la tabla, los primeros cinco rangos de profundidad presentan una distribución de datos muy similares, alrededor de un dato de humedad por cada 11 Ha. Por otro lado, los rangos más profundos muestran un decrecimiento exponencial en la densidad de datos que no afecta la precisión de la interpolación tal como se demostró en los párrafos anteriores.

Tabla 2. Resumen de los procesos de interpolación para el contenido de humedad en el suelo

Rango (m)	Procedimiento de Interpolación	E	Sesgo (%)	Datos de humedad disponibles	Área promedio por dato disponible (Ha)
0-2	Inverse Distance Weight	0.92	1.68	358 (a)	11
2-4	Universal Linear Kriging	0.85	2.21	403	10
4-6	Universal Linear Kriging	0.82	2.91	402	10
6-8	Universal Linear Kriging	0.82	2.60	363	11
8-10	Universal Linear Kriging	0.86	1.41	325	12
10-15	Universal Linear Kriging	0.91	0.99	281	14
15-20	Universal Linear Kriging	0.83	1.48	208	19
20-25	Inverse Distance Weight	0.87	3.91	145	27
25-30	Inverse Distance Weight	0.84	3.79	104	38
30-50	Inverse Distance Weight	0.74	0.74	52	75

(a) El primer rango muestra menos datos que el segundo estrato debido a que los perforadores locales normalmente no toman muestras cuando el primer estrato consiste de material de relleno (gravas con una matriz limo arcillosa)

La figura 6 muestra los mapas de contenido de humedad generados para cada rango de profundidad. Adyacente a cada mapa, se muestra un mapa de densidad de datos que expone donde la información de humedad está más concentrada. El sector de más alta concentración de datos es el mismo para todos los rangos de profundidad tal como se muestra en la figura 6. Sin embargo, la densidad de datos disminuye a medida que la profundidad se incrementa. Esta tendencia fue también observada en la Tabla 2 y discutida anteriormente.

En la figura, la profundidad promedio del cuerpo de agua (río) es menor a 15 metros, y se dibuja en los mapas de estratos más profundos solamente con un propósito referencial. Respecto al contenido de humedad del suelo, se puede observar que el cuerpo hídrico localizado a la izquierda del área interpolada está influyendo el valor de ese parámetro del suelo. Este comportamiento se debe al hecho de que la mayoría la zona afectada fue rellena con material no bien clasificado y no tan compactado por las personas que se asentaron en dicha zona. Algunos ramales del sistema hídrico fueron rellenos o desviados para propósitos habitacionales.

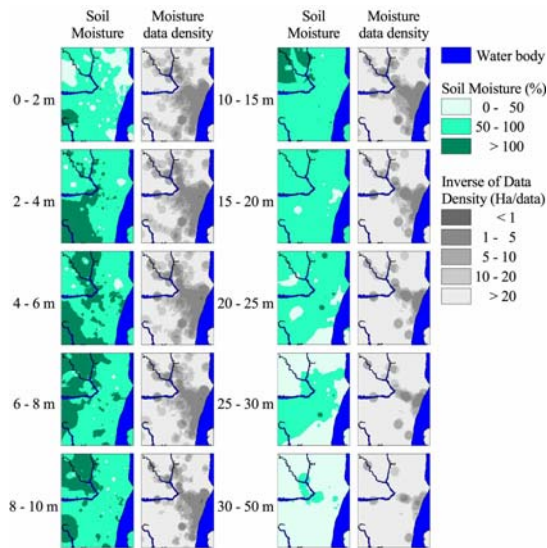


Figura 6. Mapas de contenido de humedad del suelo y su correspondiente densidad de datos.

Las figuras 7, 8, 9 y 10 muestran mapas para la textura de suelos (contenido de arena), límites Atterberg (límite líquido), densidad del suelo y resistencia del suelo a la compresión no confinada. Debido a la restricción de espacio, los mapas para los otros parámetros no son mostrados (grava, fracción fina e índice plástico).

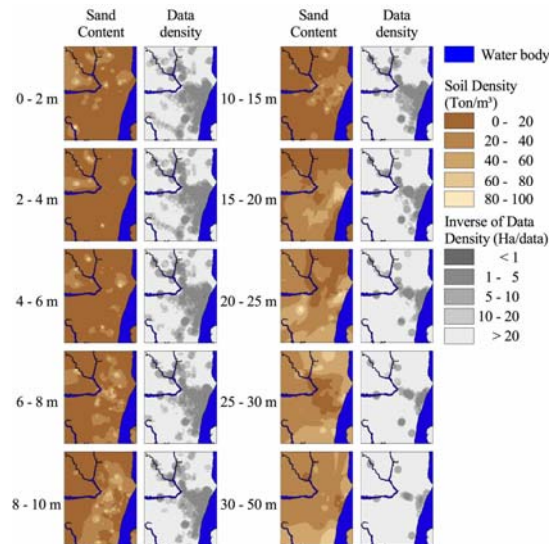


Figura 7. Mapas de contenido de arena y su correspondiente densidad de datos.

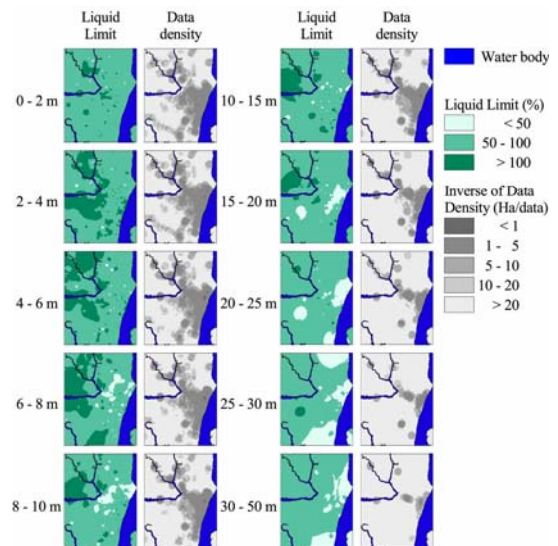


Figura 8. Mapas de límite líquido y su correspondiente densidad de datos.

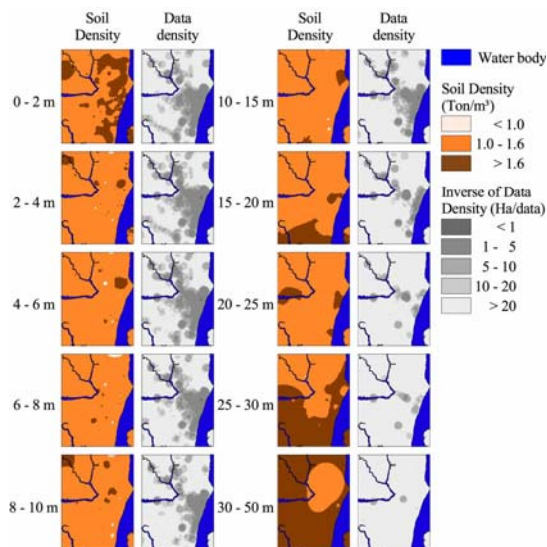


Figura 9. Mapas de densidad del suelo y su correspondiente densidad de datos.

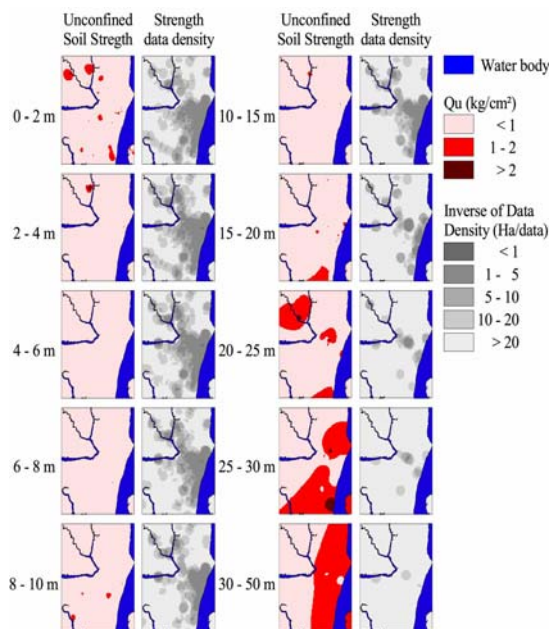


Figura 10. Mapas de resistencia a la compresión no confinada del suelo y su correspondiente densidad de datos.

4. Conclusiones

La presente investigación pudo generar mapas basados en información colectada de laboratorios de mecánica de suelos de la Ciudad de Guayaquil, Ecuador. Este es un esfuerzo para suministrar información de suelo confiable que ayude a la optimización de futuras campañas de monitoreo de suelos en la ciudad. Antes de que existieran las técnicas de GIS, hubo investigaciones aisladas que descubrieron la heterogeneidad y complejidad de los estratos de suelos existentes en Guayaquil como

resultado de condiciones hidrológicas de épocas geológicas pasadas.

En el presente estudio, se utilizó el coeficiente de Eficiencia (E) y el sesgo para determinar la bondad del ajuste de la interpolación. Esta técnica ya ha sido comprobada en la predicción de diversos parámetros en estudios hechos por otros autores en otras partes del mundo. Sin embargo, la poca densidad de datos obtenida en esta investigación disminuye la precisión obtenida en la interpolación.

Debido a la densidad de los datos, solamente fue posible generar mapas en un área que representa el 11 por ciento del total de superficie de la ciudad. Por dicha razón, la presente investigación deberá ser presentada a todos los actores como un estudio piloto así como también a otros laboratorios para poder obtener información adicional y poder actualizar los mapas.

A pesar de la baja densidad de los datos en capas más profundas, se pudieron generar mapas confiables para el área de estudio usando los métodos de interpolación seleccionados. Esto podría no ser verdad para otros conjuntos de datos u otras áreas de interpolación. Por lo tanto, este análisis deberá ser hecho cada vez que un mapa sea generado a través de interpolación.

La generación de mapas geotécnicos puede ser usada en un proceso de optimización de la exploración de suelos, pero también puede ser usada por las autoridades municipales para regular aspectos constructivos en la ciudad. El desarrollo urbano de la ciudad de Guayaquil ganaría bastante introduciendo una instancia reguladora tal como el uso obligatorio de sistemas de mapeo de suelos dentro del esquema institucional.

Debido a la alta heterogeneidad espacial de los suelos en la ciudad de Guayaquil, se recomienda realizar, en el futuro, mapas de suelos en áreas de menor tamaño a la evaluada. Sin embargo, esta decisión deberá ser aplicada siempre y cuando exista más información de pozos de exploración disponible en el área a ser mapeada.

Debido a las restricciones de tamaño y espacio impuestas por esta revista científica, los gráficos han sido reducidos de su tamaño original. Versiones en formatos más grandes se pueden solicitar a la dirección de correo electrónico mostrada al inicio de este artículo.

5. Agradecimiento

Los autores desean agradecer a los gerentes de las tres compañías de perforación de suelos, Raul Maruri (Cimentaciones), Eduardo Pesantez (AET) y Víctor Moreno (Laboratorio Ruffilli) quienes libremente pusieron a disposición de la presente investigación la información respectiva.

6. Referencias

- [1] Laboratorio AET, Registros de perforaciones de suelos en la Ciudad de Guayaquil. Base de datos actualizada, 2004
- [2] Laboratorio CIMENTACIONES, Registros de perforaciones de suelos en la Ciudad de Guayaquil. Base de datos actualizada, 2004
- [3] Laboratorio RUFILLI, Registros de perforaciones de suelos en la Ciudad de Guayaquil. Base de datos actualizada, 2004
- [4] Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V., "River flow forecasting through conceptual models: Part I do A discussion of principles", *J. Hydr.*, 10, 1970, pp. 282 290.
- [5] Legates, D.R., and McCabe, G.J., "Evaluating the use of "goodness of fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation," *Water Resources Research*, 35, 1999, pp. 233 241.
- [6] Criollo, E. "Desarrollo de mapas digitales de parámetros de suelos típicos: caso de estudio de la Ciudad de Guayaquil," Tesis de B.Sc., Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2004.

