

Caracterización de la variabilidad espacial de la resistencia al corte no drenada del depósito lacustre A, ubicado en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Characterization of the spatial variability of the undrained shear strength of the lacustrine deposit A, located in the Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

LINA ASTRID DÍAZ MÉNDEZ¹ - ÁLVARO MANRIQUE MUÑOZ² -
LINA XIMENA GARZÓN ÁVILA³

1. Ingeniera civil, magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia, de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Ingeniero civil, magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia, de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

3. Doctora en Ingeniería de la Universidad de los Andes, profesora del Centro de Estudios Geotécnicos.

lina.diaz@mail.escuelaing.edu.co - alvaro.manrique@mail.escuelaing.edu.co - lina.garzon@escuelaing.edu.co

Recibido: 17/04/2020 Aceptado: 03/05/2020

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

La presente investigación se basa en la incorporación de la teoría de los campos aleatorios, con el objeto de caracterizar la variabilidad espacial mediante el cálculo de los valores de la media, la varianza y la escala de fluctuación. Se realiza el estudio para valores de la resistencia al corte no drenada (C_u), tomando información registrada en CPT a profundidades de 42,5 m, 30,92 m y 20,66 m, respectivamente, en el depósito lacustre A, localizado en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Se encontró que el depósito presenta valores de media de 32,76 KPa, desviación estándar de 15,58 KPa y escalas de fluctuación de hasta 67,32 mm.

Palabras claves: escala de fluctuación, media, varianza, función de autocorrelación.

Abstract

This paper presents the incorporation of the random fields theory to characterize the spatial variability using values of the standard deviation and the scale of fluctuation, the study was carried for values of the undrained shear strength (C_u) taking information from CPT's at depths of 42.5 m, 30.92 m and 20.66 m, respectively, in lacustrine deposit A, located at Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. The deposit was found to have mean values of up to 32.76 KPa, standard deviation 15.58 KPa and fluctuation scales of up to 67.32 mm.

Keywords: fluctuation scale, mean, variance, autocorrelation function.

INTRODUCCIÓN

La incertidumbre en geotecnia, derivada por la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, es uno de los principales problemas a los que se enfrenta el ingeniero a la hora de diseñar estructuras. La investigación de la caracterización de los depósitos de suelo mediante el empleo de enfoques determinísticos subestima esta incertidumbre. Vanmarcker, en las primeras aproximaciones hechas en este campo, se analizó la variabilidad del suelo y se incorporó la estadística espaciotemporal a los análisis geotécnicos [1].

Una manera de abordar el efecto de la variabilidad espacial del suelo es mediante el uso de la metodología de campos aleatorios, la cual consiste en un conjunto de valores asociados a un espacio unidimensional o multidimensional [2]. Se dice que los valores en un campo aleatorio por lo general están correlacionados espacialmente si los valores adyacentes de la variable no difieren tanto, como los valores que se encuentran más separados [3].

De acuerdo con diferentes estudios [4], las propiedades físicas y mecánicas pueden verse influenciadas por la variabilidad espacial, incluso en estratos con estructura aparentemente homogénea, afectando entre otras la estabilidad de un talud y la capacidad portante de una cimentación.

En Colombia, específicamente en geotecnia, son pocos los estudios en los que se aborda la variabilidad espacial de la resistencia al corte no drenado, medida por su escala de fluctuación; sin embargo, existen estudios que modelan físicamente la incertidumbre [5]. En agronomía, geología y minería, se aborda la variabilidad utilizando herramientas geoestadísticas para determinar la calidad de los suelos (fertilidad) y las reservas de yacimientos. Teniendo en cuenta lo anterior, cobra especial atención contar con una caracterización para un depósito como el lacustre A, el cual puede presentar espesores de hasta 600 metros.

Validar la escala de fluctuación para un parámetro de resistencia en un depósito como el lacustre A de la sabana de Bogotá es, de por sí, toda una incógnita. Los estudios efectuados en Australia [6] y Missouri [7] tratan con espesores de depósitos que no superan los 5 m. Cobra importancia, entonces, desarrollar una investigación de este tipo, ya que en primer lugar se tienen pocos antecedentes en Colombia, y en segundo término, esto permitirá conocer cuál o cuáles pueden

ser las distancias de correlación y escalas de fluctuación para el depósito lacustre A.

En los resultados de la presente investigación se encontró que la escala de fluctuación para la resistencia al corte no drenado (C_u) alcanza valores de hasta 67,32 mm, a su vez los rangos de valor medio oscilan entre 16 KPa y 51 KPa, y una desviación estándar de ???

En el presente estudio se estimó la variabilidad espacial de la resistencia al corte no drenado (C_u) del depósito lacustre A, localizado en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, haciendo uso de la teoría de campos aleatorios, y determinando la media, varianza y escala de fluctuación en los CPT disponibles, con el propósito de que en el futuro se incorpore esta metodología en los diseños basados en confiabilidad.

TEORÍA DE CAMPOS ALEATORIOS PARA CARACTERIZAR LA VARIABILIDAD ESPACIAL

Un campo aleatorio se puede describir por su media, su varianza y la escala de fluctuación (δ), siendo esta última la distancia sobre la cual la variable en estudio presenta una fuerte correlación [8].

Si bien la media y la desviación estándar de los parámetros se determinan fácilmente, la escala de fluctuación requiere un perfil bien definido de suelo y herramientas estadísticas complejas, como las series tiempo y estructuras de correlación espacial para su estimación.

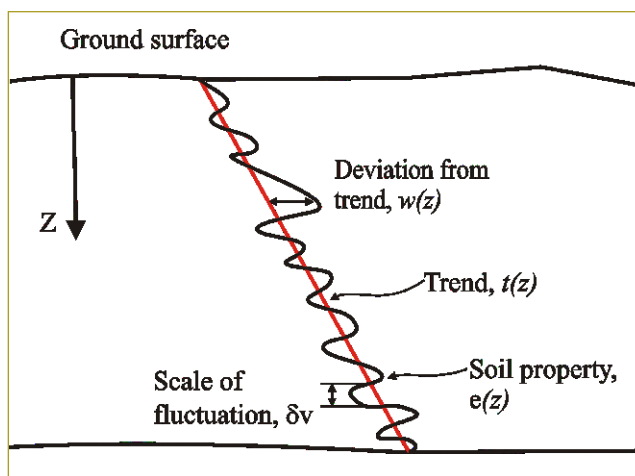


Figura 1. Variabilidad inherente del suelo [8].

En la figura anterior (figura 1) se puede observar un perfil típico de suelo que es espacialmente variable, el cual exhibe un componente de tendencia, un com-

ponente fluctuante y una escala vertical de fluctuación. Pequeños valores de la escala de fluctuación implican variaciones rápidas sobre la media, mientras que los valores grandes sugieren una propiedad que varía lentamente con respecto al promedio [1].

Función de autocorrelación

La función de autocorrelación (ACF, por su sigla en inglés) ha sido la herramienta más utilizada para determinar la caracterización de la variabilidad espacial de los parámetros geotécnicos, y en la mayoría de los casos se empleó para datos a intervalos cercanos, regulares y fijos, por lo cual son válidos los obtenidos con CPTu [7].

El cálculo de funciones de autocorrelación puede tener diferentes enfoques e intereses, que dependen entre otras del grado de sesgo, la variabilidad del muestreo y la facilidad de uso y aplicación. Los métodos más comunes para su caracterización consisten en el método de los momentos, el método del enfoque de Bartlett, el método basado en el principio de máxima verosimilitud, la geoestadística, etc. No obstante, el método de momentos es el más común para estimar la función de correlación de la muestra de las propiedades del suelo [1].

Una forma clásica de describir funciones aleatorias a través de la función de autocorrelación es el coeficiente de correlación $\rho(\Delta z)$, en el que se establece la relación de los valores de una función aleatoria en la separación al rezago (k).

$$x = z + e \quad (1)$$

Donde x es la medida en una ubicación dada, z es el componente de tendencia y e es el residual (desviación sobre la tendencia). Los residuos de la tendencia tienden a exhibir correlación espacial. El grado de correlación espacial entre los residuos puede expresarse a través de una función de autocovarianza [1].

$$C(k) = E[P(z_i) - t(z_i)] [P(z_j) - t(z_j)] \quad (2)$$

Donde (k) es el vector de separación de la distancia $i-j$, (E) es la esperanza, $P(z_j)$ es el dato en la posición i , ($t(z_j)$) es el valor de la tendencia en la posición (j). La forma normalizada de la función de autocovarianza está dada por la función de autocorrelación.

$$\rho(k) = \frac{c(k)}{c(0)} \quad (3)$$

Donde $c(0)$ es la función de autocovarianza a una distancia de separación cero, que no es más que los datos de la varianza.

No es posible evaluar ($c(k)$) ni ($\rho(k)$) con certeza, y solamente se pueden estimar para muestras obtenidas de una población significativa. Como resultado de lo anterior se evalúa la autocovarianza de la muestra en el rezago k , ($c(k)$), y la autocorrelación de la muestra en el rezago k ($r(k)$). La función de autocorrelación (ACF) es la gráfica de ($r(k)$), para los $k = 0, 1, 2, \dots, n$ rezagos, donde n es el número máximo de rezagos permitidos [6]. En general, n se toma como un cuarto del número total de puntos de datos en el análisis de series temporales en geotecnia [1]; más allá de este número de rezagos, los resultados son poco confiables.

La función de autocorrelación en el rezago k se evalúa con la siguiente expresión:

$$r_k = \frac{\frac{1}{(N-k-1)} \sum_{i=1}^{N-k} (X_i - \bar{X})(X_{i+k} - \bar{X})}{\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (5)$$

Si no hay errores de medición o ruido en la función, r se vuelve igual a 1 a una distancia de cero rezagos [1]. Las funciones de autocorrelación se evalúan para datos estadísticamente homogéneos. Las características de autocorrelación para cualquiera que sea la propiedad investigada del suelo pueden analizarse con la distancia de autocorrelación o la escala de fluctuación, que es, teóricamente, igual al área bajo la función de correlación. La escala de fluctuación (o radio de correlación) para un campo aleatorio unidimensional se define por la ecuación [1]:

$$\delta = \int_0^{\infty} \rho(\tau) d\tau \quad (6)$$

En el análisis de series de tiempo, la técnica más utilizada para determinar la distancia de correlación se conoce como el límite de Bartlett (Lb), y que corresponde a dos errores estándar de las estimaciones [7], es decir, la distancia de rezago a la que los límites positivos de Bartlett superpuestos en el gráfico de la función de autocorrelación (ACF) cruzan la función [6].

$$Lb = \frac{1,96}{\sqrt{N}} \quad (4)$$

Donde N es el número total de datos analizados del tramo analizado.

Como se muestra en otros estudios [7], la escala de fluctuación (δ) se determina a partir de la distancia de autocorrelación medida en la intersección entre el límite de Bartlett con la ACF. Luego, (δ) se estima de acuerdo con el modelo que más se ajuste de la Tabla 1 [7].

Tabla 1

Funciones de autocorrelación teóricas usadas para determinar la escala de fluctuación (δ) [7]

Modelo N.º	Función de autocorrelación	Escala de fluctuación δ_y
1	$\rho_{\Delta z} = \begin{cases} 1 - \frac{ \Delta z }{a} & \text{for } \Delta z \leq a, \\ 0 & \text{for } \Delta z \geq a \end{cases}$	a
2	$\rho_{\Delta z} = e^{- \Delta z /b}$	2b
3	$\rho_{\Delta z} = e^{-(\Delta z /c)^2}$	$\sqrt{\pi}c$
4	$\rho_{\Delta z} = e^{- \Delta z /d} \left(1 + \frac{ \Delta z }{d} \right)$	4d

A pesar de ser un trabajo netamente espacial, es posible utilizar toda la teoría estadística para campos temporales; se tienen profundidades a una razón constante y en ellas se toma una medición de la variable respuesta; como este proceso solo se mueve en una sola dirección, en este caso la profundidad, es posible hacer un símil viendo la profundidad de las mediciones como medidas de tiempo, es decir, se reemplaza el dominio; esto permite que la variable de estudio sea un proceso estocástico, y facilita la aplicación de toda la teoría temporal a un contexto espacial, esto es, es un proceso complejo en el que se emplean técnicas estadísticas no convencionales en geotecnia.

Estacionariedad

Los métodos comunes para la validación de la homogeneidad estadística se clasifican en pruebas paramétricas y pruebas no paramétricas. Las paramétricas requieren supuestos sobre la distribución de la población estudiada, por lo que deben cumplirse algunas condiciones previas [1]. En las pruebas no paramétricas no se hacen hipótesis sobre la distribución de los datos [9].

Teniendo en cuenta lo anterior, prevalece un enfoque basado en pruebas no paramétricas, puesto que su aplicación no se ve restringida por la distribución; no obstante, cuando no se cumple con los supuestos de las no paramétricas, es posible hacer uso de las paramétricas [3].

En la presente investigación se utilizó como prueba no paramétrica el Kendall test (λ) y, en caso de requerirse, se aplicó la prueba paramétrica Dickey-Fuller; en los dos casos se formuló un código en R para la validación de la homogeneidad estadística.

RESULTADOS

Se analizaron los tres perfiles de CPT (figura 2). Éstos se discretizaron en sectores que presentaron homogeneidad estadística, se calcularon las funciones de autocorrelación, se estimaron las distancias de autocorrelación, se ajustaron a las funciones de modelo simple exponencial.

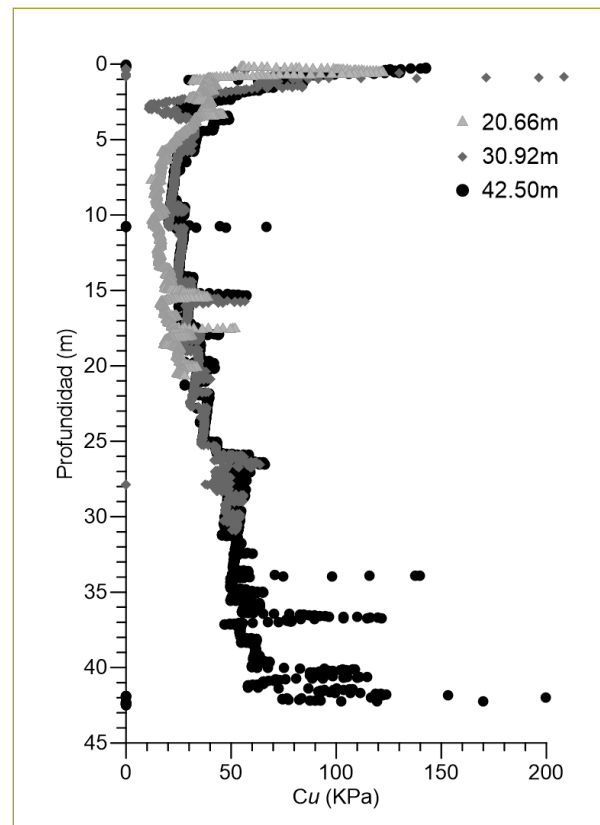


Figura 2. CPT analizados de profundidades 20,66 m, 30,92 m y 42,5 m.

En el total de los tres (3) CPT se identificaron 19 sectores que se evaluaron con la prueba no paramétrica Kendall test, encontrándose tres sectores que no cumplían (CPT 42,5 m en sectores 2 y 5; CPT 30,92, sector 1). Como alternativa para verificar la estacionariedad de estos tres sectores, se aplicó la prueba paramétrica Dickey - Fuller y se encontró que los dos sectores de CPT 42,5 m cumplían la hipótesis de nulidad de estacionariedad. El sector CPT 30,92 m finalmente no cumplió los requisitos de estacionariedad, por lo cual no se consideró como sector para analizar. Finalmente, son 18 sectores, aptos para continuar el análisis mediante estadística espaciotemporal y posterior estimación de la escala de fluctuación.

A continuación se presentan las funciones de autocorrelación encontradas en los diferentes sectores analizados.

Se presenta el resultado para el CPT 42.5 - sector 1 en la Figura 3 el sector discretizado y en la Figura 4 la función de autocorrelación encontrada .

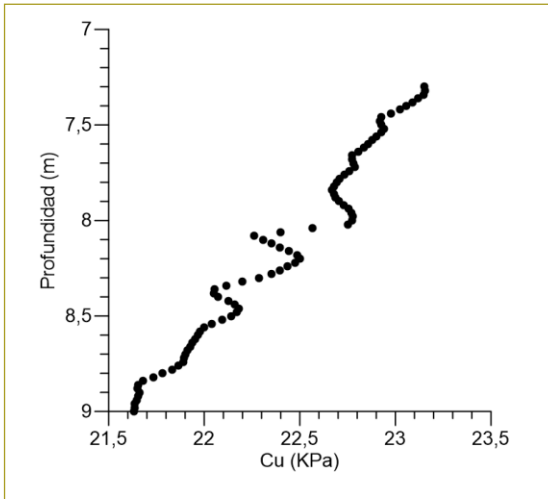


Figura 3. Se presenta CPT, 42,5 m, sector 1.

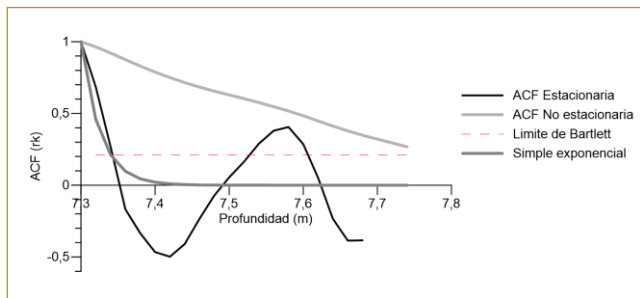


Figura 4. Se presenta función de autocorrelación CPT 42,5 m, sector 1.

Se presenta el resultado para el CPT 30.92 - sector 2 en la Figura 5 el sector discretizado y en la Figura 6 la función de autocorrelación encontrada.

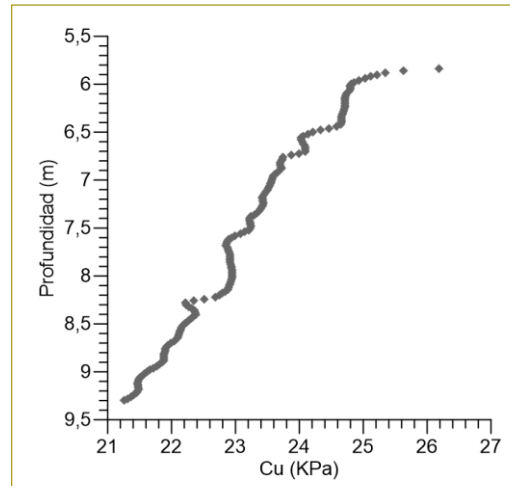


Figura 5. Se presenta CPT 30,92, sector 2.

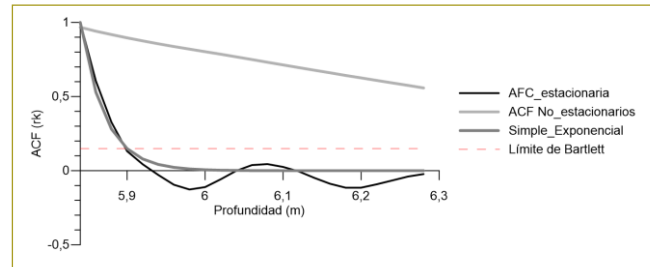


Figura 6. Se presenta función de autocorrelación CPT 30,92 m, sector 2.

Se presenta el resultado para el CPT 20,66 m, sector 2 en la Figura 7 el sector discretizado y en la Figura 8 la función de autocorrelación encontrada .

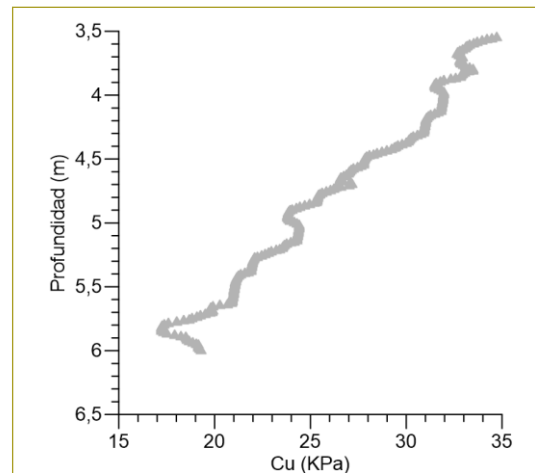


Figura 7. Se presenta CPT 20,66 m, sector 2.

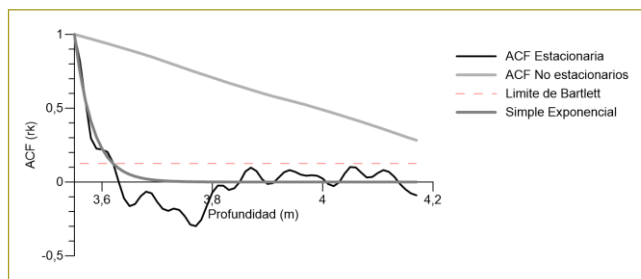


Figura 8. Se presenta función de autocorrelación CPT 30,92 m, sector 2.

Se estiman las escalas de fluctuación y los resultados obtenidos se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 2
Resultados escala de fluctuación de CPT, 42,5 m

CPT3-42,50 m				δ (mm)
Sector	Inicial (m)	Final (m)	Longitud (m)	
1	7,3	9	1,7	51,47
2	10,98	14	3,02	43,50
3	18,44	19,64	1,2	57,87
4	23,76	24,98	1,22	57,53
5	32,54	33,52	0,98	46,76
6	3,10	41,84	38,74	25,71

Tabla 3
Resultados escala de fluctuación de CPT, 30,92 m

CPT1, 30,92 m				δ (mm)
Sector	Inicial (m)	Final (m)	Longitud (m)	
1	3,72	4,84	1,12	
2	5,84	9,3	3,46	62,94
3	10,86	14,34	3,48	29,48
4	16,28	17,86	1,58	39,52
5	19,10	20,36	1,26	63,99
6	22,76	25,24	2,48	13,78
7	2,24	30,92	28,68	33,53

Tabla 4
Resultados escala de fluctuación de CPT, 20,66 m

CPT2, 20,66 m				δ (mm)
Sector	Inicial (m)	Final (m)	Longitud (m)	
1	1,8	2,3	0,5	46,40
2	3,55	6	2,45	67,32
3	6,74	7,52	0,78	26,46
4	15,00	15,51	0,51	46,06
5	19,20	19,99	0,79	27,43
6	1,06	20,66	19,6	25,66

A continuación en las Tablas 5, Tabla 6 y Tabla 7 se presentan los resultados de la media y varianza de C_u que también son componentes y caracterizan el campo aleatorio:

Tabla 5
Resultados media y varianza de CPT, 42,5 m

Sector	Media (KPa)	Varianza KPa^2 .	Desviación estándar (S)	Coefficiente de variación
1	22,40	0,21	0,46	0,02
2	26,07	0,73	0,85	0,03
3	35,06	0,05	0,22	0,01
4	37,00	0,15	0,39	0,01
5	51,40	0,17	0,41	0,01
6	43,06	320,53	17,90	0,42

Tabla 6
Resultados media y varianza de CPT, 30,92 m

Sector	Media (KPa)	Varianza KPa^2 .	Desviación estándar (S)	Coefficiente de variación
1	32,7	0,01	0,10	0,00
2	23,17	1,19	1,09	0,05
3	26,77	4,16	2,04	0,08
4	28,89	0,21	0,46	0,02
5	34,36	0,05	0,22	0,01
6	37,33	0,28	0,53	0,01
7	32,66	99,19	9,96	0,30

Tabla 7
Resultados media y varianza de CPT 20,66 m

Sector	Media (KPa)	Varianza KPa^2 .	Desviación estándar (S)	Coefficiente de variación
1	35,61	8,71	2,95	0,08
2	26,16	25,72	5,07	0,19
3	16,46	0,06	0,24	0,01
4	31,42	22,71	4,77	0,15
5	25,32	0,88	0,94	0,04
6	22,63	64,61	8,04	0,36

ANÁLISIS DE RESULTADOS

La investigación se centró en calcular la escala de fluctuación, no obstante, una de las mayores dificultades

se encontró en la identificación y clasificación de los sectores que cumplieran la homogeneidad necesaria para el análisis.

Se buscó garantizar la continuidad para la cantidad de sectores analizados, pero muchos de ellos no eran aptos en cuanto a homogeneidad. Los sectores finalmente seleccionados (tablas 2, 3 y 4) fueron los únicos que satisficieron dicha condición.

Al analizar la totalidad del conjunto de los datos, así como las longitudes que presentaban mayor grado de estacionariedad, se puede afirmar que, en general, de la idea que se tiene que el depósito lacustre A es homogéneo, esta afirmación procede para las caracterizaciones determinísticas, lo que en realidad sucede es que el depósito, en efecto, es espacialmente variable y está condicionado por los repetidos eventos geológicos que se dieron durante su formación [10]. El hecho de que no existan tramos o longitudes de una mayor extensión es una particularidad de los suelos lacustres en la ciudad de Bogotá.

Los tramos discretizados reflejan las condiciones de homogeneidad más confiables para el depósito que aquellas que tienen en cuenta la totalidad de los datos para todo perfil del depósito.

Los antecedentes para las investigaciones en la India [1], así como en Missouri (Estados Unidos) [7], están dados para estratos cohesivos de poco espesor y con particularidades geológicas para depósitos más consolidados, de menor longitud y de mayor edad, lo cual los hace más homogéneos.

Al comparar los valores estimados de escalas de fluctuación con otros estudios se tiene lo siguiente:

La investigación de Australia [7] está dada para una gran extensión y un número representativo de CPT evaluados. Los resultados muestran que para un depósito de 5 m la homogeneidad estadística es alta, en la que se obtuvieron escalas de fluctuación de entre 63 mm y 241 mm, al igual que coeficientes de variación de 30 %. En Australia, los valores corresponden a escalas de fluctuación para la resistencia por punta del cono (Q_c); no obstante, Phoon establece que estimar δv para Q_c es equivalente a hacerlo para C_u .

Respecto a las funciones de autocorrelación (ACF) se puede observar que, en efecto, los datos son estacionarios debido a que éstos decaen en los primeros rezagos en forma exponencial. Si se compara con la AFC para los datos experimentales, se observa que éstos

decaen linealmente; a la hora de hacer una evaluación y un cálculo de la escala de fluctuación para este caso (decaimiento lineal), no son confiables los resultados para este parámetro.

La distancia entre la cual el depósito lacustre A, localizado en la Escuela Colombiana de Ingeniería, muestra fuerte correlación es de hasta los 67,32 mm; este valor, si se compara con los estudios en la India, en Missouri (Estados Unidos) y Adelaida (Australia), resulta menor. De lo anterior se infiere que una escala de fluctuación (δ) pequeña, traduce fluctuaciones rápidas sobre la media con una posible reducción en la varianza [1].

Al analizar la totalidad de los datos en cada uno de los CPT contra los sectores discretizados, se observa que la cantidad de datos que se tengan para el análisis no incide en los resultados; es decir, una gran cantidad de datos es independiente de los valores que tome la escala de fluctuación.

CONCLUSIONES

Cada día se hace más necesario incorporar el tratamiento de los datos y la estadística en geotecnia, sobre todo por la gran variabilidad que exhiben los materiales geológicos, inducida principalmente por sus ambientes de formación, erosión y meteorización, entre otras. En este punto, la estadística es una herramienta de apoyo que facilita la correcta interpretación de las propiedades físicas, mecánicas y espaciales, indispensables para el diseño en geotecnia.

Para la aplicación de una metodología de caracterización de variabilidad espacial con la metodología propuesta, es necesario formular, utilizar y acoplar los conceptos de estadística espacial y estadística temporal, la unión de estas dos permite una correcta interpretación para elaborar un análisis como el del objeto del presente estudio. Sumado a lo anterior, también se destaca la importancia de las herramientas descriptivas de los datos para lograr una interpretación acertada de la naturaleza del tipo de depósito al que se enfrenta el diseñador.

Mediante el análisis estadístico espaciotemporal, se estimó la variabilidad espacial del depósito lacustre localizado en la Escuela Colombiana de Ingeniería.

Media (μ) = 32,76 Kpa

Desviación estándar (σ) = 15,58 KPa

Escala de fluctuación (δv) = 67,32 mm

Lo anterior se refiere a que la distancia en la cual la propiedad del suelo evaluada (C_u) muestra una fuerte correlación de sus propiedades es mayor de 67 mm; esto es, cada cuatro mediciones (en el caso de los CPTu de medición de 2 cm) de la resistencia al corte no drenado suponen que la correlación disminuye entre las fluctuaciones de las mediciones y se comportan más al azar.

Los coeficientes de variación para C_u en los sectores discretizados de los CPTu 42,50 m, 30,92 m y 20,66 m son del 1 % al 19 %, pero para la totalidad de los perfiles están en el orden del 30 % al 42 %; esto demuestra la trascendencia y la necesidad de discretizar los análisis en el depósito, ya que este procedimiento reduce la incertidumbre de los modelos, mientras que para la totalidad de los datos en cada uno de los perfiles afecta el ajuste y la convergencia de los modelos en el cálculo de la escala de fluctuación.

Entre los factores indispensables para el correcto desarrollo de la metodología propuesta, se encontró que identificar la homogeneidad estadística de los resultados de la resistencia al corte no drenada de los datos es fundamental. Se encontró que el conjunto de datos del lacustre A para la C_u es sensible a cualquier variación que se presente, un dato atípico, que limita homogeneidad, modifica tendencias y aumenta el sesgo existente entre los datos, generando así conflictos en las interpretaciones y no convergencia de los modelos en los resultados de los análisis estadísticos.

Teniendo en claro lo que implica contar con datos que se ajusten al propósito del estudio, cobra gran importancia la verificación de estacionariedad de los datos, ya que esta condición se refleja en las gráficas de las funciones de autocorrelación; por ejemplo, cuando se grafican datos transformados en estacionarios, las AFC convergen exponencialmente y decaen en los primeros rezagos, lo que indica y ratifica la estacionariedad; en cambio, cuando se grafican datos experimentales que no son estacionarios se aprecian funciones que decaen linealmente, la diferencia entre las dos se refleja en el hecho de que en el primer caso se miden distancias de correlación y escalas de fluctuación reales, mientras que en el segundo caso se incurría en lecturas y mediciones que no tienen en cuenta la estacionariedad de los datos.

Aun cuando se describen tres métodos para verificar la homogeneidad estadística de los datos, solo los resultados obtenidos del método basado en la prueba de Dickey-Fuller y el Kendall test resultaron lo suficien-

temente adecuados para los cálculos de estacionariedad, dado que el método del enfoque Bartlett y su complemento con el modificado de Bartlett son aproximados e iterativos y pueden resultar menos confiables.

Las escalas de fluctuación para todos los datos y los sectores discretizados para la resistencia al corte no drenado presentan un coeficiente de variación (C_v) de 37 %; si se comparan con los estudios desarrollados hasta el momento (Jaksa, Brooker & Kaggwa, 1997; Ge & Onyejekwe, 2013; Murthy, 2005), se encuentra que están dentro de los rangos estimados en cada uno de los estudios particulares.

La complejidad geológica del lacustre A de la ciudad de Bogotá evidencia que los eventos que se presentaron durante su formación condicionan la homogeneidad del depósito, pues las intercalaciones limosas y areno-gravosas obligan a discretizarlo en substratos; la implantación de cimentaciones profundas, por ejemplo, podría hacer creer que un valor determinístico de laboratorio estimado a cierta profundidad pueda ser suficiente para diseñarla, por lo que es recomendable tener en cuenta la variabilidad espacial y cómo ésta puede influenciar la respuesta del suelo y la estructura.

Las características estadísticas de los datos de laboratorio presentan diferencias apreciables para los humedades y límites líquidos, puesto que sus rangos máximos y mínimos pueden afectar los modelos estadísticos espaciotemporales; sin embargo, esta afirmación debe continuar en investigación, siguiendo la metodología de variabilidad espacial.

Se decidió hacer el cálculo de los parámetros espaciales para la resistencia al corte no drenada C_u , debido a que es la propiedad que está involucrada directamente en diseño de estructuras de un depósito como el lacustre A; no obstante, la metodología se puede aplicar a cualquier propiedad que cuente con una cantidad de datos significativa.

De acuerdo con las caracterizaciones geológicas se puede afirmar que el depósito lacustre A tiene un comportamiento anisotrópico transversal.

REFERENCIAS

- [1] Murthy Dasaka, S. (s.f.). *Probabilistic site characterization and reliability analysis of shallow foundations and slopes*. Bangalore: Indian Institute of Science.
- [2] Uzuelli, M., Lacase, S., Nadim, F., & Phoon, K. K. (2006). *Soil variability analysis for geotechnical practice* (p. 104).

- [3] Uzielli, M. (2008). *Statistical analysis of geotechnical data* (pp. 1-21).
- [4] Cheng, H., Chen, J., Chen, R., Chen, G., & Zhong, Y. (2018). *Risk assessment of slope failure considering the variability in soil properties. Computers and Geotechnics, 23*.
- [5] Garzón, L. X., Caicedo, B., Silva, M. S., & Phoon, K. K. (2014). Physical modelling of soil uncertainty. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*.
- [6] Jaksa, M., Kaggwa, W., & Brooker, P. (1999). Experimental evaluation of the scale of fluctuation of a stiff clay. Adelaide, Australia: University of Adelaide, Department of Civil and Environmental Engineering. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/246138559_Experimental_evaluation_of_the_scale_of_fluctuation_of_a_stiff_clay.
- [7] Onyejekwe, S. (2012). Characterization of soil variability for reliability based design. Obtenido de http://scholarsmine.mts.edu/doctoral_dissertation: http://scholarsmine.mts.edu/doctoral_dissertation.
- [8] Phoon, K.-K., & Kulhawy, F. H. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Geotechnical Journal, 612-624*.
- [9] Delicado, P. (2008). *Curso de modelos no paramétricos*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- [10] Ruiz Campo, A. (2006). Origen, formación, estructura y comportamiento de la arcilla de Bogotá [tesis de maestría, Universidad de los Andes].
- Arenas, D. M., & Torres, G. R. (2005). *Geología de la sabana de Bogotá*. Bogotá: Ingeominas.
- Baecher, G. B., & Christian, J. T. (2003). *Reliability and statistics in geotechnical engineering*. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd.
- Cryer, J., & Chan, K.-S. (2008). *Time series analysis*. OIWA: Springer.
- Dalgaard, P. (2008). *Introductory statistics with R*. Nueva York: Springer.
- Fenton, G. A., & Griffiths, D. V. (2007). Review of probability theory, random variables, and random fields. *Probabilistic methods in geotechnical engineering, 1-76*.
- Ge, L., & Onyejekwe, S. (Marzo de 2013). Scale of fluctuation of geotechnical parameters estimated from cptu and laboratory test data. Obtenido de Research Gate: <https://www.researchgate.net/publication/268459054>.
- Holtz, R. D., Kovacs, W., & Sheahan, T. (2011). *An introduction to geotechnical engineering*. New Jersey: Pearson.
- Hong, Z., & Zhang, L. M. (2013). Characterizing geotechnical anisotropic spatial variations using random field. *Canadian Geotechnical Journal, 723-734*.
- Jaksa, M. B. (2013, March). Assessing soil correlation distances and fractal behavior. *Geotechnical Special Publication*.
- Jaksa, M. B., Brooker, P. I., & Kaggwa, W. S. (1997). Inaccuracies associated with estimation of random measurement errors. *Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 393-401*.
- Julivert, M. (1961). *Boletín de Geología*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Kim, H. (2005, August). *Spatial variability in soils* [In Partial Fulfillment of the Requirements of the Degree Doctor of Philosophy in Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology].
- Kulhawy, F., Birgisson, B., & Grigoriu, M. D. (1992). Reliability-based foundation design for transmission line structures: transformation models for in-situ tests. EPRY Report No. EL-5507.
- Lacasse, S., & Nadim, F. (1996). Uncertainties in characterising soil properties. *Geotechnical Special Publication, 49-75*.
- Montaña Sanabria, D. (2013). *Características de compresibilidad y resistencia de las arcillas típicas del depósito lacustre de Bogotá*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Nie, X., Zhang, J., Huang, H., Liu, Z., & Lacasse, S. (2015). *Scale of fluctuations for geotechnical probabilistic analysis* (pp. 834-840). T. Schweckendiek (eds.).
- Raba, M. A., & Caicedo, B. (2012). Caracterización física y geomecánica de los suelos lacustres en la ciudad de Bogotá desde el contexto de modelos de comportamiento de suelos blandos. .
- Rodó, P. (2020, junio). *Economipedia/Haciendo fácil la economía*. Obtenido de <https://economipedia.com/definiciones/contraste-de-dickey-fuller.html>.
- Sarmiento Terán, C. F., & León Arias, D. A. (2016). *Caracterización geomecánica estática y dinámica a partir de exploración directa, indirecta y ensayos de laboratorio en el sitio de experimentación geotécnica en la Escuela Colombiana de Ingeniería*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Suárez Pinilla, J. G. (2017). *Análisis por confiabilidad de asentamientos de cimientos superficiales*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Uzielli, M., Vannucchi, G., & Phoon, K. K. (2005). Random field characterisation of stress-normalised cone penetration testing parameters. *Géotechnique, 1, 55*.